

Wykłady z Fizyki 06



Zbigniew Osiak

Elektryczność

ORCID

Linki do moich publikacji naukowych i popularnonaukowych, e-booków oraz audycji telewizyjnych i radiowych są dostępne w bazie ORCID pod adresem internetowym:

<http://orcid.org/0000-0002-5007-306X>

OZNACZENIA

B – notka biograficzna

C – ciekawostka

D – propozycja wykonania doświadczenia

H – informacja dotycząca historii fizyki

I – adres strony internetowej

K – komentarz

P – przykład

U – uwaga

Zbigniew Osiak (Tekst)

WYKŁADY Z FIZYKI
Elektryczność

Małgorzata Osiak (Ilustracje)

© Copyright 2013 by
Zbigniew Osiak (text) and Małgorzata Osiak (illustrations)

Wszelkie prawa zastrzeżone.

Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji
zabronione bez pisemnej zgody autora tekstu i autorki ilustracji.

Portret autora zamieszczony na okładkach przedniej i tylnej
Rafał Pudło

Wydawnictwo: Self Publishing

ISBN: 978-83-272-3895-5

e-mail: zbigniew.osiak@gmail.com

“*Wykłady z Fizyki – Elektryczność*” są szóstym z piętnastu tomów pomocniczych materiałów do jednorocznego kursu fizyki prowadzonego przeze mnie na różnych kierunkach inżynierskich. Zainteresowani studiowaniem fizyki znajdą tu podstawowe pojęcia, prawa, jednostki, wzory, wykresy i przykłady.

Uzupełnieniem szóstego tomu są eBooki:

Z. Osiak: *Elektryczność*. Self Publishing (2011).

Z. Osiak: *Encyklopedia Fizyki*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Zadania Problemowe z Fizyki*. Self Publishing (2011).

Z. Osiak: *Angielsko-polski i polsko-angielski słownik terminów fizycznych*. Self Publishing (2011).

Zapis wszystkich trzydziestu wykładów zgrupowanych w piętnastu tomach zostanie zamieszczony w internecie w postaci eBooków.

-
- Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Mechanika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Akustyka.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Hydromechanika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Termodynamika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Grawitacja.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektryczność.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Magnetyzm.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektromagnetyzm.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Optyka.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Kwanty.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Ciało Stałe.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Jądra.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Cząstki Elementarne.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Teoria Względności.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Stałe Uniwersalne i Jednostki.*

Pole elektrostatyczne

dr Zbigniew Osiak

Rysunki wykonała

Małgorzata Osiak

-
- Elektryczność 09
 - Ładunek elektryczny 10
 - Prawo Coulomba 16
 - Natężenie pola elektrycznego 24
 - Przykładowe pola elektryczne 32
 - Indukcja elektryczna 39
 - Potencjał pola elektrycznego 46
 - Metal w polu elektrycznym 58
 - Wybrane urządzenia i przyrządy 81
 - Ruch ładunku w polu elektrycznym 86

- Elektryczność \Leftrightarrow dział fizyki zajmujący się badaniem
- stałych pól elektrycznych, których źródłem są spoczywające ładunki elektryczne,
- oddziaływania ładunków ze stałym polem elektrycznym,
- właściwości przewodników i dielektryków znajdujących się w stałym polu elektrycznym,
- zjawisk towarzyszących przepływowi prądu stałego,
- obwodów prądu stałego.

- Ładunek elektryczny 11
- Zasada zachowania ładunku elektrycznego 12
- Gęstość liniowa ładunku elektrycznego 13
- Gęstość powierzchniowa ładunku elektrycznego 14
- Gęstość objętościowa ładunku elektrycznego 15

• Ładunek elektryczny (q, Q) \Leftrightarrow wielkość skalarna charakteryzująca cząstki elementarne, będące źródłami pól elektrycznych, magnetycznych i elektromagnetycznych, oraz ich oddziaływania z tymi polami. Spoczywające cząstki obdarzone ładunkiem wytwarzają stałe pola elektryczne; cząstki poruszające się ruchem jednostajnym prostoliniowym – pola elektryczne i magnetyczne, a poruszające się ruchem przyspieszonym – pola elektromagnetyczne. Wyróżniamy dwa rodzaje ładunków – dodatnie i ujemne. Ładunek elektryczny jest wielkością skwantowaną, tzn. jest całkowitą wielokrotnością ładunku elementarnego. Jednostką ładunku w układzie SI jest kulomb [C].

$$[q] = C$$

U W teorii kwarków postuluje się istnienie ładunków co do bezwzględnej wartości mniejszych od ładunku elementarnego.

- Zasada zachowania ładunku elektrycznego \Leftrightarrow zasada stwierdzająca, że w układzie niewymieniającym ładunków elektrycznych z otoczeniem suma algebraiczna wszystkich ładunków znajdujących się w układzie jest wielkością stałą.

- Gęstość liniowa ładunku elektrycznego (λ) \Leftrightarrow wielkość skalarna będąca stosunkiem ładunku elektrycznego (ΔQ) równomiernie rozmieszczonego wzdłuż elementu linii do długości (Δl) tego elementu.

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta l}, \quad [\lambda] = \frac{C}{m}$$

- Gęstość powierzchniowa ładunku elektrycznego (σ) \Leftrightarrow wielkość skalarna będąca stosunkiem ładunku elektrycznego (ΔQ) równomiernie rozmieszczonego na elemencie powierzchni do pola (ΔS) tego elementu.

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta S}, \quad [\sigma] = \frac{C}{m^2}$$

- Gęstość objętościowa ładunku elektrycznego (ρ) \Leftrightarrow wielkość skalarna będąca stosunkiem ładunku elektrycznego (ΔQ) równomiernie rozmieszczonego w elemencie przestrzeni do objętości (ΔV) tego elementu.

$$\rho = \frac{\Delta Q}{\Delta V}, \quad [\rho] = \frac{C}{m^3}$$

- Pole elektryczne 17
- Stała dielektryczna 18
- Przenikalność elektryczna 19
- Prawo Coulomba 20
- Siła kulombowska 22
- Siły elektryczne 23

- Pole elektryczne \Leftrightarrow przestrzeń, w której między innymi:
- Działają siły elektryczne na spoczywające i poruszające się ładunki elektryczne.
- Indukują się ładunki elektryczne na powierzchniach nienaładowanych metali (indukcja elektrostatyczna).
- Indukują się ładunki elektryczne na powierzchniach nienaładowanych dielektryków (polaryzacja dielektryków).
- Pole elektrostatyczne \Leftrightarrow pole elektryczne, którego źródłem są spoczywające ładunki elektryczne.
- Stałe pole elektryczne \Leftrightarrow pole elektryczne, którego wektory natężeń są stałe w czasie.

- Stała dielektryczna (ϵ_r) \Leftrightarrow liczba informująca ile razy siła działająca między dwoma ładunkami elektrycznymi w danym ośrodku jest mniejsza od siły działającej między tymi ładunkami w próżni.

$$\epsilon_r \geq 1$$

$$\epsilon_r = 1 \quad \text{tylko dla próżni}$$

$$\epsilon_r > 1 \quad \text{dla wszystkich dielektryków}$$

$$\epsilon_r = 1,00059 \quad \text{dla powietrza}$$

- Stała dielektryczna nazywana jest też względną przenikalnością elektryczną.

- Przenikalność elektryczna (ε) \Leftrightarrow wielkość skalarna mierzona w faradach na metr [F/m], będąca iloczynem przenikalności elektrycznej próżni (ε_0) i względnej przenikalności elektrycznej (ε_r) ośrodka.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad [\varepsilon] = \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

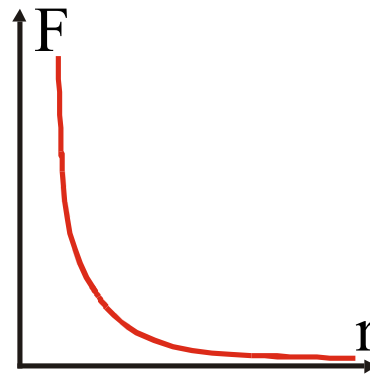
- Prawo Coulomba \Leftrightarrow prawo sformułowane przez Coulomba, głoszące, że każde dwa spoczywające punktowe ładunki elektryczne oddziałują na siebie wzajemnie siłą, której wartość (F) jest wprost proporcjonalna do iloczynu ich wartości (Q) i (q) oraz odwrotnie proporcjonalna do iloczynu kwadratu odległości (r) między nimi i stałej dielektrycznej ośrodka (ϵ_r), w którym się znajdują.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|Qq|}{\epsilon_r r^2}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$ – przenikalność elektryczna próżni
- Siła ta jest skierowana wzdłuż prostej łączącej oba oddziałujące ładunki. Dwa ładunki jednoimienne odpychają się, a dwa różnoimienne przyciągają się.

B Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806), francuski fizyk.



- Wykres zależności wartości siły elektrycznej (F), działającej między dwoma punktowymi ładunkami elektrycznymi, od odległości (r) między nimi

- Siła kulombowska \Leftrightarrow siła wynikająca z prawa Coulomba, z jaką oddziałują na siebie wzajemnie dwa spoczywające ładunki punktowe.

B Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), francuski fizyk.

-
- Siły elektryczne \Leftrightarrow siły działające w polu elektrycznym na ładunki elektryczne.

- Natężenia pola elektrycznego 25
- Zasada superpozycji natężeń pola elektrycznego 28
- Linie sił pola elektrycznego 29
- Jednorodne pole elektryczne 31

- Natężenia pola elektrycznego (\mathbf{E}) \Leftrightarrow wielkość wektorowa będąca stosunkiem siły (\mathbf{F}) działającej ze strony pola elektrycznego na znajdujący się w danym punkcie ładunek próbny do wartości (q_0) tego ładunku.

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0}, \quad q_0 > 0, \quad [\mathbf{E}] = \frac{\text{N}}{\text{C}} = \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

- Znajomość wektorów natężenia pola elektrycznego (\mathbf{E}) w każdym punkcie pola elektrycznego umożliwia wyznaczenie siły (\mathbf{F}) działającej na znajdujący się w polu ładunek (q).

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

$$q > 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{F} \uparrow \uparrow \mathbf{E}$$

$$q < 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{F} \downarrow \uparrow \mathbf{E}$$

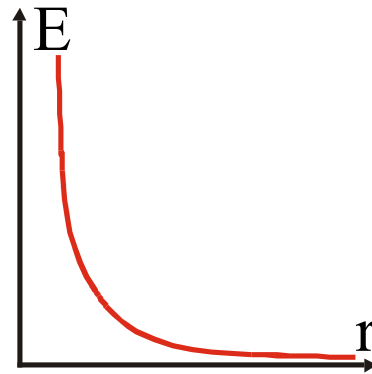
- Na dodatni ładunek działa w polu elektrycznym siła o kierunku i zwrocie natężenia pola elektrycznego. Na ujemny ładunek działa w polu elektrycznym siła o kierunku natężenia pola, ale mająca zwrot przeciwny niż natężenie.

U Ładunek próbny z założenia jest dodatni i mały, aby jego pole nie zaburzało pola źródłowego.

P Wartość natężenia pola elektrycznego (E) w odległości (r) od punktowego ładunku źródłowego (Q) wynosi:

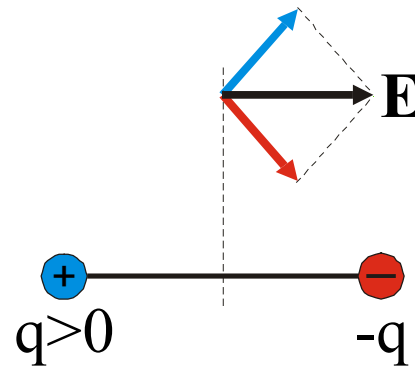
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|Q|}{r^2} \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$ – przenikalność elektryczna próżni



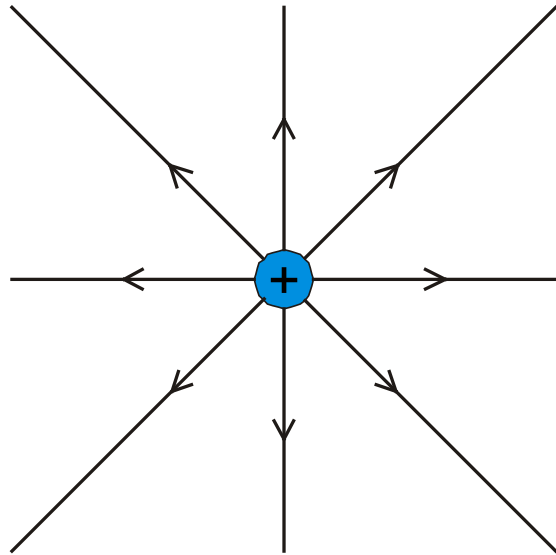
- Wykres zależności wartości natężenia pola elektrycznego (E) od odległości (r) od punkowego źródłowego ładunku elektrycznego

- Zasada superpozycji natężeń pola elektrycznego \Leftrightarrow zasada stanowiąca, że wektor natężenia pola elektrycznego, wytworzonego przez układ ładunków, równy jest sumie wektorów natężeń pochodzących od poszczególnych ładunków. Natężenia dodają się geometrycznie.

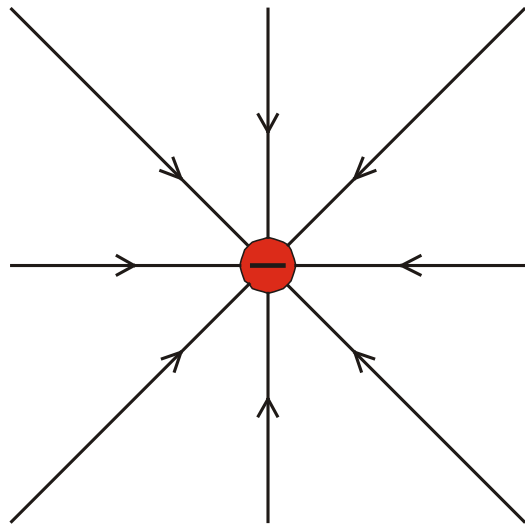


- Wypadkowe natężenie pola elektrycznego (\mathbf{E}) w punkcie leżącym na osi dipola

- Linie sił pola elektrycznego \Leftrightarrow linie, do których styczne w każdym punkcie linii pokrywają się z kierunkiem wektora natężenia pola elektrycznego w tym punkcie. Linie sił zaczynają się na ładunkach dodatnich i kończą na ujemnych, lub jeden z ich końców znajduje się w nieskończoności. Linie sił nie mogą być zamknięte i nie mogą się przecinać. W przypadku pola jednorodnego są równoległe. Gęstość linii jest wprost proporcjonalna do wartości natężenia pola elektrycznego.



- Linie sił pola elektrycznego dodatniego punkowego ładunku elektrycznego

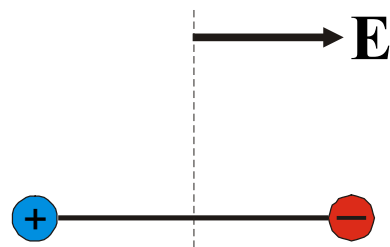


- Linie sił pola elektrycznego ujemnego punkowego ładunku elektrycznego

-
- Jednorodne pole elektryczne \Leftrightarrow pole elektryczne, którego wektory natężeń są stałe co do wartości, kierunku i zwrotu w każdym punkcie pola.

- Dipol elektryczny 33
- Moment dipolowy 34
- Wektor polaryzacji 35
- Kwadrupol elektryczny 36
- Pole elektryczne naładowanej powierzchni sferycznej 37

- Dipol elektryczny \Leftrightarrow układ dwóch różnoimiennych ładunków punktowych ($q > 0$) i ($-q$) o identycznych wartościach bezwzględnych, znajdujących się w stałej odległości od siebie. Oś dipola nazywamy prostą, na której znajdują się oba ładunki. Środkiem dipola nazywamy punkt leżący na osi dipola w równej odległości od obu ładunków dipola. W każdym punkcie płaszczyzny prostopadłej do osi dipola, przechodzącej przez jego środek, wektor natężenia pola elektrycznego jest równoległy do osi dipola i skierowany od ładunku dodatniego do ładunku ujemnego.



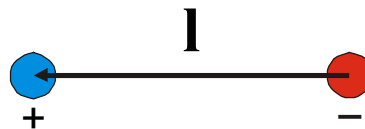
• Dipol elektryczny

- Moment dipolowy (μ) \Leftrightarrow wielkość wektorowa będąca iloczynem ładunku ($q > 0$) i ramienia dipola (\mathbf{l}).

$$\mu = ql, \quad [\mu] = \text{C} \cdot \text{m}$$

- Ramię dipola jest wektorem leżącym na osi dipola, o początku w ładunku ujemnym i końcu w ładunku dodatnim, o wartości równej odległości (l) między ładunkami dipola.

C Definicję momentu dipolowego można tak uogólnić, by wektor ten charakteryzował dowolny układ ładunków.

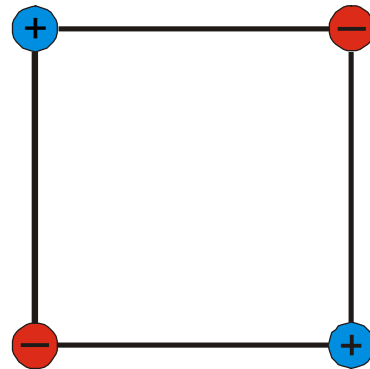


- Ramię dipola (\mathbf{l})

- Wektor polaryzacji (\mathbf{P}) \Leftrightarrow wielkość wektorowa będąca sumą momentów dipolowych wszystkich cząsteczek dielektryka (μ_i) podzieloną przez jego objętość (V).

$$\mathbf{P} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \mu_i$$

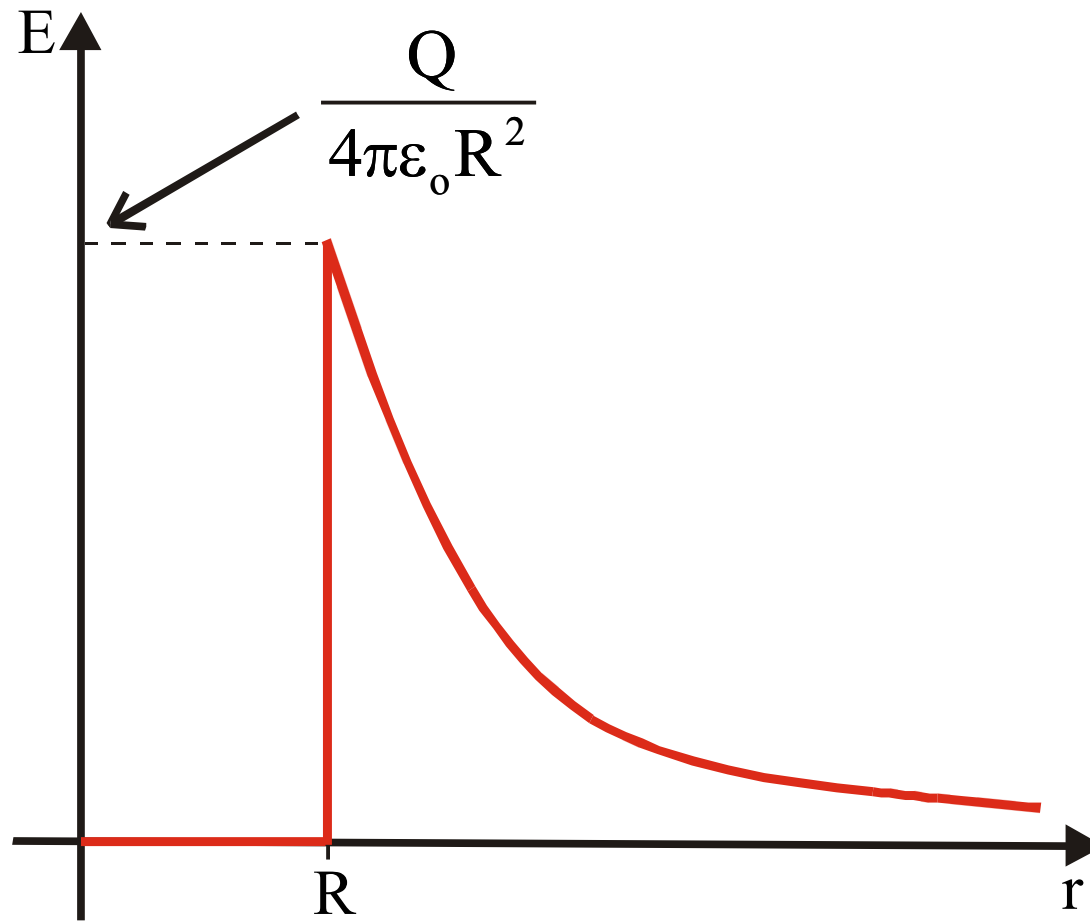
- Kwadrupol elektryczny \Leftrightarrow układ czterech ładunków elektrycznych o jednakowych wartościach bezwzględnych, z czego połowę stanowią ładunki dodatnie, rozmieszczonych w wierzchołkach równoległoboku tak, aby każdy bok łączył parę ładunków o przeciwnych znakach.



• Kwadrupol

- Natężenie pola elektrycznego, którego źródłem jest sfera naładowana ze stałą gęstością powierzchniową ładunku σ , jest
 - wewnątrz sfery ($r < R$) równe zeru,
 - na zewnątrz sfery ($r \geq R$) takie, jakby cały ładunek zgromadzony był w środku sfery.

P Przykładem takiego rozmieszczenia ładunków jest naładowana kula metalowa, ponieważ ładunki gromadzą się tylko na jej powierzchni.



- Indukcja elektryczna 40
- Płytki Mie 42
- Strumień indukcji elektrycznej 43
- Prawo Gaussa 45

- Indukcja elektryczna (**D**) \Leftrightarrow wielkość wektorowa, której wartość (**D**) w danym punkcie pola elektrycznego jest stosunkiem bezwzględnej wartości maksymalnego ładunku (q), indukowanego na powierzchni jednej z dwóch zetkniętych ze sobą bardzo małych metalowych płytek próbnych umieszczonych w danym punkcie, do pola powierzchni (jednostronnej) (S) tej płytki.

$$D = \frac{|q|}{S}, \quad [D] = \frac{C}{m^2}$$

- Indukcja elektryczna (**D**) jest wektorem o kierunku prostopadłym do płytek próbnych i skierowanym od płytki, na której indukuje się ujemny ładunek elektryczny, do płytki, na której indukuje się dodatni ładunek elektryczny.

C Indukcja elektryczna nazywana była dawniej przesunięciem elektrycznym.

P Indukcja elektryczna jest powiązana z natężeniem (**E**) pola elektrycznego oraz wektorem polaryzacji (**P**).

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad \bullet \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$$

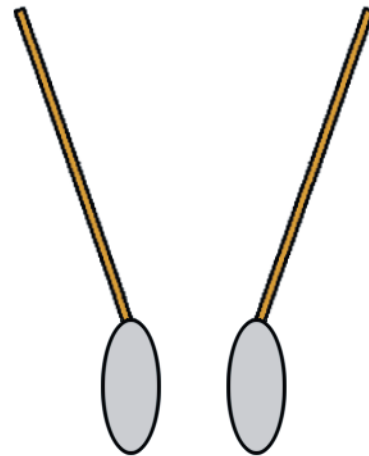
U Z doświadczenia wiadomo, że w jednorodnych izotropowych ośrodkach dielektrycznych wektory **E** i **D** są równoległe względem siebie, a ich wartości są proporcjonalne do siebie w każdym punkcie ośrodka.

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad \begin{array}{l} \bullet \varepsilon_0 - \text{przenikalność elektryczna próżni} \\ \bullet \varepsilon_r - \text{stała dielektryczna ośrodka} \end{array}$$

• Własność ta nie dotyczy ośrodków anizotropowych oraz ferroelektryków.

- Płytki Mie \Leftrightarrow metalowe płytki z izolacyjnymi uchwytemi, służące do doświadczalnego wyznaczania wektora indukcji elektrycznej.

B Gustav Adolf Feodor Wilhelm Ludwig Mie (1868-1957), niemiecki fizyk.



• Płytki Mie

- Strumień indukcji elektrycznej (Φ_D) \Leftrightarrow wielkość skalarna, której definicję podamy dla przypadku, gdy w każdym punkcie płaskiej powierzchni indukcja (\mathbf{D}) ma taką samą stałą wartość, ustalony kierunek i zwrot, inaczej mówiąc, gdy pole jest jednorodne, a powierzchnia jest fragmentem płaszczyzny.

$$\Phi_D = \mathbf{D} \cdot \mathbf{S}$$

$$\Phi_D = D \cdot S \cdot \cos \angle(\mathbf{D}, \mathbf{S})$$

$$[\Phi_D] = C$$

- \mathbf{S} – wektor o wartości równej polu płaskiej powierzchni (S), prostopadły do tej powierzchni, o zwrocie na zewnątrz obszaru ograniczonego przez rozważaną powierzchnię

- Aby wyznaczyć strumień wektora indukcji w przypadku gdy pole jest niejednorodne, a powierzchnia nie jest płaska, należy powierzchnię podzielić na kawałki płaskie tak małe, aby we wszystkich punktach pole było jednorodne. Następnie należy obliczyć strumień dla każdego kawałka i wszystkie takie elementarne strumienie zsumować.

- Prawo Gaussa \Leftrightarrow prawo sformułowane przez Gaussa, głoszące, że strumień wektora indukcji elektrycznej (Φ_D) przez powierzchnię zamkniętą jest równy algebraicznej sumie ładunków swobodnych otoczonych przez tę powierzchnię.

$$\Phi_D = \sum_i q_i$$

B Carl Friedrich Gauss (1777-1855), niemiecki matematyk, fizyk i astronom.

- Praca w polu elektrycznym 47
- Pole potencjalne 48
- Energia potencjalna wzajemnego oddziaływania dwóch ładunków punktowych 49
- Potencjał elektryczny (potencjał pola elektrycznego) 51
- Zasada superpozycji potencjałów pola elektrycznego 53
- Związek między natężeniem a potencjałem 54
- Powierzchnie ekwipotencjalne 55
- Gęstość energii pola elektrycznego 56

- Praca w polu elektrycznym ($W_{A \rightarrow B}$) \Leftrightarrow praca, jaką wykonują siły pola elektrycznego przy przemieszczaniu ładunku (q) w polu punktowego ładunku źródłowego (Q) z punktu A do punktu B wzdłuż linii sił.

$$W_{A \rightarrow B} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot Qq \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$ – przenikalność elektryczna próżni
- r_A – odległość punktu A od ładunku źródłowego
- r_B – odległość punktu B od ładunku źródłowego

- Pole potencjalne \Leftrightarrow zwane również polem bezwirowym, w którym praca wykonana przez siły pola przy przesuwaniu ładunku wzdłuż krzywej zamkniętej jest równa zero. Inaczej mówiąc, praca wykonywana przez siły pola przy przesuwaniu ładunku z jednego punktu do drugiego zależy tylko od położenia tych punktów, nie zależy od toru, po którym przesuwany był ładunek. Pole potencjalne można opisać skalarem zwanym potencjałem elektrycznym. Stałe pole elektryczne jest polem potencjalnym.

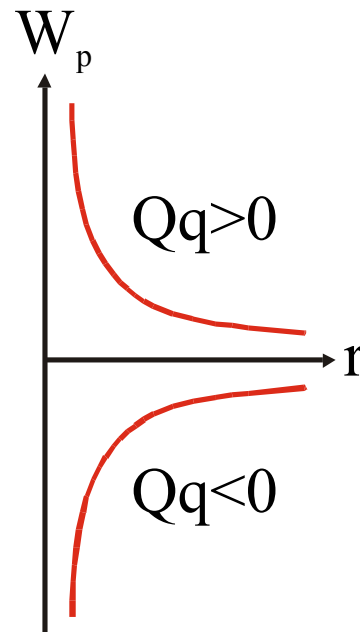
- Energia potencjalna wzajemnego oddziaływania dwóch ładunków punktowych (W_p) \Leftrightarrow energia wzajemnego oddziaływania układu dwóch ładunków punktowych (Q) i (q), znajdujących się w odległości (r) od siebie, równa pracy, jaką wykonują siły elektryczne przy rozsuwaniu tych ładunków na odległość nieskończenie wielką.

$$W_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Qq}{r}, \quad [W_p] = J$$

- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$ – przenikalność elektryczna próżni

$$W_p > 0 \quad \Leftrightarrow \quad \text{ODPYCHANIE}$$

$$W_p < 0 \quad \Leftrightarrow \quad \text{PRZYCIĄGANIE}$$



- Wykres zależności energii potencjalnej dwóch punktowych ładunków elektrycznych (W_p) od odległości (r) między nimi; energia potencjalna dwóch ładunków jednoimiennych jest dodatnia, a różnoimiennych – ujemna.

- Potencjał elektryczny (potencjał pola elektrycznego) (φ_A) \Leftrightarrow wielkość skalarna charakteryzująca pole elektryczne w danym punkcie A, będąca stosunkiem pracy ($W_{A \rightarrow B}$), jaką muszą wykonać siły pola przy przemieszczaniu ładunku z danego punktu A do punktu B, do wartości (q) przemieszczanego ładunku. Potencjał w punkcie B z założenia jest równy zero.

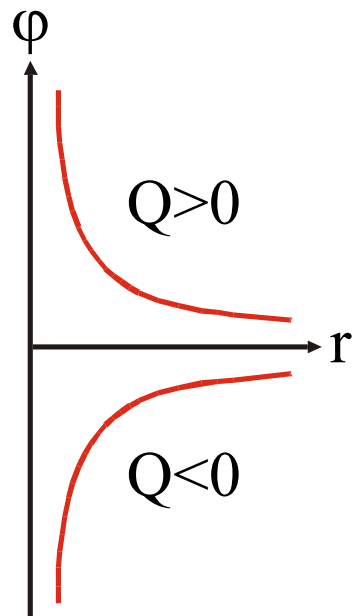
$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{W_{A \rightarrow B}}{q}, \quad \varphi_B = 0, \quad [\varphi] = \frac{J}{C} = V$$

- Najczęściej przyjmuje się $\varphi_B = 0$ w nieskończoności. Fizyczny sens ma jedynie różnica potencjałów.

P Potencjał pola elektrycznego (φ) w odległości (r) od punkowego ładunku źródłowego (Q) wynosi:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$$

- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ C/Vm – przenikalność elektryczna próżni



- Wykres zależności potencjału pola elektrycznego (φ) od odległości (r) od punkowego źródłowego ładunku elektrycznego (Q); potencjał pola elektrycznego punkowego źródłowego ładunku dodatniego jest dodatni, a ujemnego – ujemny.

- Zasada superpozycji potencjałów pola elektrycznego \Leftrightarrow zasada głosząca, że potencjał pola elektrycznego, wytworzonego przez układ ładunków, równy jest sumie potencjałów pochodzących od poszczególnych ładunków. Potencjały dodają się algebraicznie.

$$\varphi = \varphi_+ + \varphi_-$$



- Wypadkowy potencjał pola elektrycznego dipola (φ) w zaznaczonym punkcie (\bullet)

- Związek między natężeniem a potencjałem \Leftrightarrow związek między wartością natężenia (E) stałego jednorodnego pola elektrycznego a potencjałami (φ_A) i (φ_B) w punktach A i B, leżących na linii wektora (E).

$$E = - \frac{\varphi_A - \varphi_B}{x_A - x_B}$$

- x_A, x_B – współrzędne punktów A i B
- Znak minus oznacza, że wektor natężenia pola elektrycznego (E) jest skierowany od większego do mniejszego potencjału.
- W ogólnym przypadku:

$$E = -\text{grad}\varphi$$

- Powierzchnie ekwipotencjalne \Leftrightarrow powierzchnie stałego potencjału pola elektrycznego. Linie sił są prostopadłe do powierzchni ekwipotencjalnej. Gęstość powierzchni ekwipotencjalnych jest miarą wartości gradientu potencjału, czyli miarą wartości natężenia pola elektrycznego.

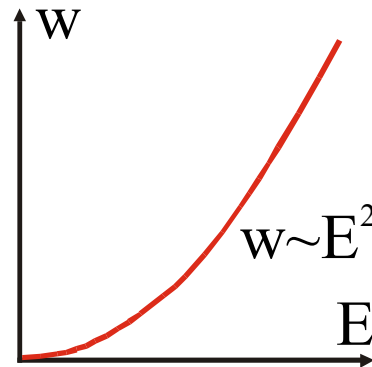
- Gęstość energii pola elektrycznego (w) \Leftrightarrow wielkość skalarna, będąca stosunkiem energii (ΔW) zawartej w objętości (ΔV) jednorodnego pola elektrycznego o natężeniu (\mathbf{E}) do tej objętości.

$$w \stackrel{\text{df}}{=} \frac{\Delta W}{\Delta V} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2, \quad [w] = \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

- $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$ – przenikalność elektryczna próżni

U Gęstość energii niejednorodnego pola elektrycznego jest pochodną zawartej w nim energii (W) względem objętości (V).

$$w \stackrel{\text{df}}{=} \frac{dW}{dV}$$



- Wykres zależności gęstości energii pola elektrycznego (w) od wartości natężenia pola elektrycznego (E)

- Naładowany metal we własnym polu elektrycznym 59
- Wiaderko (puszka) Faradaya 62
- Rozkład ładunku elektrycznego na powierzchni metalu 64
- Siatka Kolbego 65
- Naładowane ostrze metalowe 66
- Młynek Franklina 68
- Piorun 69
- Piorunochron 70
- Nienaładowany metal w zewnętrznym polu elektrycznym 71
- Indukcja elektrostatyczna 73
- Elektrofor 75
- Maszyna elektrostatyczna 76
- Klatka Faradaya 78
- Ekranowanie elektrostatyczne 79
- Uziemienie 80

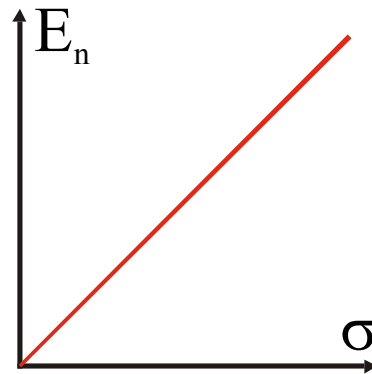
- Naładowany metal we własnym polu elektrycznym ma następujące własności:
- Nieskompensowane ładunki elektryczne gromadzą się tylko na zewnętrznej powierzchni naładowanego metalu.
- Wewnątrz naładowanego metalu natężenie pola elektrycznego jest równe zero.
- Wnętrze naładowanego metalu jest ekwipotencjalne.
- Na zewnętrznej powierzchni naładowanego metalu natężenie pola ma tylko składową normalną (prostopadłą) do tej powierzchni.
- Powierzchnia naładowanego metalu jest ekwipotencjalna.
- Wartość (E_n) składowej natężenia pola, prostopadłej do powierzchni naładowanego metalu, jest proporcjonalna do lokalnej gęstości powierzchniowej ładunku (σ).

$$E_n = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$

$$E_n = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

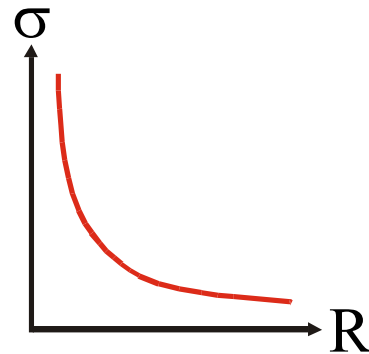
- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$ – przenikalność elektryczna próżni



- Wykres zależności wartości składowej natężenia pola elektrycznego (E_n), prostopadłej do powierzchni naładowanego metalu, od lokalnej gęstości powierzchniowej ładunku elektrycznego (σ)

- Gęstość powierzchniowa ładunku (σ) naładowanego metalu jest odwrotnie proporcjonalna do lokalnego promienia krzywizny (R).

$$\sigma \sim \frac{1}{R}$$



- Wykres zależności gęstości powierzchniowej ładunku elektrycznego naładowanego metalu (σ) od lokalnego promienia krzywizny (R)

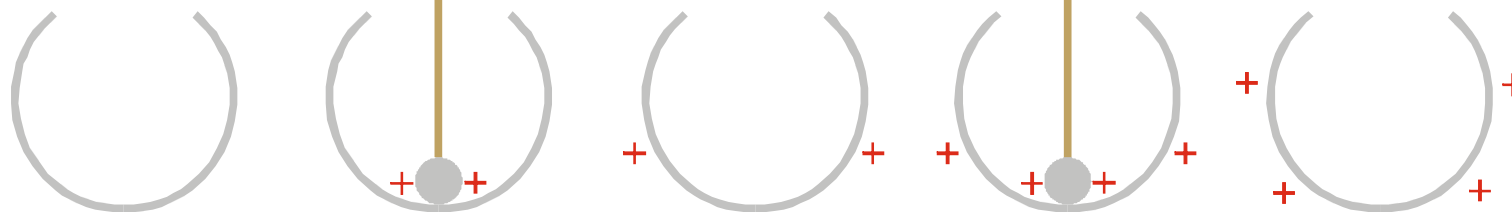
• Wiaderko (puszka) Faradaya \Leftrightarrow metalowa powłoka sferyczna (wydrążona kula metalowa) wykorzystywana w związku z tym, że nieskompensowane jednoimienne ładunki elektryczne gromadzą się tylko na zewnętrznej powierzchni metalu. Wszystkie ładunki elektryczne znajdujące się na sondzie (próbniku), po dotknięciu nią (nim) wewnętrznej powierzchni wiaderka Faradaya, natychmiast gromadzą się na jego zewnętrznej powierzchni. Wiaderko Faradaya świetnie nadaje się na końcówkę przyrządów pomiarowych, takich jak elektrometry i elektroskopy, oraz na rezerwuar ładunków elektrycznych w maszynach elektrostatycznych i elektrostatycznym generatorze Van de Graaffa.

B Michael Faraday (1791-1867), brytyjski [angielski] fizyk i chemik.

B Robert Jemison Van de Graaff (1901-1967), amerykański fizyk.

wiaderko
Faradaya

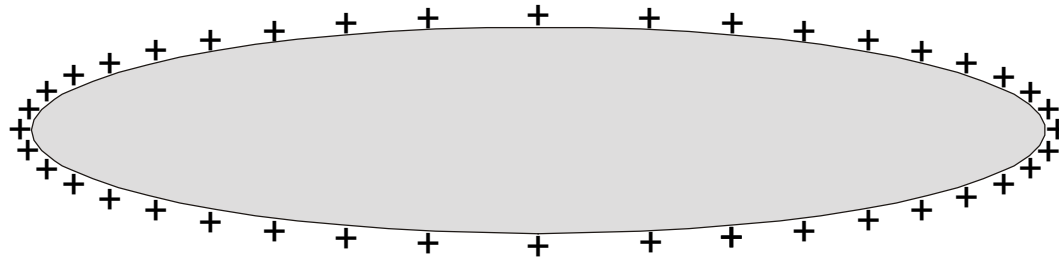
sonda



• Wiaderko (puszka) Faradaya

- Rozkład ładunku elektrycznego na powierzchni metalu \Leftrightarrow prawo stwierdzające, że gęstość powierzchniowa ładunku elektrycznego (σ) naładowanego metalu jest odwrotnie proporcjonalna do lokalnego promienia krzywizny (R).

$$\sigma \sim \frac{1}{R}$$

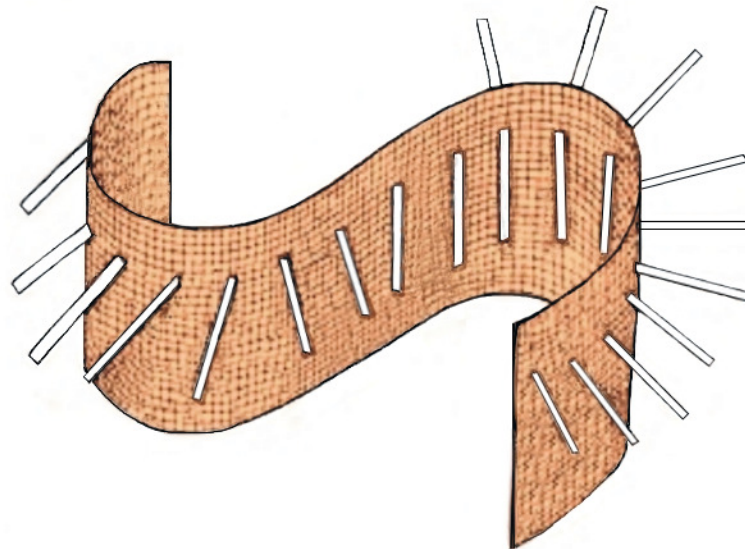


- Rozkład ładunku elektrycznego na powierzchni metalu

- Siatka Kolbego \Leftrightarrow giętka siatka metalowa z przyczepionymi do niej paskami papieru, służąca do demonstrowania zależności między wartością natężenia pola elektrycznego (E), gęstością powierzchniową ładunku (σ) i promieniem krzywizny (R) naładowanej powierzchni.

$$E \sim \sigma \sim \frac{1}{R}$$

• Siatka Kolbego

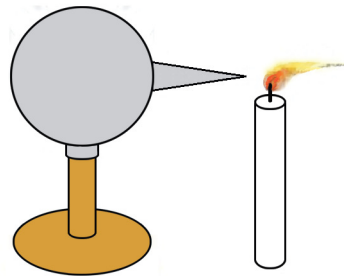


- Naładowane ostrze metalowe \Leftrightarrow wierzchołek naładowanego metalowego stożka lub stożkowej końcówki pręta (drutu). W pobliżu naładowanego ostrza wartość natężenia pola elektrycznego (E) jest tak duża, że powoduje jonizację otaczających go cząsteczek powietrza. Wynika to z faktu, że gęstość powierzchniowa ładunku (σ) zależy odwrotnie proporcjonalnie od promienia krzywizny (R) naładowanej powierzchni.

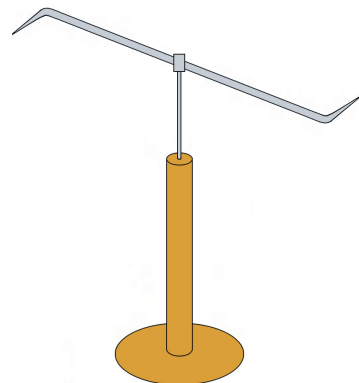
$$E \sim \sigma \sim \frac{1}{R}$$

- W pobliżu ujemnie naładowanego ostrza, wskutek wypływu elektronów, powstają jony ujemne. W pobliżu dodatnio naładowanego ostrza, wskutek zasysania elektronów, powstają jony dodatnie. W obu przypadkach powstaje tzw. wiatr elektryczny.

- Istnienie wiatru elektrycznego, można zademonstrować pochylaniem się płomienia świecy w kierunku od ostrza lub obrotem wiatraczka. Wpływ elektronów z uziemionego ostrza wykorzystywany jest też w piorunochronach.



• “Wiatr elektryczny”

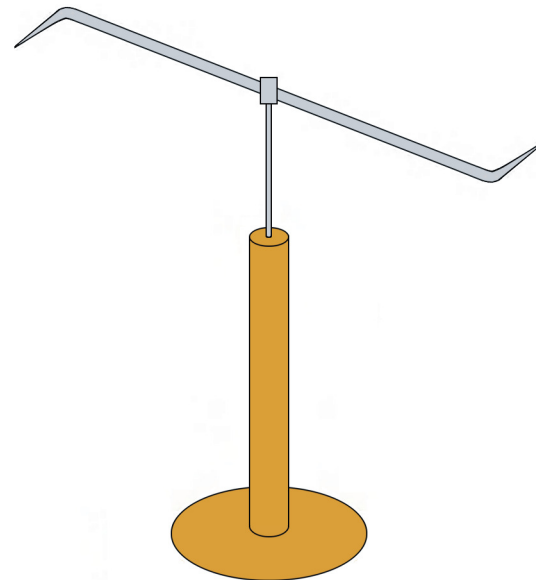


• Młynek Franklina

- Młynek Franklina \Leftrightarrow zestaw demonstracyjny służący do ilustracji własności naładowanych ostrzy metalowych. Stanowi go podparte w środku metalowe “śmigiełko” w kształcie litery S o szpiczastych końcach, które po naładowaniu zaczyna wirować.

B Benjamin Franklin (1706-1790), amerykański uczony.

• Młynek Franklina



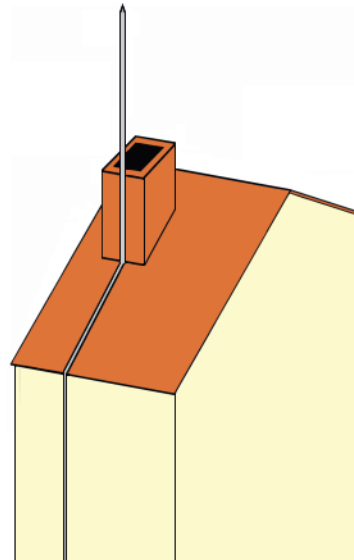
-
- Piorun \Leftrightarrow zjawisko atmosferyczne polegające na krótkotrwałym przepływie prądu elektrycznego między chmurą a ziemią lub między dwoma chmurami. Natężenie prądu podczas wyładowania atmosferycznego dochodzi do 20 000 amperów.

•Piorunochron \Leftrightarrow urządzenie służące do ochrony budynków przed wyładowaniami atmosferycznymi (piorunami). Jest nim ostro zakończony pionowy pręt metalowy połączony z ziemią grubym przewodem. Piorunochrony są instalowane w najwyższej położonych punktach budynków.

H Piorunochron został wynaleziony przez Franklina w 1752.

B Benjamin Franklin (1706-1790), amerykański uczoney.

•Piorunochron



- Nienaładowany metal w zewnętrznym polu elektrycznym ma następujące własności:
- Zewnętrzne pole elektryczne wywołuje w nienaładowanym metalu zjawisko indukcji elektrostatycznej, które polega na deformacji chmury swobodnych elektronów przewodnictwa. Na zewnętrznej powierzchni metalu indukuje się ładunek.
- Natężenia obu pól, zewnętrznego i powstałego wewnątrz metalu w wyniku deformacji chmury elektronowej, znoszą się. Wypadkowe natężenie pola w dowolnym punkcie wewnątrz metalu, znajdującego się w zewnętrznym polu elektrycznym jest równe zero.
- Ładunki znajdujące się wewnątrz uziemionej osłony metalowej indukują na jej wewnętrznej powierzchni ładunek równy im co do bezwzględnej wartości, ale przeciwnego znaku. Do ziemi odpływa ładunek równy ładunkowi wewnątrz osłony. Uziemiona osłona metalowa ekranuje przestrzeń na zewnątrz osłony od ładunków znajdujących się wewnątrz osłony.

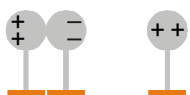
- Wnętrze nienaładowanego metalu znajdującego się w zewnętrznym polu elektrycznym jest ekwipotencjalne.
- Na powierzchni nienaładowanego metalu znajdującego się w zewnętrznym polu elektrycznym natężenie pola ma tylko składową prostopadłą do powierzchni metalu.
- Powierzchnia nienaładowanego metalu znajdującego się w zewnętrznym polu elektrycznym jest powierzchnią ekwipotencjalną.
- Silne pole elektryczne o natężeniu 10^8 V/m i większym powoduje emisję elektronów z metalu. Zjawisko to nosi nazwę emisji polowej, zimnej emisji lub autoemisji. Gęstość prądu autoemisji nie zależy od temperatury emitera. Przykładem wykorzystania tego zjawiska jest mikroskop polowy.

- Indukcja elektrostatyczna \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że zewnętrzne pole elektryczne powoduje w nienaładowanym metalu deformację chmury swobodnych elektronów przewodnictwa. Na zewnętrznej powierzchni metalu indukowane są ładunki elektryczne.

D Zjawisko indukcji elektrostatycznej można prześledzić w prostym doświadczeniu:



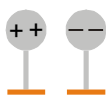
- Stykamy ze sobą dwie nienaładowane kulki metalowe umieszczone na izolujących podstawach.



- Przybliżamy do nich dodatni (lub ujemny) ładunek indukujący.



- W obecności ładunku indukującego odsuwamy od siebie obie kulki.



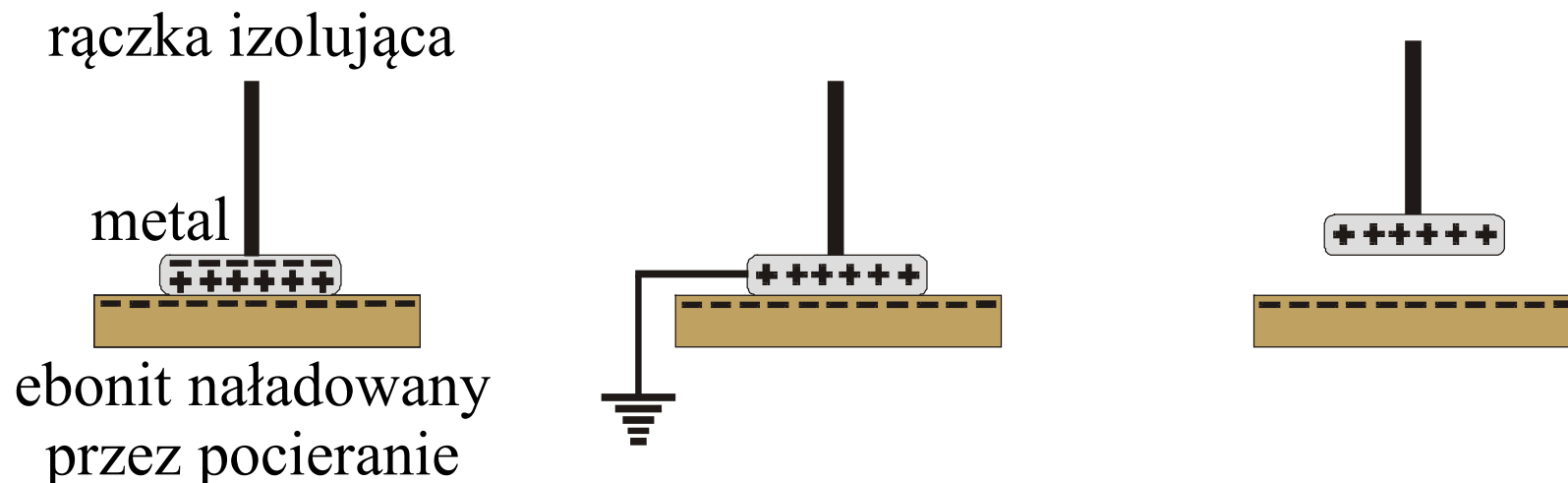
- Usuwamy ładunek indukujący. Kulki zostały naładowane ładunkami o przeciwnych znakach.

- Elektrofor \Leftrightarrow urządzenie służące do wytwarzania ładunków elektrycznych, dzięki wykorzystaniu zjawiska indukcji elektrostatycznej.

H Elektrofor został wynaleziony przez Wilckiego i niezależnie przez Voltę w 1775.

B Johan Carl Wilcke (1732-1796), szwedzki fizyk.

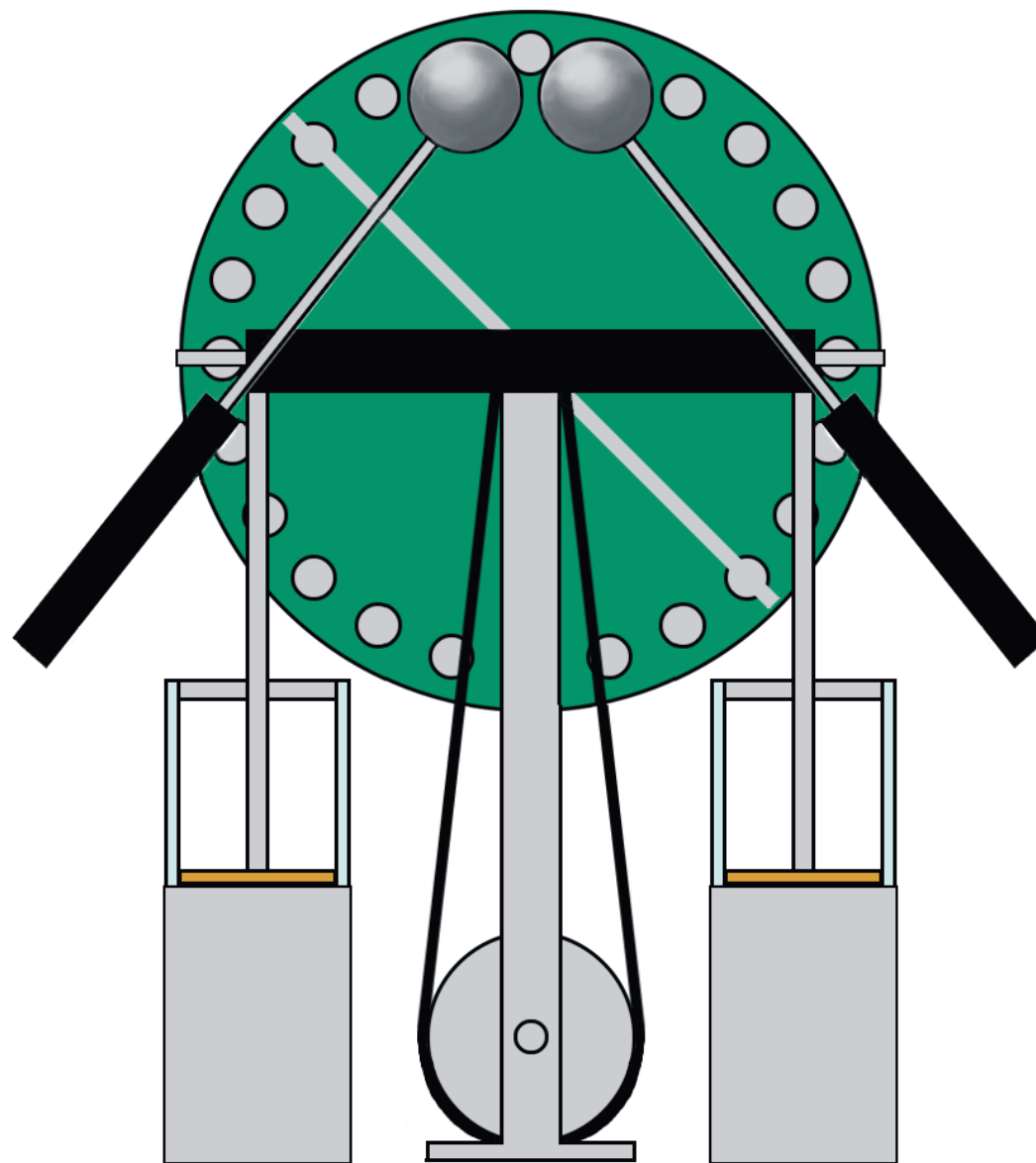
B Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745-1827), włoski fizyk.



• Maszyna elektrostatyczna \Leftrightarrow urządzenie służące do wytwarzania wysokich napięć elektrycznych dzięki wykorzystaniu indukcji elektrostatycznej. Stanowią go dwie, umieszczone blisko siebie, ebonitowe tarcze wirujące w przeciwnych kierunkach. Na zewnętrznej stronie każdej tarczy przymocowane są, w równych odstępach w pobliżu krawędzi, odizolowane od siebie cienkie metalowe krążki. Przed tarczami znajdują się, ustawione prostopadle względem siebie, metalowe łączniki zakończone szczoteczkami z cienkich drucików metalowych stykających się z krążkami. Ładunki indukowane na krążkach przez ujemne ładunki tarcz ebonitowych są zbierane przez kolektory i doprowadzane do butelek lejdejskich.

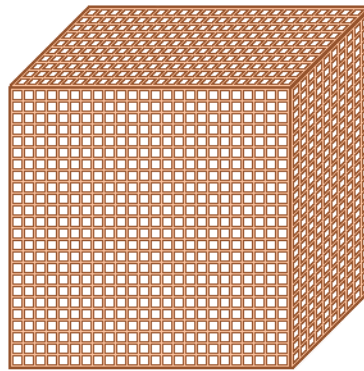
H Maszyna elektrostatyczna została wynaleziona przez Wimshursta w 1883.

B James Wimshurst (1832-1903), brytyjski (angielski) inżynier i wynalazca.



- Klatka Faradaya \Leftrightarrow uziemiona klatka wykonana z blachy lub siatki metalowej, osłaniająca całkowicie urządzenia elektryczne i przyrządy pomiarowe w celu ekranowania ich od zewnętrznych pól elektrostatycznych i elektromagnetycznych.

B Michael Faraday (1791-1867), brytyjski [angielski] fizyk i chemik.



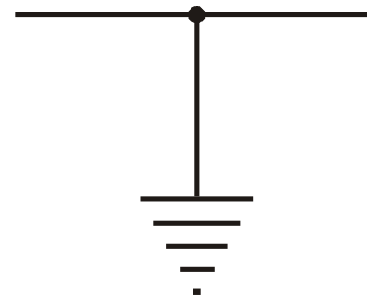
• Klatka Faradaya

- Ekranowanie elektrostatyczne \Leftrightarrow otaczanie urządzeń i przyrządów pomiarowych uziemioną blachą lub siatką metalową (klatką Faradaya) w celu osłony (ekranowania) ich przed wpływem zewnętrznego pola elektrostatycznego. Pole ładunków zewnętrznych znosi się z polem ładunków indukowanych przez nie na zewnętrznej powierzchni osłony. Uziemiona osłona metalowa ekranuje również przestrzeń na zewnątrz osłony od ładunków znajdujących się wewnątrz osłony, ponieważ ładunki te indukują na jej wewnętrznej powierzchni ładunek równy im co do bezwzględnej wartości, ale przeciwnego znaku. Do ziemi odpływa ładunek równy ładunkowi wewnątrz osłony.

• Uziemienie \Leftrightarrow połączenie z ziemią metalowych części urządzeń elektrycznych, które w normalnych warunkach mają względem ziemi potencjał równy zero. Opór przewodu uziemiającego nie powinien przekraczać 4Ω . Celem uziemienia jest między innymi ochrona ludzi przed porażeniem oraz zapewnienie jednakowego potencjału odniesienia w urządzeniach elektrycznych.

C Cysterny przewożące materiały łatwopalne są uziemione za pomocą metalowego łańcucha stykającego się z ziemią.

• Symbol uziemienia



- Generator Van de Graffa 82
- Elektrometr Brauna 83
- Elektroskop 85

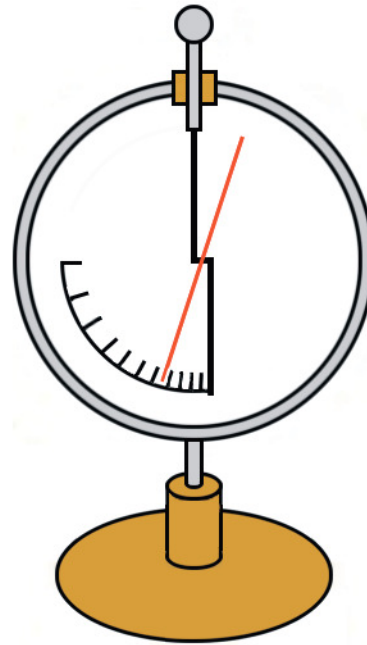
• Generator Van de Graffa \Leftrightarrow urządzenie służące do wytwarzania wysokich napięć. Ze źródła napięcia stałego ładunki elektryczne są przenoszone za pomocą jedwabnego pasa transmisyjnego do wiaderka Faradaya w kształcie kulistej kopuły. Między wiaderkiem Faradaya a ziemią można w ten sposób uzyskać różnicę potencjałów elektrycznych przekraczającą 20 MV. Aby otrzymać tak wysokie napięcia, generator Van de Graffa umieszczany jest w zamkniętym pojemniku z azotem lub freonem o ciśnieniu kilkunastokrotnie większym od ciśnienia atmosferycznego.

H Generator ten skonstruował Van de Graaff w 1931.

B Robert Jemison Van de Graaff (1901-1967), amerykański fizyk.

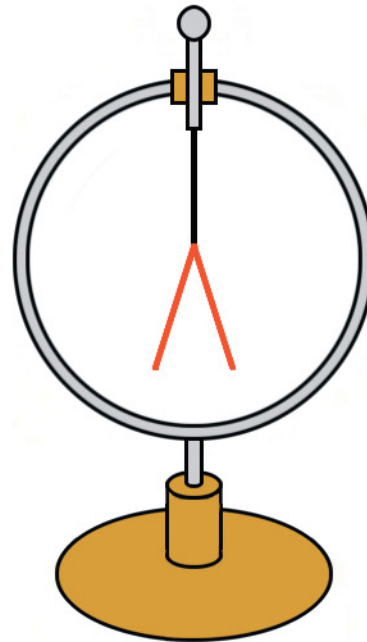
• Elektrometr Brauna \Leftrightarrow przyrząd służący do pomiaru różnicy potencjałów elektrycznych wykorzystujący odpychanie się jednoimiennych ładunków elektrycznych. Jest nim usytuowany pionowo metalowy pręt, odizolowany od osłaniającej go metalowej obudowy ze szklanym okienkiem. Górny koniec pręta, połączony z wiaderkiem Faradaya, stanowi końcówkę pomiarową. W środkowej części pręta zawieszona jest obracająca się lekka wskazówka metalowa. Kąt obrotu wskazówki zależy od ładunku doprowadzonego do końcówki elektrometru. Kąt ten jest miarą różnicy potencjałów elektrycznych między końcówką pomiarową a osłoną metalową. Jeżeli osłona jest uziemiona, to zmierzone napięcie jest równe potencjałowi końcówki pomiarowej.

B Karl Ferdinand Braun (1850-1918), niemiecki fizyk i wynalazca, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1909.



• Elektrometr Brauna

- Elektroskop \Leftrightarrow uproszczona wersja elektrometru Brauna z dwoma listkami metalowymi na dolnym końcu pionowego pręta metalowego. Kąt odchylenia listków zależy od ładunku doprowadzonego do końcówki pomiarowej elektroskopu.



• Elektroskop

- Przyspieszenie ładunku w jednorodnym stałym polu elektrycznym 87
- Równoległe wejście ładunku w jednorodne stałe pole elektryczne 88
- Prostopadłe wejście ładunku w jednorodne stałe pole elektryczne 91
- Skośne wejście ładunku w jednorodne stałe pole elektryczne 92
- Atom wodoru (model Bohra) 93

- Cząstka o masie (m) i ładunku (q) w jednorodnym stałym polu elektrycznym o natężeniu (\mathbf{E}) doznaje przyspieszenia (\mathbf{a}) danego poniższym wzorem.

$$\mathbf{a} = \frac{q}{m} \cdot \mathbf{E}$$

- Równoległe wejście ładunku (q) z prędkością początkową (\mathbf{v}_0) w jednorodne stałe pole elektryczne o natężeniu (\mathbf{E}) \Leftrightarrow

$$\mathbf{E} = \text{const}$$

$$\mathbf{v}_0 = 0$$

$$q > 0$$

$$\mathbf{F} \uparrow\uparrow \mathbf{E}$$

$$\mathbf{F} = \text{const}$$

ruch prostoliniowy jednostajnie przyspieszony

$$\mathbf{E} = \text{const}$$

$$\mathbf{v}_0 = 0$$

$$q < 0$$

$$\mathbf{F} \downarrow\uparrow \mathbf{E}$$

$$\mathbf{F} = \text{const}$$

ruch prostoliniowy jednostajnie przyspieszony

$$\mathbf{E} = \text{const}$$

$$\mathbf{v}_0 \uparrow\uparrow \mathbf{E}$$

$$q > 0$$

$$\mathbf{F} \uparrow\uparrow \mathbf{E}$$

$$\mathbf{F} = \text{const}$$

$$\mathbf{F} \uparrow\uparrow \mathbf{v}_0$$

ruch prostoliniowy jednostajnie przyspieszony

$$\mathbf{E} = \text{const}$$

$$\mathbf{v}_0 \uparrow\uparrow \mathbf{E}$$

$$q < 0$$

$$\mathbf{F} \downarrow\uparrow \mathbf{E}$$

$$\mathbf{F} = \text{const}$$

$$\mathbf{F} \downarrow\uparrow \mathbf{v}_0$$

ruch prostoliniowy jednostajnie opóźniony, a po zatrzymaniu się i zmianie kierunku prędkości – jednostajnie przyspieszony

$$\mathbf{E} = \text{const}$$

$$\mathbf{v}_0 \downarrow \uparrow \mathbf{E}$$

$$q > 0$$

$$\mathbf{F} \uparrow \uparrow \mathbf{E}$$

$$\mathbf{F} = \text{const}$$

$$\mathbf{F} \downarrow \uparrow \mathbf{v}_0$$

ruch prostoliniowy jednostajnie opóźniony, a po zatrzymaniu się i zmianie kierunku prędkości – jednostajnie przyspieszony

$$\mathbf{E} = \text{const}$$

$$\mathbf{v}_0 \downarrow \uparrow \mathbf{E}$$

$$q < 0$$

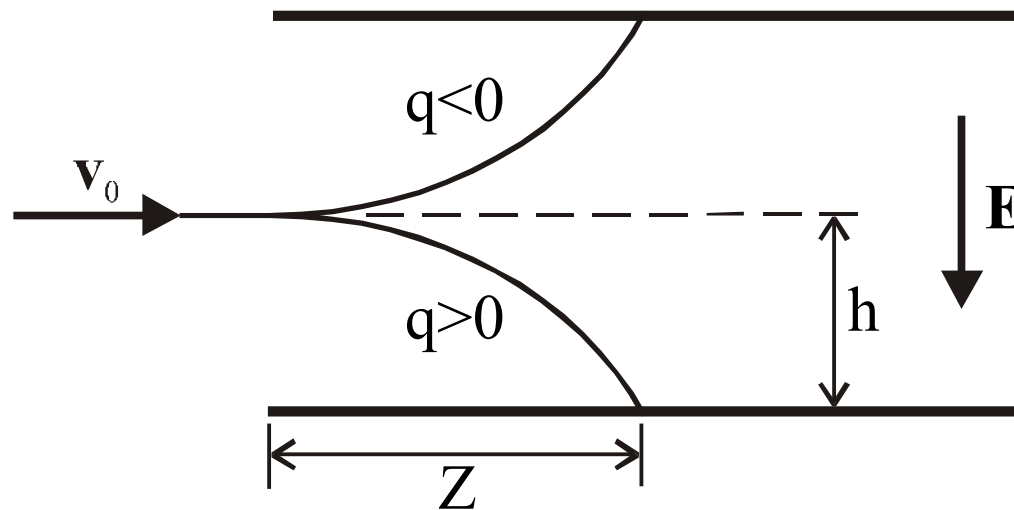
$$\mathbf{F} \downarrow \uparrow \mathbf{E}$$

$$\mathbf{F} = \text{const}$$

$$\mathbf{F} \uparrow \uparrow \mathbf{v}_0$$

ruch prostoliniowy jednostajnie przyspieszony

- Prostopadłe wejście ładunku w jednorodne stałe pole elektryczne \Leftrightarrow



$$F = qE$$

$$F = ma$$

$$h = \frac{at^2}{2}$$

$$Z = v_0 t$$

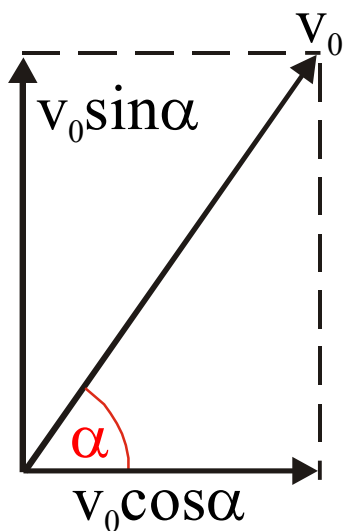
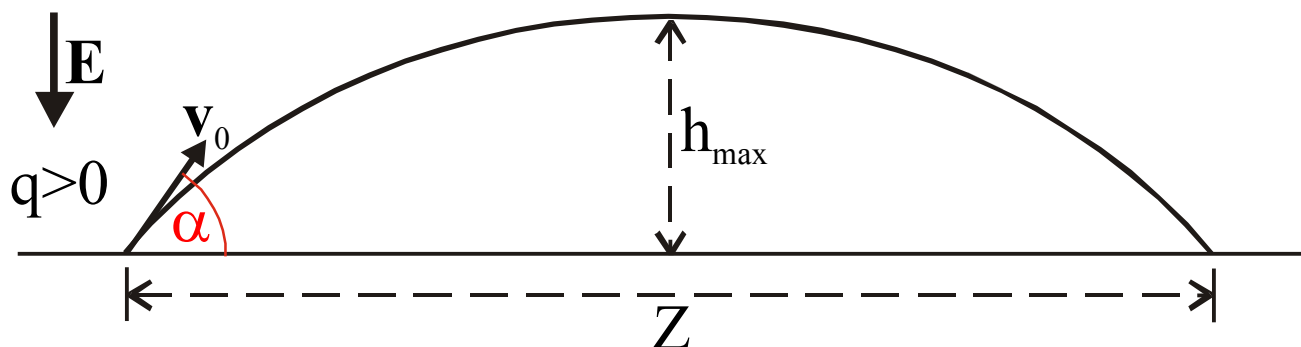
$$a = \frac{q}{m} \cdot E$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a}}$$

$$Z = v_0 \sqrt{\frac{2h}{\frac{q}{m} \cdot E}}$$

$$\frac{q}{m} = \frac{2hv_0^2}{E^2 Z^2}$$

- Skośne wejście ładunku w jednorodne stałe pole elektryczne \Leftrightarrow

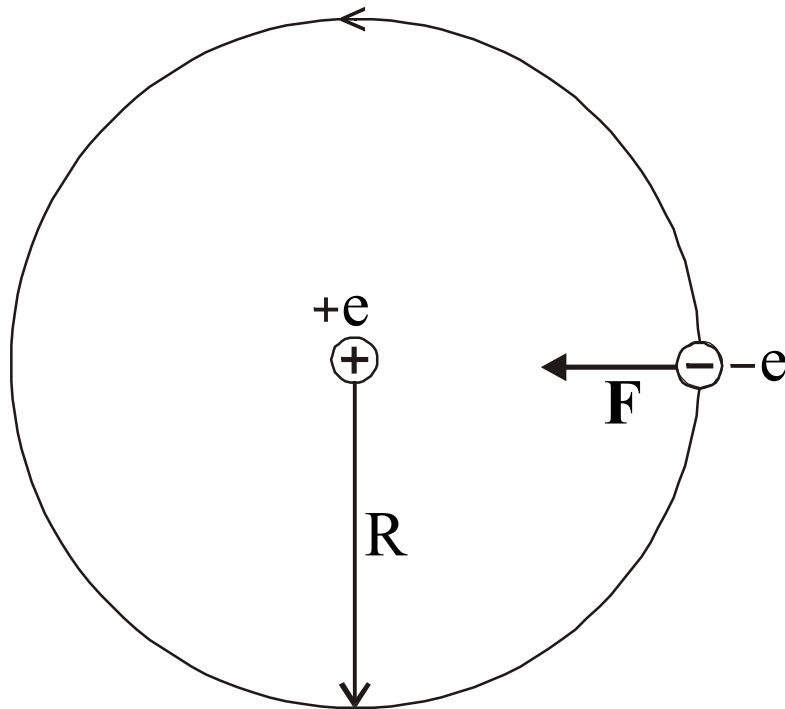


$$t = \frac{2v_0 \sin \alpha}{\frac{q}{m} \cdot E}$$

$$h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2 \cdot \frac{q}{m} \cdot E}$$

$$Z = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{\frac{q}{m} \cdot E}$$

- Atom wodoru (model Bohra) \Leftrightarrow



$$\mathbf{F}_d = \mathbf{F}_e$$

$$\mathbf{F}_d = -\frac{m_e v^2}{R} \cdot \frac{\mathbf{R}}{R}$$

$$\mathbf{F}_e = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R^2} \cdot \frac{\mathbf{R}}{R}$$

$$W_k = \frac{mv^2}{2}$$

$$W_p = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0 R}$$

$$W = W_k + W_p$$

$$R = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e v^2}$$

$$W_k = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 R}$$

$$W = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 R}$$

$$\frac{W_k}{W_p} = -\frac{1}{2}$$

- Przeprowadzone obliczenia pozornie wyglądają na poprawne. Zgodnie z fizyką klasyczną, krążący wokół jądra elektron powinien emitować energię w postaci fali elektromagnetycznej i po torze spiralnym spaść na jądro. Według Bohra, elektron poruszając się wokół jądra po tzw. **stacjonarnych orbitach**, spełniających warunek

$$m_e v_n R_n = n\hbar, \quad (n = 1, 2, 3, 4, \dots),$$

nie emituje energii.

$$m_e v_n R_n = n\hbar$$

$$R_n = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e} \cdot \frac{1}{v_n^2}$$

$$v_n = \frac{2\pi R_n}{T_n}$$

$$W_n = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{R_n}$$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$R_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} \cdot n^2$$

$$T_n = \frac{32\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3}{m_e e^4} \cdot n^3 = \frac{4\epsilon_0^2 \hbar^3}{m_e e^4} \cdot n^3$$

$$v_n = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \cdot \frac{1}{n}$$

$$W_n = -\frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

-
- n – główna liczba kwantowa, czyli numer dozwolonej stacjonarnej orbity
 - R_n – promień n -tej dozwolonej stacjonarnej orbity
 - T_n – okres obiegu n -tej dozwolonej stacjonarnej orbity
 - v_n – wartość prędkości elektronu na n -tej stacjonarnej orbicie
 - W_n – energia całkowita atomu wodoru, gdy elektron znajduje się na n -tej orbicie

Dielektryki

dr Zbigniew Osiak

Rysunki wykonała

Małgorzata Osiak

- Dielektryki 99
- Dielektryki niepolarne 100
- Dielektryki polarne 101
- Polaryzacja dielektryka 102
- Dielektryk w polu elektrycznym 103
- Elektrety 105
- Wektor polaryzacji 106
- Ferroelektryki 107
- Temperatura (punkt) Curie 108
- Histereza dielektryczna 109
- Pętla histerezy dielektrycznej 110
- Przebicie dielektryka 111

- Dielektryki \Leftrightarrow zwane inaczej izolatorami, materiały praktycznie nieprzewodzące prądu elektrycznego, o oporze elektrycznym właściwym większym od $10^8 \Omega \cdot m$. Wielkością charakteryzującą dany dielektryk jest jego stała dielektryczna. W pasmowym modelu ciała stałego dielektrykom odpowiada szerokość pasma wzbronionego większa od 5 eV.

-
- Dielektryki niepolarne \Leftrightarrow dielektryki, w których, w nieobecności zewnętrznego pola elektrycznego, każda cząsteczka ma moment dipolowy równy zero.

- Dielektryki polarne \Leftrightarrow dielektryki, w których, w nieobecności zewnętrznego pola elektrycznego, suma momentów dipolowych wszystkich cząsteczek jest równa zero, pomimo że każda cząsteczka ma różny od zera trwały moment dipolowy.

- Polaryzacja dielektryka \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że w dielektryku, znajdującym się w zewnętrznym polu elektrycznym, pojawia się różny od zera sumaryczny moment dipolowy cząsteczek. W zewnętrznym polu elektrycznym każda cząsteczka dielektryka niepolarnego uzyskuje indukowany (wymuszony) elektryczny moment dipolowy skierowany wzdłuż natężenia pola elektrycznego. W dielektrykach polarnych zewnętrzne jednorodne pole elektryczne powoduje ustawienie się momentów dipolowych cząsteczek wzdłuż pola elektrycznego, czemu przeszkadza ich chaotyczny ruch cieplny. Zewnętrzne pole elektryczne powoduje również powstawanie w cząsteczkach dodatkowego indukowanego momentu dipolowego.

- Dielektryk w polu elektrycznym \Leftrightarrow na powierzchniach granicznych spolaryzowanego dielektryka, prostopadłych do natężenia zewnętrznego pola elektrycznego, pojawiają się związane ładunki elektryczne będące źródłem pola elektrycznego o natężeniu mającym taki sam kierunek, ale przeciwny zwrot niż natężenie zewnętrznego pola elektrycznego. Wypadkowe natężenie pola elektrycznego w obszarze dielektryka jest sumą wektorową natężeń obu pól. Oczywiście, wartość wypadkowego natężenia jest mniejsza od wartości natężenia zewnętrznego, jednorodnego, stałego w czasie pola elektrycznego.

P Jeżeli źródłem pola elektrycznego jest płaski kondensator naładowany i odłączony od źródła stałego napięcia, a jednorodny dielektryk całkowicie wypełnia przestrzeń między okładkami kondensatora, to natężenie pola wewnątrz dielektryka jest ϵ_r razy mniejsze od natężenia pola między okładkami kondensatora bez tego dielektryka.

U Jeżeli źródłem pola elektrycznego jest płaski kondensator podłączony do źródła stałego napięcia, a jednorodny dielektryk całkowicie wypełnia przestrzeń między okładkami kondensatora, to natężenie pola wewnątrz dielektryka jest takie samo jak między okładkami kondensatora bez tego dielektryka.

- Elektrety \Leftrightarrow dielektryki mające trwałe, różny od zera sumaryczny moment dipolowy cząsteczek. Są one elektrostatycznymi analogami magnesów trwałych.

H Nazwa elektrety została zaproponowana przez Heaviside'a w 1885.

B Oliver Heaviside (1850-1925), brytyjski (angielski) fizyk i matematyk.

- Wektor polaryzacji (\mathbf{P}) \Leftrightarrow wielkość wektorowa będąca sumą momentów dipolowych wszystkich cząsteczek dielektryka (μ_i) podzieloną przez jego objętość (V).

$$\mathbf{P} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \mu_i$$

•Ferroelektryki \Leftrightarrow dielektryki krystaliczne, które w nieobecności zewnętrznego pola elektrycznego składają się z domen, czyli małych spolaryzowanych obszarów. Ze względu na chaotyczne rozmieszczenie domen ich wypadkowy moment dipolowy, a tym samym wypadkowy wektor polaryzacji są równe zeru.

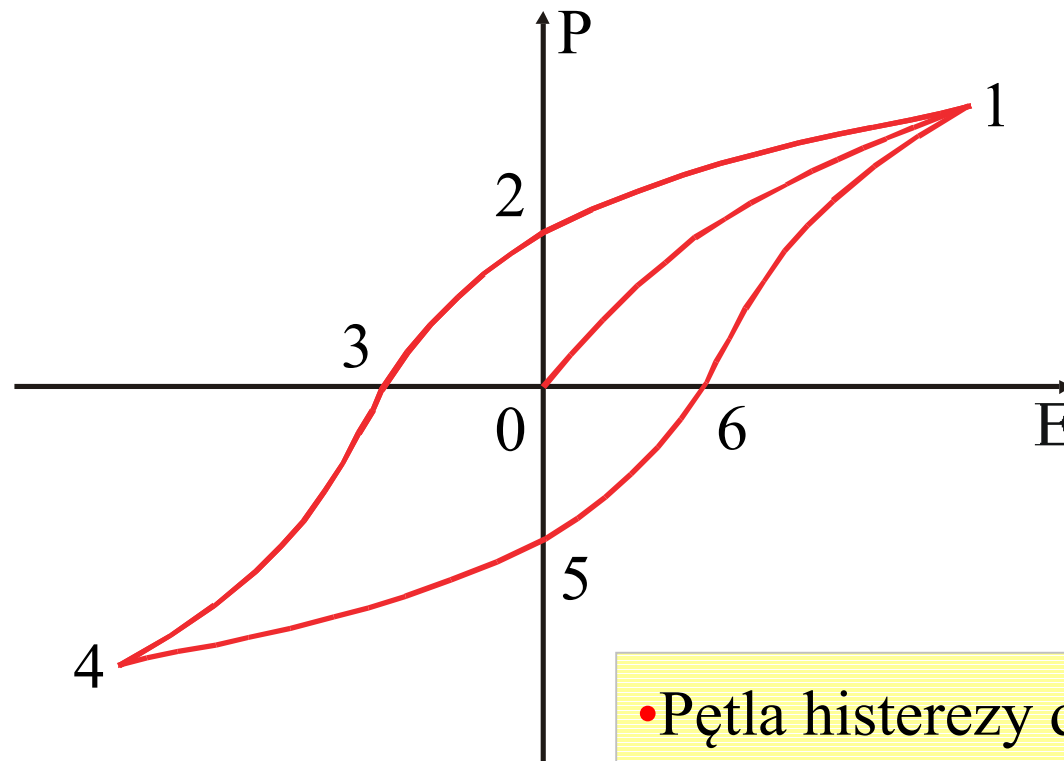
W zewnętrznym polu elektrycznym ferroelektryki ulegają polaryzacji, która polega na powiększaniu się domen i obrocie ich momentów dipolowych w kierunku pola. Ferroelektrykami są na przykład tytanian baru (BaTiO_3), sól Seignette'a, czyli winian sodowo-potasowy ($\text{NaKC}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), kwaśny fosforan potasu (KH_2PO_4), oraz RbH_2PO_4 , CsH_2PO_4 , RbH_2AsO_4 , KH_2AsO_4 , CsH_2AsO_4 , KTaO_3 , NaTaO_3 , KNbO_3 , PbTiO_3 , LiTaO_3 , LiNbO_3 , $\text{Cd}_7\text{Nb}_2\text{O}_7$. Stałe dielektryczne ferroelektryków zależą nieliniowo od temperatury i natężenia zewnętrznego pola elektrycznego.

B Pierre Seignette (1660-1719), francuski aptekarz.

- Temperatura (punkt) Curie \Leftrightarrow temperatura, powyżej której ferroelektryk przechodzi w stan właściwy dla normalnego dielektryka polarnego. Niektóre ferroelektryki mają dwa punkty Curie. Górny i dolny punkt Curie to temperatury odpowiednio powyżej i poniżej których ferroelektryk traci swe własności. W temperaturze Curie ferroelektryki osiągają bardzo duże wartości stałej dielektrycznej rzędu $10^3 \div 10^6$.

- Histeresa dielektryczna \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że danej wartości (E) natężenia zewnętrznego pola elektrycznego odpowiadają różne wartości (P) polaryzacji ferroelektryka w zależności od jej wcześniejszej wartości. Ferroelektryki mają “pamięć”.

- Pętla histerezy dielektrycznej \Leftrightarrow wykres zależności wartości polaryzacji (P) ferroelektryka od wartości natężenia (E) zewnętrznego pola elektrycznego. Pole powierzchni pętli histerezy jest proporcjonalne do ciepła wydzielonego w ferroelektryku podczas jednego obiegu (1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 1).



• Pętla histerezy dielektrycznej

-
- Przebiecie dielektryka \Leftrightarrow zjawisko polegające na przepływie prądu elektrycznego przez dielektryk pod wpływem napięcia wyższego od tzw. napięcia przebicia.

Kondensatory

dr Zbigniew Osiak

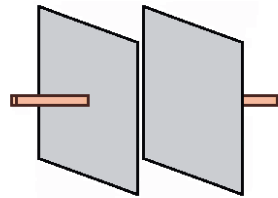
Rysunki wykonała

Małgorzata Osiak

- Kondensatory 114
- Połączenia kondensatorów 121
- Energia pola elektrycznego w kondensatorach 128
- Dwa stany naładowanego kondensatora 133

- Kondensator płaski 115
- Pojemność elektryczna 116
- Butelka lejdejska 118
- Podwójna warstwa elektryczna 119
- Napięcie kontaktowe 120

- Kondensator płaski \Leftrightarrow układ dwóch płaskich równoległych płytek metalowych, zwanych okładkami kondensatora, naładowanych ładunkami o takich samych wartościach bezwzględnych, ale przeciwnych znakach.



• Kondensator płaski



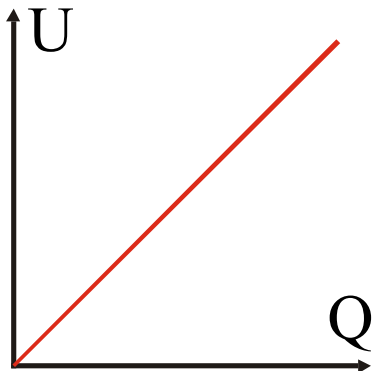
• Symbol kondensatora

- Pojemność elektryczna (C) \Leftrightarrow wielkość skalarna będąca stosunkiem ładunku (Q) na okładce dodatniej kondensatora do napięcia (U) między jego okładkami.

$$C = \frac{Q}{U}, \quad [C] = \frac{C}{V} = F$$

U Dla danego kondensatora:

$$C = \text{const}, \quad U \sim Q$$



- Wykres zależności napięcia (U) między okładkami kondensatora od ładunku (Q) na okładce dodatniej

P Kondensator płaski, którego okładki, każda o powierzchni (S), znajdują się w odległości (d) od siebie, ma pojemność:

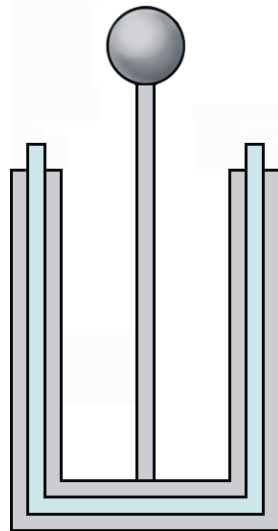
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}$$

- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$ – przenikalność elektryczna próżni
- ϵ_r – stała dielektryczna ośrodka

• Butelka lejdejska \Leftrightarrow szklane cylindryczne naczynie (butelka), pokryte od zewnątrz i wewnątrz folią metalową, stanowiące kondensator cylindryczny, wynalezione w 1746 przez Musschenbroeka w Lejdzie oraz niezależnie przez Kleista w 1745 w Kamieniu Pomorskim.

B Pieter (Petrus) van Musschenbroek (1692-1761), holenderski lekarz i fizyk.

B Ewald Jürgen Georg von Kleist (1700-1748), niemiecki duchowny i uczonek.



• Butelka lejdejska

-
- Podwójna warstwa elektryczna \Leftrightarrow dwie warstwy o przeciwnych ładunkach tworzące układ podobny do kondensatora, powstające po obu stronach powierzchni metalu, z którego wydostają się odpowiednio szybkie elektrony.

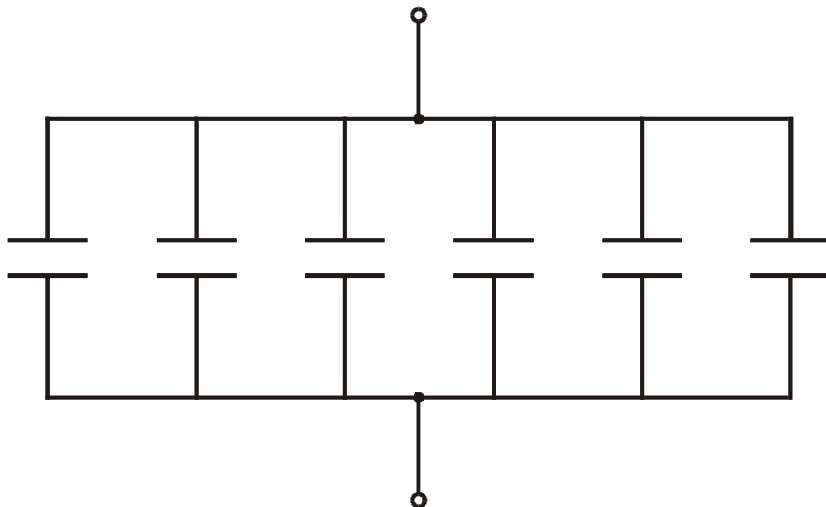
-
- Napięcie kontaktowe \Leftrightarrow napięcie powstające na styku dwóch metali lub półprzewodników o różnych pracach wyjścia.

- Pojemność zastępcza 122
- Równoległe połączenie kondensatorów 123
- Szeregowe połączenie kondensatorów 124
- Mostkowe połączenie kondensatorów 125
- Zwarty kondensator 126
- Mieszane połączenie kondensatorów 127

-
- Pojemność zastępcza \Leftrightarrow pojemność kondensatora, którym można zastąpić układ kondensatorów.

- Równoległe połączenie kondensatorów \Leftrightarrow układ kondensatorów, w którym połączone ze sobą lewe okładki wszystkich kondensatorów stanowią wspólną lewą końcówkę, a prawe – prawą. W połączeniu równoległym naładowanych kondensatorów napięcie na każdym kondensatorze jest takie samo, a pojemność zastępcza jest równa sumie pojemności poszczególnych kondensatorów.

$$C_{\text{zast}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$



- Równoległe połączenie kondensatorów

• Szeregowe połączenie kondensatorów \Leftrightarrow układ kondensatorów, w którym prawa okładka pierwszego kondensatora jest połączona z lewą okładką drugiego kondensatora, prawa okładka drugiego kondensatora jest połączona z lewą okładką trzeciego kondensatora itd. Końcówkami tego układu są lewa okładka pierwszego kondensatora oraz prawa okładka ostatniego kondensatora.

W połączeniu szeregowym naładowanych kondensatorów ładunek na każdej okładce jest co do bezwzględnej wartości taki sam, a odwrotność pojemności zastępczej jest równa sumie odwrotności pojemności poszczególnych kondensatorów.

• Szeregowe połączenie kondensatorów

$$\frac{1}{C_{\text{zast}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

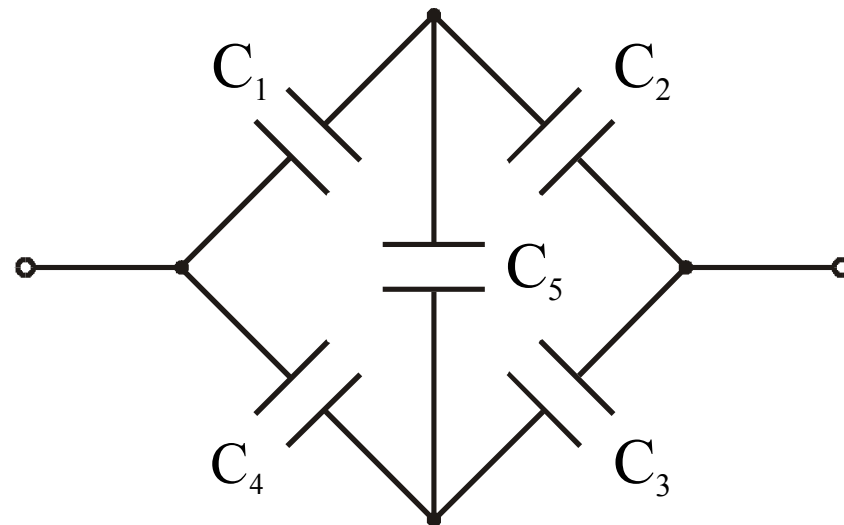


- Mostkowe połączenie kondensatorów \Leftrightarrow układ pięciu kondensatorów, połączonych tak jak na rysunku.

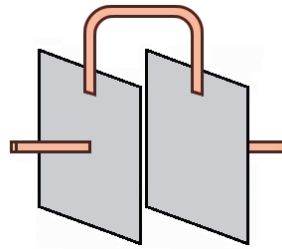
$$C_{\text{zast}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4} \Leftrightarrow C_1 C_3 = C_2 C_4$$

- W pozostałych przypadkach wzór na pojemność zastępczą jest bardzo skomplikowany.

• Mostkowe połączenie kondensatorów



- Zwarty kondensator \Leftrightarrow kondensator, którego okładki połączone metalowym drutem. Zwarty kondensator nie jest kondensatorem.

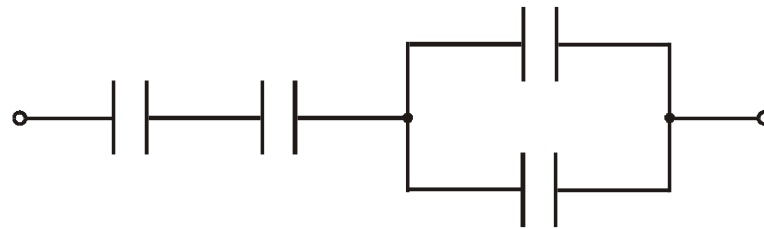


• Zwarty kondensator



• Symbol zwartego kondensatora

- Mieszane połączenie kondensatorów \Leftrightarrow układ utworzony z kondensatorów połączonych szeregowo, równoległe, mostkowo oraz zwartych kondensatorów.



- Szeregowo-równoległe połączenie kondensatorów

- Energia pola elektrycznego w kondensatorze 129
- Energia w kondensatorach połączonych równolegle 131
- Energia w kondensatorach połączonych szeregowo 132

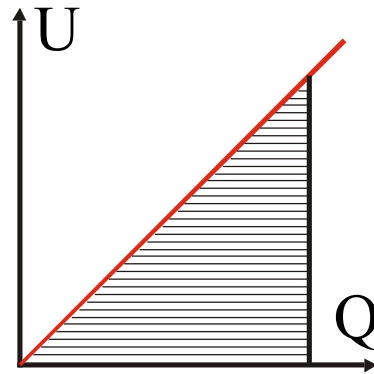
- Energia pola elektrycznego w kondensatorze (W) \Leftrightarrow energia doprowadzona do kondensatora o pojemności (C) podczas jego ładowania.

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2}$$

- Q – ładunek zgromadzony na dodatniej okładce kondensatora
- U – napięcie na okładkach kondensatora

C Energia pola elektrycznego w kondensatorze jest równa pracy, jaką muszą wykonać siły zewnętrzne, aby ładunek z jednej okładki przenieść na drugą.

C Energia ta jest równa co do bezwzględnej wartości ciepłu, jakie wydziela się w oporniku zwierającym kondensator.



- Energia pola elektrycznego w kondensatorze (W) jest równa polu powierzchni pod wykresem (U) od (Q).

- Zależność energii od pojemności w równoległym połączeniu kondensatorów \Leftrightarrow w połączeniu równoległym kondensatorów, ze względu na równość napięć (U) między okładkami, więcej energii (W) gromadzi się w kondensatorze o większej pojemności (C).

$$W = \frac{CU^2}{2}, \quad U = \text{const}, \quad W \sim C$$

U Całkowita energia układu kondensatorów jest równa sumie energii zgromadzonych w poszczególnych kondensatorach układu.

- Zależność energii od pojemności w szeregowym połączeniu kondensatorów \Leftrightarrow w połączeniu szeregowym kondensatorów, ze względu na równość ładunków (Q) na okładkach, więcej energii (W) gromadzi się w kondensatorze o mniejszej pojemności (C).

$$W = \frac{Q^2}{2C}, \quad Q = \text{const}, \quad W \sim \frac{1}{C}$$

U Całkowita energia układu kondensatorów jest równa sumie energii zgromadzonych w poszczególnych kondensatorach układu.

- Naładowany kondensator ze źródłem 134
- Naładowany kondensator bez źródła 135

-
- Naładowany kondensator ze źródłem \Leftrightarrow kondensator, który po naładowaniu pozostawiono ze źródłem stałego napięcia. Kondensator w tym stanie charakteryzuje się stałością napięcia między jego okładkami ($U = \text{const}$).

- Naładowany kondensator bez źródła \Leftrightarrow kondensator, który po naładowaniu odłączono od źródła stałego napięcia. Kondensator w tym stanie charakteryzuje się stałością bezwzględnej wartości ładunku na każdej okładce ($|Q| = \text{const}$).

Prąd stały

dr Zbigniew Osiak

Rysunki wykonała

Małgorzata Osiak

- Prąd elektryczny 138
- Prawo Ohma 145
- Zależność oporu właściwego od temperatury 159
- Prawo Joule'a-Lenza 166
- Elektroliza 171
- Elektroforeza 183
- Zjawiska termoelektryczne 186

- Prąd elektryczny 139
- Nośniki prądu elektrycznego 140
- Gaz elektronowy 141
- Natężenie prądu elektrycznego 142
- Napięcie elektryczne 143
- Prąd stały 144

• Prąd elektryczny \Leftrightarrow uporządkowany ruch ładunków elektrycznych w ośrodkach przewodzących pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego.

U Kierunek przepływu prądu elektrycznego przyjęto umownie oznaczać strzałką skierowaną od punktu przewodnika o potencjale wyższym do punktu przewodnika o potencjale niższym. Tak określony kierunek prądu zgadza się z kierunkiem ruchu dodatnich nośników prądu. Ujemne nośniki prądu poruszają się w kierunku przeciwnym do umownego kierunku prądu.

- Nośniki prądu elektrycznego

Ośrodek przewodzący	Nośniki prądu
metale, stopy metali, węgiel	elektrony
półprzewodniki	elektrony i dziury elektronowe
elektrolity	jony ujemne i dodatnie
gazy	jony ujemne i dodatnie oraz elektrony

- Gaz elektronowy \Leftrightarrow swobodne elektrony w metalach lub półprzewodnikach, poruszające się chaotycznie między dodatnimi jonami znajdującymi się w węzłach sieci krystalicznej.

H Pojęcie gazu elektronowego zaproponował Drude w 1900.

B Paul Karl Ludwig Drude (1863-1906), niemiecki fizyk.

- Natężenie prądu elektrycznego (I) \Leftrightarrow wielkość skalarna będąca stosunkiem ładunku (Q) przepływającego przez poprzeczny przekrój przewodnika do czasu (t) tego przepływu.

$$I = \frac{Q}{t}, \quad [I] = \frac{C}{s} = A$$

P Jeżeli w przewodniku płynie prąd o natężeniu jednego ampera, to przez przekrój poprzeczny tego przewodnika w czasie jednej sekundy przepływa $6,25 \cdot 10^{18}$ elektronów.

- Napięcie elektryczne \Leftrightarrow wielkość skalarna określona jako różnica potencjałów elektrycznych (φ_A) i (φ_B) między dwoma punktami (A) i (B).

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B, \quad [U_{AB}] = V$$

- Prąd stały \Leftrightarrow prąd, którego natężenie jest stałe w czasie.

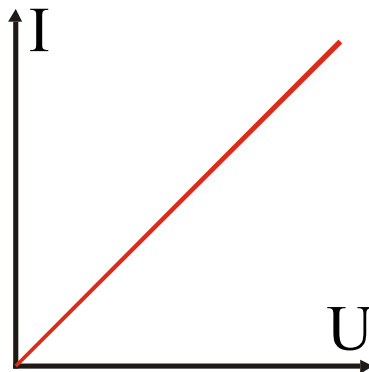
- Charakterystyka prądowo-napięciowa 146
- Prawo Ohma 147
- Opór elektryczny 149
- Zależność oporu od długości, przekroju i rodzaju materiału 150
- Opór elektryczny właściwy 151
- Przewodniki 152
- Półprzewodniki 153
- Izolatory (dielektryki) 154
- Przewodnictwo elektryczne 155
- Przewodnictwo elektryczne właściwe 156
- Gęstość prądu elektrycznego 157
- Prawo Ohma w postaci lokalnej 158

-
- Charakterystyka prądowo-napięciowa \Leftrightarrow zależność natężenia prądu elektrycznego płynącego przez przewodnik lub element przewodzący prąd od napięcia elektrycznego powodującego ten przepływ.

- Prawo Ohma \Leftrightarrow prawo głośzące, że natężenie (I) prądu elektrycznego przepływającego przez przewodnik jest wprost proporcjonalne do napięcia elektrycznego (U) na końcach tego przewodnika.

$$I = \frac{1}{R} U$$

- R – opór elektryczny



- Wykres zależności natężenia (I), prądu przepływającego przez przewodnik, od napięcia (U) panującego na jego końcach

- Prawo Ohma można też zapisać w postaci przydatnej w termodynamice.

$$J_q = \frac{df}{S dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{d\phi}{dx}$$

- J_q – współrzędna strumienia ładunku (współrzędna gęstości prądu)
- $d\phi/dx$ – współrzędna gradientu potencjału elektrycznego
- ρ – opór elektryczny właściwy

H Prawo Ohma zostało sformułowane przez niego w 1826.

B Georg Simon Ohm (1787-1854), niemiecki fizyk.

- Opór elektryczny (R) \Leftrightarrow wielkość skalarna będąca stosunkiem napięcia elektrycznego (U) między końcami opornika do natężenia prądu [I] płynącego przez opornik.

$$R = \frac{U}{I}, \quad [R] = \frac{V}{A} = \Omega$$

- Jednostką oporu elektrycznego w układzie SI jest om [Ω].

U Dla danego opornika:

$$R = \text{const}, \quad I \sim U$$

Zależność oporu od długości, przekroju i rodzaju materiału 150

- Zależność oporu od długości (l), pola powierzchni (S) przekroju poprzecznego oraz rodzaju materiału przewodnika metalowego przedstawia wzór:

$$R = \frac{\rho l}{S}, \quad [\rho] = \Omega \cdot \text{m}$$

- ρ – opór elektryczny właściwy lub rezystywność

- Opór elektryczny właściwy \Leftrightarrow wielkość skalarna, mierzona w omometrach, będąca stosunkiem iloczynu oporu elektrycznego (R) jednorodnego opornika cylindrycznego i jego pola powierzchni (S) przekroju poprzecznego do długości (l) tego opornika.

$$\rho = \frac{RS}{l}, \quad [\rho] = \Omega \cdot \text{m}$$

- Opór elektryczny właściwy nazywany jest też rezystywnością.

- Przewodniki \Leftrightarrow substancje o małym oporze elektrycznym właściwym (ρ).

$$\rho < 10^{-6} \Omega\text{m}$$

- Półprzewodniki \Leftrightarrow substancje o oporze elektrycznym właściwym (ρ) większym niż przewodników a mniejszym niż dielektryków.

$$10^{-6} \Omega\text{m} < \rho < 10^8 \Omega\text{m}$$

- Izolatory \Leftrightarrow materiały praktycznie nieprzewodzące prądu elektrycznego, zwane inaczej dielektrykami, o oporze elektrycznym właściwym większym od $10^8 \Omega\text{m}$. Wielkością charakteryzującą dany izolator jest jego stała dielektryczna. W pasmowym modelu ciała stałego izolatorom odpowiada szerokość pasma wzbronionego większa od 5 eV.

$$\rho > 10^8 \Omega\text{m}$$

- Przewodnictwo elektryczne (G) \Leftrightarrow wielkość skalarna nazywana także konduktancją, będąca odwrotnością oporu elektrycznego (R).

$$G = \frac{1}{R}, \quad [G] = \frac{1}{\Omega} = \frac{A}{V} = S = \text{simens}$$

C Nazwa simens pochodzi od nazwiska Siemens.

B Ernst Werner von Siemens (1816-1892), niemiecki inżynier, przemysłowiec i wynalazca.

- Przewodnictwo elektryczne właściwe (γ) \Leftrightarrow wielkość skalarna nazywana także konduktywnością, będąca odwrotnością oporu elektrycznego właściwego (ρ).

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \quad [\gamma] = \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} = \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

- Gęstość prądu elektrycznego (\mathbf{j}) \Leftrightarrow wielkość wektorowa, której wartość (j) jest stosunkiem natężenia prądu (I) do pola powierzchni (S) przekroju poprzecznego przewodnika, na którym to przekroju rozkład prądu jest równomierny.

$$j = \frac{I}{S}, \quad [j] = \frac{A}{m^2}$$

- Kierunek wektora gęstości prądu pokrywa się z kierunkiem prądu elektrycznego.

- Prawo Ohma w postaci lokalnej \Leftrightarrow prawo stanowiące, że lokalna wartość gęstości prądu (\mathbf{j}) płynącego w przewodniku o przewodnictwie elektrycznym właściwym (γ) jest wprost proporcjonalna do lokalnej wartości natężenia pola elektrycznego (\mathbf{E}) w przewodniku. Kierunek i zwrot gęstości prądu (\mathbf{j}) pokrywa się z kierunkiem i zwrotem natężenia pola elektrycznego (\mathbf{E}).

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}$$

B Georg Simon Ohm (1787-1854), niemiecki fizyk.

- Zależność oporu właściwego od temperatury 160
- Współczynnik temperaturowy oporu właściwego 162
- Nadprzewodnictwo 163
- Prawo Wiedemanna-Franza-Lorenza 165

- Zależność oporu właściwego od temperatury \Leftrightarrow opór elektryczny właściwy (ρ) dla wielu metali zależy liniowo od temperatury bezwzględnej (T) z pominięciem niskich i wysokich temperatur.

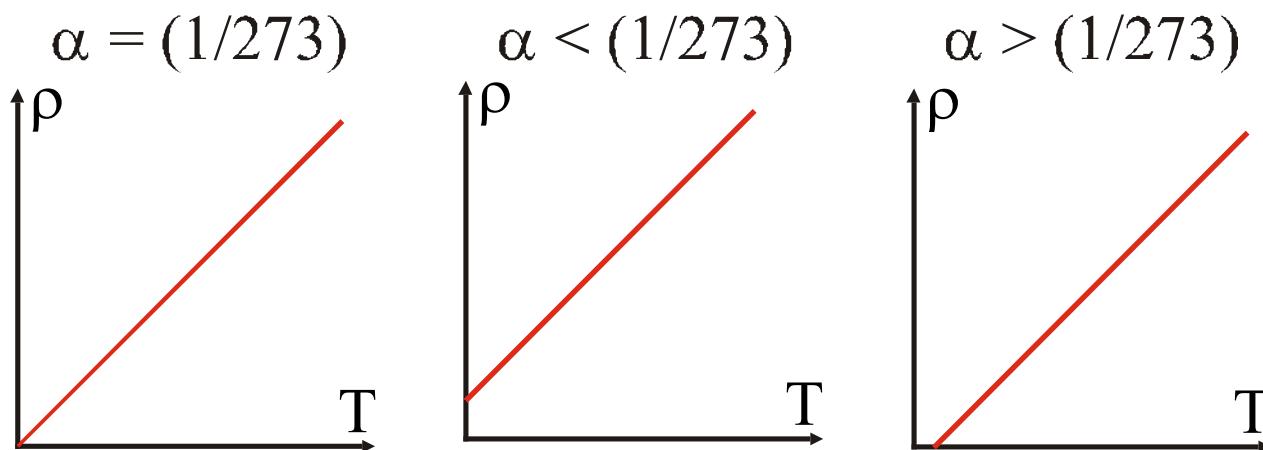
$$\rho = \rho_{273}(1 - 273\alpha) + \rho_{273}\alpha T, \quad [\alpha] = \frac{1}{\text{K}}$$

- α – współczynnik temperaturowy oporu właściwego
- ρ_{273} – opór elektryczny właściwy w temperaturze 273 K

H Pierwszy termometr oporowy, w którym została wykorzystana zależność oporu od temperatury, skonstruował Siemens w 1871.

B Ernst Werner von Siemens (1816-1892), niemiecki inżynier, przemysłowiec i wynalazca.

- Wykres zależności oporu właściwego metalu (ρ) od temperatury bezwzględnej (T), gdy $\alpha = 1/273$, $\alpha < 1/273$, $\alpha > 1/273$.



- Współczynnik temperaturowy oporu właściwego (α) \Leftrightarrow współczynnik wyznaczany doświadczalnie podczas badania zależności oporu właściwego od temperatury.

$$\alpha = \frac{1}{\rho_{273}} \cdot \frac{\rho - \rho_{273}}{T - 273}$$

- ρ_{273} – opór elektryczny właściwy w temperaturze 273 K
- ρ – opór elektryczny właściwy w danej temperaturze
- T – temperatura bezwzględna

• Nadprzewodnictwo \Leftrightarrow zjawisko polegające na gwałtownym zaniku oporu elektrycznego i względnej przenikalności magnetycznej niektórych metali i stopów w bardzo niskich temperaturach bezwzględnych, nazywanych temperaturami krytycznymi. Metale wykazujące nadprzewodnictwo noszą nazwę nadprzewodników.

H Nadprzewodnictwo rtęci odkrył Kamerlingh-Onnes w 1911.

H Fenomenologiczną teorię nadprzewodnictwa podali Ginzburg i Landau w 1950.

H Mikroskopową teorię nadprzewodnictwa sformułowali niezależnie od siebie Bardeen, Cooper i Schrieffer w 1957. Nazywana jest ona teorią BCS.

B Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926), holenderski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1913.

B Witalij Lazarewicz Ginzburg (1916-2009), rosyjski fizyk teoretyk i astrofizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2003.

B Lew Dawidowicz Landau (1908-1968), radziecki (rosyjski) fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1962.

B John Bardeen (1908-1991), amerykański fizyk, dwukrotny laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1956 oraz 1972.

B Leon Neil Cooper (ur. 1930), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1972.

B John Robert Schrieffer (ur. 1931), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1972.

- Prawo Wiedemanna-Franza-Lorenza \Leftrightarrow prawo stanowiące, że stosunek współczynnika przewodnictwa cieplnego (L_Q) do przewodnictwa elektrycznego właściwego (γ) jest dla wszystkich metali wprost proporcjonalny do temperatury bezwzględnej (T).

$$\frac{L_Q}{\gamma} = LT$$

- $L = 3k^2/e^2 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2$ – liczba Lorenza
- k – stała Boltzmannna • e – elementarny ładunek elektryczny

H Prawo to zostało ogłoszone przez Wiedemanna i Franza w 1853 i rozszerzone w 1872 przez Lorenza.

B Gustav Heinrich Wiedemann (1826-1899), niemiecki fizyk.

B Rudolph Franz (1826-1902), niemiecki fizyk.

B Ludvig Valentin Lorenz (1829-1891), duński matematyk i fizyk.

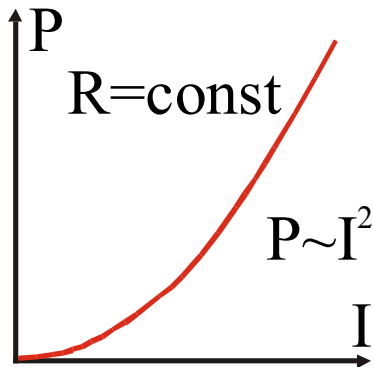
- Moc prądu stałego 167
- Prawo Joule'a-Lenza 169
- Prawo Joule'a-Lenza w postaci lokalnej 170

- Moc prądu stałego (P) \Leftrightarrow moc ciepła wydzielonego podczas przepływu prądu elektrycznego o natężeniu (I) przez przewodnik o oporze (R) pod wpływem napięcia (U).

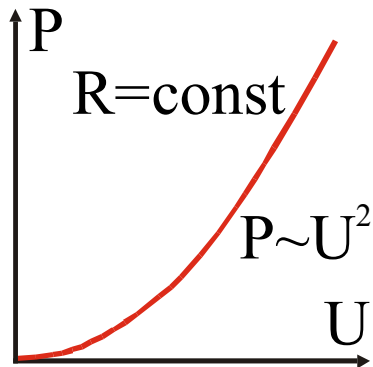
$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} = IU, \quad [P] = W$$

- Ciepło (Q) wydzielone w czasie (t) można obliczyć ze wzoru:

$$Q = Pt, \quad [Q] = J$$



- Wykres zależności mocy (P), ciepła wydzielonego w oporniku, od natężenia prądu (I) przepływającego przez ten opornik



- Wykres zależności mocy (P), ciepła wydzielonego w oporniku, od napięcia (U) panującego na końcach tego opornika

- Prawo Joule'a-Lenza \Leftrightarrow prawo dotyczące ciepła (Q) wydzielonego podczas przepływu stałego prądu elektrycznego o natężeniu (I) przez przewodnik o oporze (R).

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

- t – czas przepływu prądu przez opornik

B James Prescott Joule (1818-1889), brytyjski fizyk.

B Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865), rosyjski fizyk pochodzenia niemieckiego.

- Prawo Joule'a-Lenza w postaci lokalnej \Leftrightarrow prawo stanowiące, że lokalna wartość gęstości mocy (ω) ciepła wydzielonego w przewodniku o przewodnictwie elektrycznym właściwym (γ) jest wprost proporcjonalna do kwadratu lokalnej wartości natężenia pola elektrycznego (E) w przewodniku.

$$\omega = \gamma \cdot E^2$$

- ω – gęstość mocy ciepła wydzielonego w przewodniku
- ω – stosunek mocy wydzielonego ciepła do objętości, w której się ona wydzielila

- Jon 172
- Aniony 173
- Kationy 174
- Dysocjacja elektrolityczna 175
- Elektrolity 176
- Elektroda 177
- Anoda 178
- Katoda 179
- Elektroliza 180
- Prawa elektrolizy Faradaya 181

-
- Jon \Leftrightarrow atom lub cząsteczka o niezerowym ładunku elektrycznym.

-
- Aniony \Leftrightarrow ujemne jony, atomy lub cząsteczki posiadające nadmiar elektronów.

-
- Kationy \Leftrightarrow dodatnie jony, atomy lub cząsteczki mające niedomiar elektronów.

• Dysocjacja elektrolityczna \Leftrightarrow rozpad cząsteczek związków chemicznych na jony podczas ich rozpuszczania w wodzie lub innym rozpuszczalniku.

H Dysocjacja elektrolityczna została odkryta przez Arrheniusa w 1887.

B Svante August Arrhenius (1859-1927), szwedzki fizykochemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1903.

-
- Elektrolity \Leftrightarrow zdysocjowane roztwory soli, kwasów i zasad oraz roztopione kryształy jonowe. Elektrolity przewodzą prąd elektryczny.

-
- Elektroda \Leftrightarrow przewodnik elektryczny, który emituje (oddaje) lub absorbuje (pobiera) elektrony albo steruje ich ruchem.

- Anoda \Leftrightarrow dodatnia elektroda.

- Katoda \Leftrightarrow ujemna elektroda.

- Elektroliza \Leftrightarrow zespół zjawisk związanych z przepływem prądu elektrycznego przez elektrolit.

- Prawa elektrolizy Faradaya \Leftrightarrow dwa prawa odkryte przez Faradaya, opisujące ilościowo elektrolizę.
- Pierwsze prawo głosi, że masa (m) substancji wydzielonej z elektrolitu na elektrodzie jest wprost proporcjonalna do natężenia (I) prądu stałego przepływającego przez elektrolit i czasu (t) jego przepływu.

$$m = kIt, \quad [k] = \frac{\text{kg}}{\text{C}}$$

- k – równoważnik elektrochemiczny

- Drugie prawo stwierdza, że równoważnik elektrochemiczny (k) substancji wydzielonej z elektrolitu jest wprost proporcjonalny do jej równoważnika chemicznego, będącego stosunkiem masy molowej (μ) jonu do jego wartościowości (z).

$$k = \frac{1}{F} \frac{\mu}{z}, \quad [\mu] = \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

- $F = 9,649 \cdot 10^7 \text{ C/kmol}$ – stała Faradaya

B Michael Faraday (1791-1867), brytyjski [angielski] fizyk i chemik.

- Ruchliwość 184
- Elektroforeza 185

- Ruchliwość (u) \Leftrightarrow wielkość skalarna będąca stosunkiem wartości prędkości (v) jonu lub innego nośnika ładunku poruszającego się w ośrodku w stałym polu elektrycznym do wartości (E) tego natężenia.

$$u = \frac{v}{E}, \quad [u] = \frac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

-
- Elektroforeza \Leftrightarrow zjawisko polegające na ruchu naładowanych cząsteczek zawiesiny w cieczy pod wpływem pola elektrycznego.

- Zjawisko Seebecka 187
- Termopara 188
- Zjawisko Peltiera 189
- Zjawisko Thomsona 190

- Zjawisko Seebecka \Leftrightarrow zjawisko odkryte przez Seebecka w 1821, polegające na powstawaniu siły elektromotorycznej powodującej przepływ prądu elektrycznego w zamkniętym obwodzie utworzonym z dwóch przewodów wykonanych z różnych metali, których styki mają różne temperatury.

B Thomas Johann Seebeck (1770-1831), estońsko-niemiecki fizyk.

• Termopara \Leftrightarrow zwana też termoogniwem, jest obwodem składającym się z dwóch przewodów wykonanych z różnych metali, których spójnia utrzymywane są w różnych temperaturach. Zgodnie ze zjawiskiem Seebecka w obwodzie tym powstaje siła elektromotoryczna proporcjonalna do różnicy temperatur spójń.

H Termopara została po raz pierwszy wykorzystana jako termometr przez Regnaulta w 1855.

B Thomas Johann Seebeck (1770-1831), estońsko-niemiecki fizyk.

B Henri Victor Regnault (1800-1878), francuski fizyk i chemik.

- Zjawisko Peltiera \Leftrightarrow zjawisko odkryte przez Peltiera w 1834, polegające na tym, że przepływ prądu elektrycznego w zamkniętym obwodzie utworzonym z dwóch przewodów wykonanych z różnych metali powoduje powstanie różnicy temperatur między stykami tych metali. Od kierunku przepływu prądu zależy, który styk pobiera, a który oddaje ciepło.

B Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845), francuski fizyk.

- Zjawisko Thomsona \Leftrightarrow zjawisko odkryte przez Thomsona w 1856, polegające na tym, że jednorodny przewodnik wydziela (pochłania) ciepło wskutek utrzymywanych na jego końcach różnic potencjałów elektrycznych i temperatur.

B Sir William Thomson [Lord Kelvin of Largs] (1824-1907), brytyjski fizyk.

Obwody prądu stałego

dr Zbigniew Osiak

Rysunki wykonała

Małgorzata Osiak

-
- Elementy obwodów elektrycznych 193
 - Obwody jednooczkowe 202
 - Prawa Kirchhoffa 209
 - Połączenia oporników 213
 - Moc ciepła wydzielanego w opornikach 224
 - Połączenia źródeł napięcia 227
 - Potencjometr 234
 - Pomiar napięcia 237
 - Pomiar natężenia prądu 245
 - Pomiar oporu elektrycznego 250
 - Układ zastępczy 255

- Opornik 194
- Źródło napięcia 195
- Siła elektromotoryczna 197
- Opór wewnętrzny 198
- Węzeł 199
- Gałąź 200
- Oczko 201

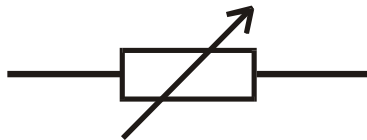
- Opornik \Leftrightarrow dwukońcówkowy element obwodów elektrycznych będący przewodnikiem o oporze najczęściej rzędu kiloomów lub megaomów.



• Opornik



• Symbol opornika



• Symbol opornika o regulowanym oporze

- Źródło napięcia \Leftrightarrow dwuzaciskowy element elektroniczny wymuszający przepływ prądu elektrycznego w obwodzie zamkniętym. Podstawowymi parametrami źródła napięcia stałego są jego siła elektromotoryczna (\mathcal{E}) oraz opór wewnętrzny (R_w). Napięcie (U) na biegunach obciążonego źródła rzeczywistego jest mniejsze od siły elektromotorycznej.

$$U = \mathcal{E} - IR_w$$

- I – natężenie prądu pobieranego ze źródła
- Opór wewnętrzny idealnego źródła napięcia stałego jest równy zero, a napięcie na jego biegunach jest zawsze równe sile elektromotorycznej.

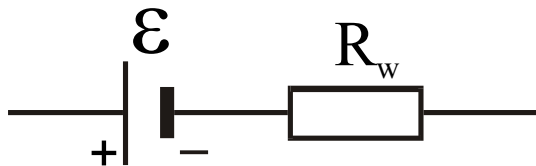
$$R_w = 0, \quad U = \mathcal{E}$$

P Powszechnie używanym źródłem napięcia stałego jest suche ogniwo wynalezione przez Leclanchého w 1866. Siła elektromotoryczna tego ogniwa wynosi około 1,5 V.

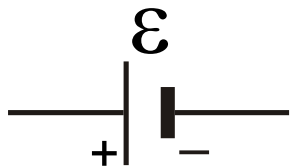
B Georges Leclanché (1839-1882), francuski inżynier i wynalazca.



- Źródło napięcia o sile elektromotorycznej 4,5 V

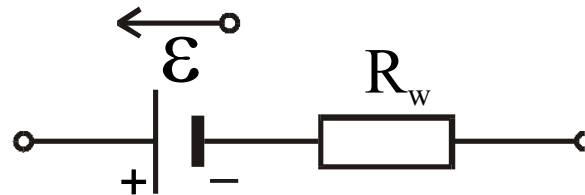


- Symbol rzeczywistego źródła napięcia o sile elektromotorycznej (\mathcal{E}) i oporze wewnętrznym (R_w)



- Symbol idealnego źródła napięcia o sile elektromotorycznej (\mathcal{E})

- Siła elektromotoryczna (\mathcal{E} , SEM) \Leftrightarrow różnica potencjałów elektrycznych (napięcie elektryczne) na biegunach nieobciążonego źródła.



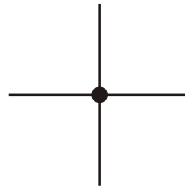
- Symbol źródła o stałej sile elektromotorycznej (\mathcal{E}) i oporze wewnętrznym (R_w); strzałka oznacza umowny kierunek siły elektromotorycznej źródła.

- Opór wewnętrzny (R_w) \Leftrightarrow wielkość skalarna charakteryzująca dane źródło napięcia o sile elektromotorycznej (\mathcal{E}).

$$R_w = \frac{\mathcal{E} - U}{I}, \quad [R_w] = \Omega$$

- U – napięcie elektryczne na biegunach obciążonego źródła
- I – natężenie prądu dostarczanego przez źródło

- Węzeł \Leftrightarrow punkt obwodu elektrycznego, w którym spotykają się co najmniej trzy elementy (gałęzie) obwodu.

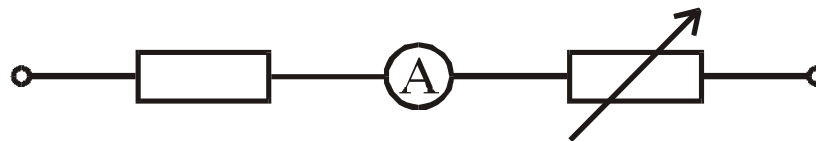


• Symbol węzła

- Gałąź \Leftrightarrow jeden lub kilka elementów obwodu elektrycznego połączonych względem siebie szeregowo. Natężenie prądu płynącego przez każdy element gałęzi jest takie samo. Na początku i końcu gałęzi znajdują się zaciski. Gałęzie obwodu dzielimy na pasywne i aktywne. Gałęzią pasywną nazywamy gałąź niezawierającą źródeł napięcia, a gałęzią aktywną – gałąź zawierającą źródło napięcia.

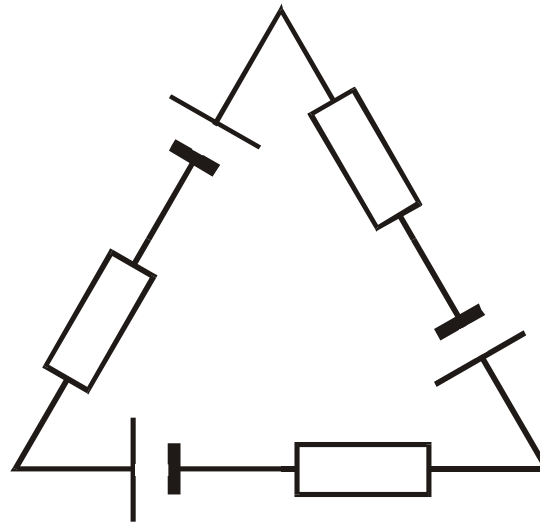


• Gałąź aktywna



• Gałąź pasywna

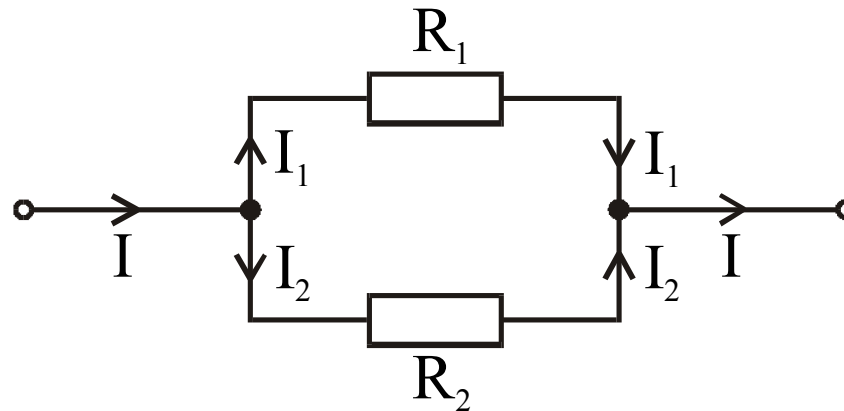
- Oczko \Leftrightarrow fragment obwodu elektrycznego bez rozgałęzień, tworzący zamkniętą drogę dla przepływu prądu elektrycznego.



- Przykład oczka

- Obwód jednooczkowy bez źródła 203
- Obwód jednooczkowy z jednym źródłem 205
- Wykresy zmienności potencjałów w oczku 207

- Obwód jednooczkowy bez źródła \Leftrightarrow oczko będące fragmentem większego obwodu, składające się z dwóch połączonych równolegle oporników o oporach (R_1) oraz (R_2), przez które płyną prądy o natężeniach (I_1) oraz (I_2). W pozostałej części obwodu musi znajdować się źródło napięcia.



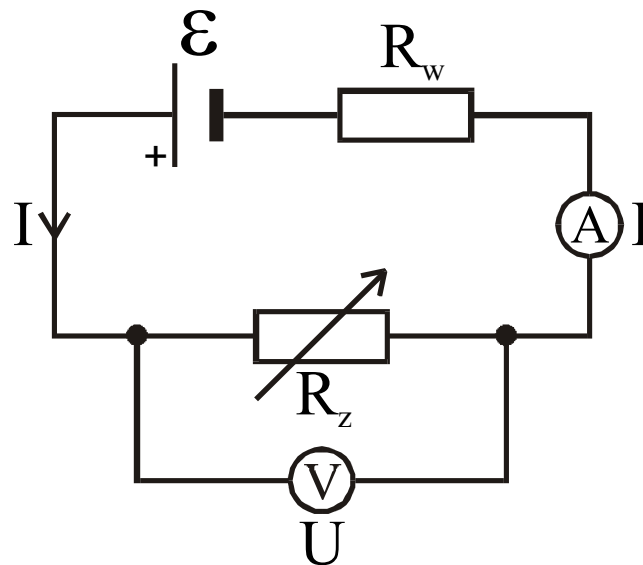
- Obwód jednooczkowy bez źródła

- Wielkości opisujące stan obwodu jednooczkowego powiązane są zależnościami:

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 \\ I_1 R_1 &= I_2 R_2 \end{aligned}$$

- I – natężenie prądu wpływającego do (wypływającego z) węzła

- Obwód jednooczkowy z jednym źródłem \Leftrightarrow oczko składające się ze źródła napięcia, o sile elektromotorycznej (\mathcal{E}) i oporze wewnętrznym (R_w), obciążonego odbiornikiem o regulowanym oporze (R_z).

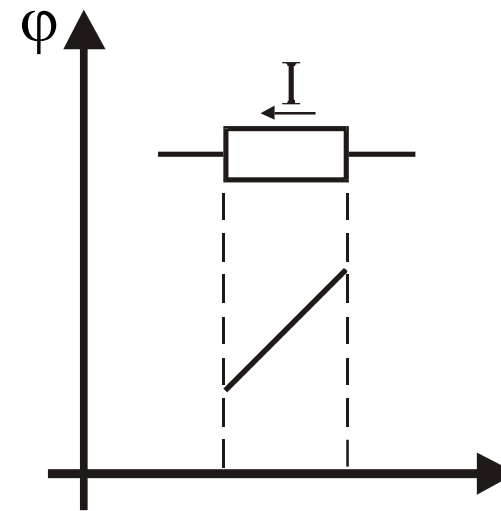
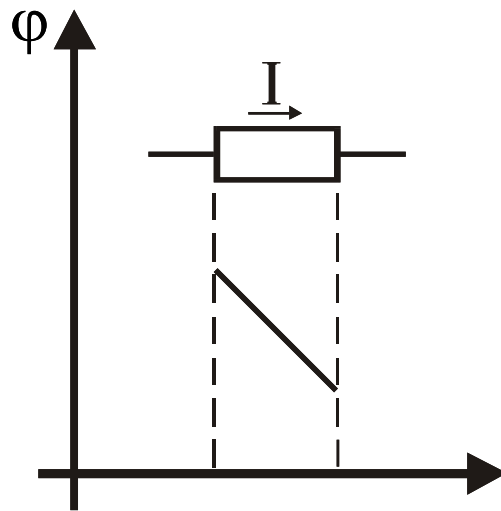
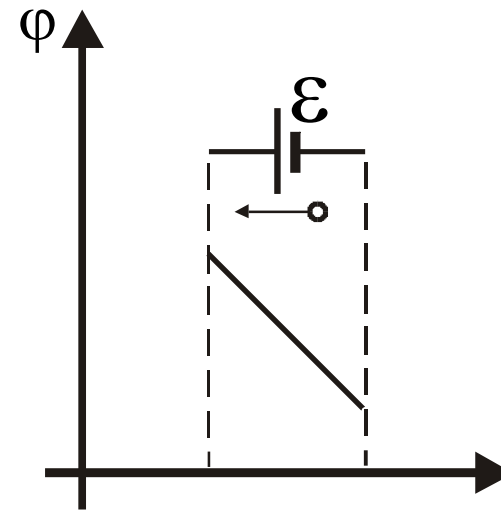
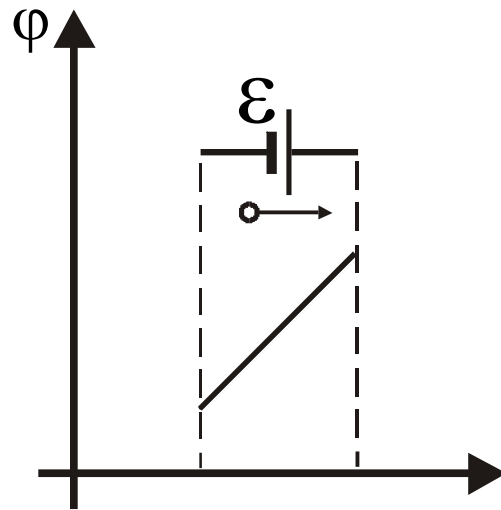


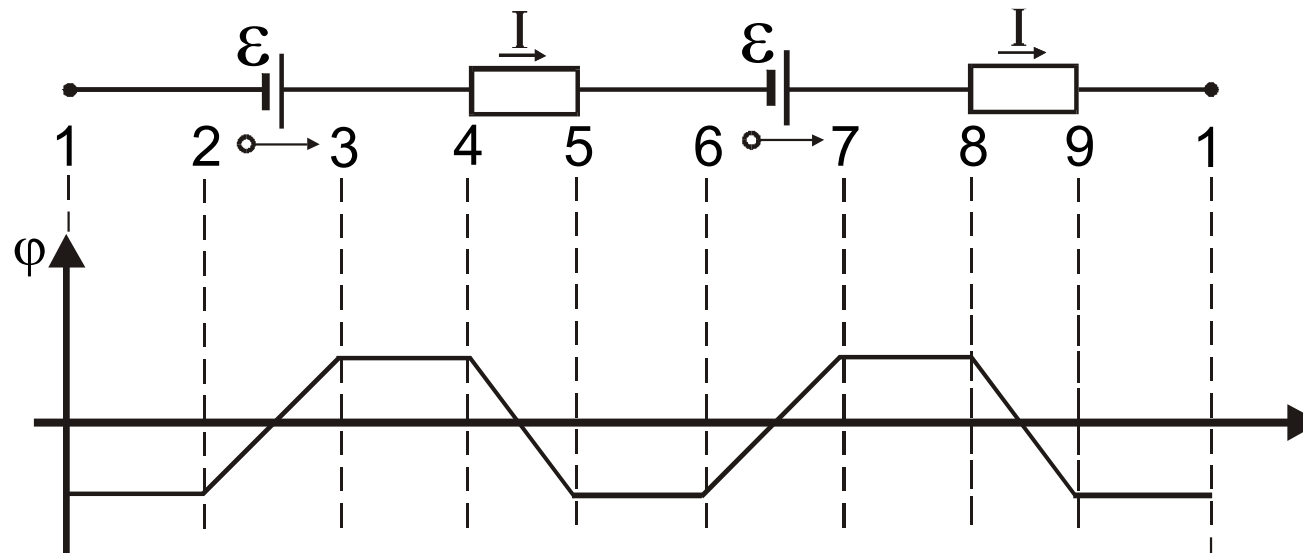
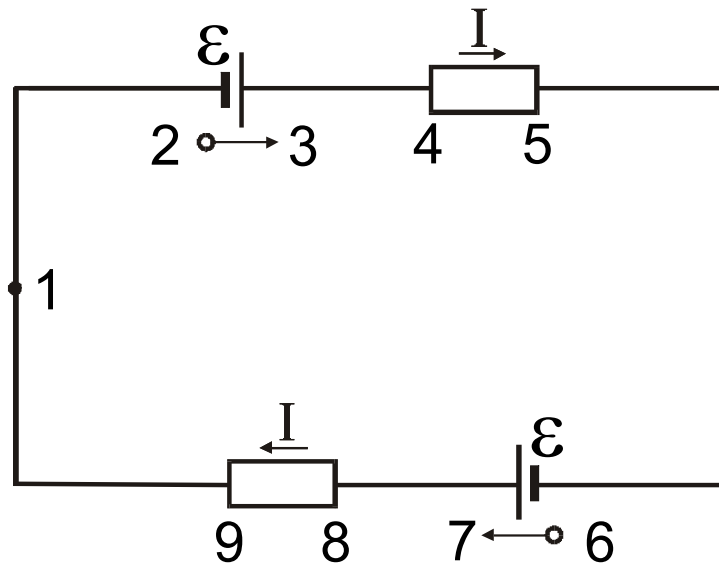
- Obwód jednooczkowy z jednym źródłem

- Wielkości opisujące stan tego obwodu powiązane są zależnościami:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_w + R_z}$$
$$U = IR_z$$
$$P_w = I^2 R_w$$
$$P_z = I^2 R_z$$

- I – natężenie prądu płynącego w obwodzie
- U – napięcie elektryczne na odbiorniku (na biegunach źródła napięcia)
- P_w – moc ciepła wydzielonego w źródle
- P_z – moc ciepła wydzielonego w odbiorniku





- Prawa Kirchhoffa 210
- Obliczanie różnicy potencjałów 212

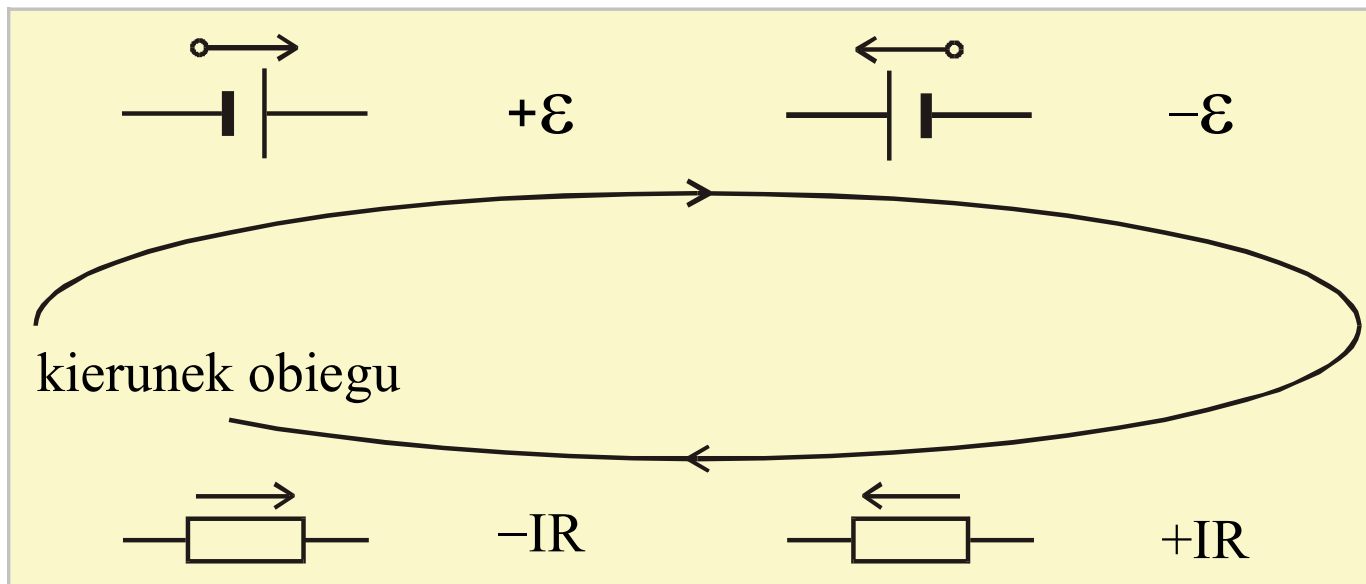
- Prawa Kirchhoffa \Leftrightarrow dwa prawa umożliwiające analizę złożonych obwodów składających się z dowolnej liczby węzłów, gałęzi, oczek, oporników i źródeł.
- Pierwsze prawo Kirchhoffa głosi, że dla każdego węzła obwodu suma natężeń prądów wpływających do węzła jest równa sumie natężeń prądów wypływających z węzła.
- Drugie prawo Kirchhoffa stanowi, że dla każdego oczka obwodu suma wszystkich sił elektromotorycznych (\mathcal{E}_i) wziętych z odpowiednimi znakami jest równa sumie wszystkich iloczynów ($I_k R_k$) wziętych z odpowiednimi znakami.

$$\sum_i \mathcal{E}_i = \sum_k I_k R_k$$

H Prawa te zostały podane przez Kirchhoffa w 1845.

B Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), niemiecki fizyk.

- Drugie prawo Kirchhoffa wymaga przyjęcia następującej konwencji znakowej:
- Obieramy kierunek obchodzenia oczka.
- Gdy przechodzimy przez źródło w kierunku SEM, to piszemy $(+\mathcal{E})$, w przypadku przeciwnym piszemy $(-\mathcal{E})$.
- Gdy przechodzimy przez opornik w kierunku płynięcia prądu, to piszemy $(+IR)$, w przypadku przeciwnym piszemy $(-IR)$.



- Obliczanie różnicy potencjałów \Leftrightarrow różnica potencjałów w punktach A i B należących do danego oczka jest równa sumie wszystkich iloczynów $I_k R_k$, wziętych z odpowiednimi znakami, napotkanych na drodze od A do B, pomniejszonej o sumę wszystkich sił elektromotorycznych napotkanych na drodze od A do B, wziętych z odpowiednimi znakami.

$$\varphi_A - \varphi_B = \sum_{A \rightarrow B} I_k R_k - \sum_{A \rightarrow B} \mathcal{E}_i$$

$A \rightarrow B$ oznacza na drodze od A do B

- Jeden punkt obwodu można uziemić, ponieważ nie wpływa to na wartości prądów w obwodzie. Zgodnie z umową, potencjał uziemionego punktu jest równy zero.

- Opór zastępczy 214
- Szeregowe połączenie oporników 215
- Równoległe połączenie oporników 216
- Zwarty opornik 217
- Mostkowe połączenie oporników 218
- Mieszane połączenie oporników 219
- Połączenie oporników w trójkąt 220
- Połączenie oporników w gwiazdę 221
- Transformacja trójkąta w gwiazdę 222
- Transformacja gwiazdy w trójkąt 223

-
- Opór zastępczy \Leftrightarrow opór elektryczny opornika, którym można zastąpić układ oporników.

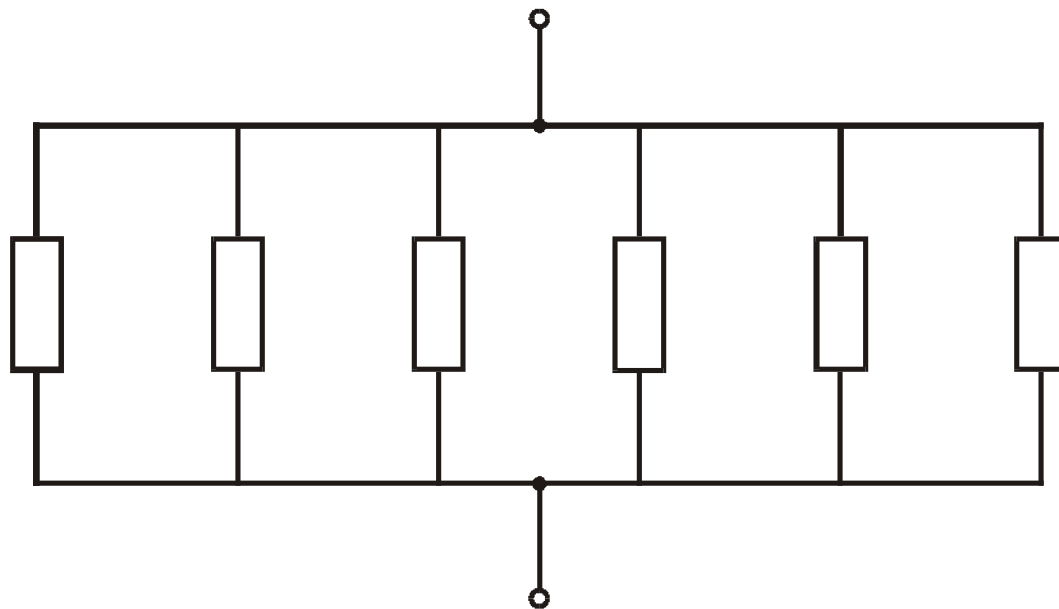
- Szeregowe połączenie oporników \Leftrightarrow układ oporników, w którym prawa końcówka pierwszego opornika jest połączona z lewą końcówką drugiego opornika, prawa końcówka drugiego opornika jest połączona z lewą końcówką trzeciego opornika itd. Końcówkami tego układu są lewa końcówka pierwszego opornika oraz prawa końcówka ostatniego opornika. W połączeniu szeregowym oporników natężenie prądu płynącego przez każdy opornik jest takie samo, a opór zastępczy jest równy sumie oporów poszczególnych oporników.

$$R_{\text{zast}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$



- Szeregowe połączenie oporników

- Równoległe połączenie oporników \Leftrightarrow układ oporników, w którym połączone ze sobą lewe końcówki wszystkich oporników stanowią wspólną lewą końcówkę, a prawe – prawą. W połączeniu równoległym oporników napięcie na każdym oporniku jest takie samo, a odwrotność oporu zastępczego jest równa sumie odwrotności oporów poszczególnych oporników.



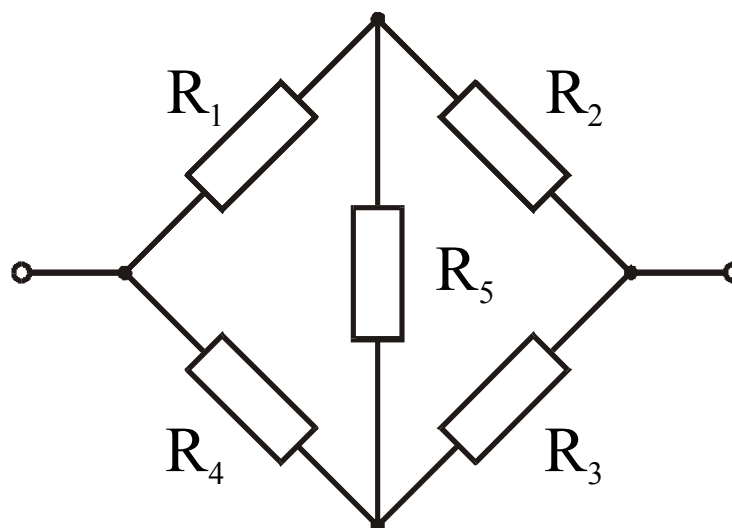
• Równoległe
połączenie
oporników

- Zwarty opornik \Leftrightarrow opornik, którego końcówki połączono metalowym drutem o znikomym oporze elektrycznym ($R \cong 0$). Opór zastępczy zwartego opornika jest praktycznie równy zero.



- Symbol zwartego opornika

- Mostkowe połączenie oporników \Leftrightarrow układ pięciu oporników, połączonych tak jak na rysunku.

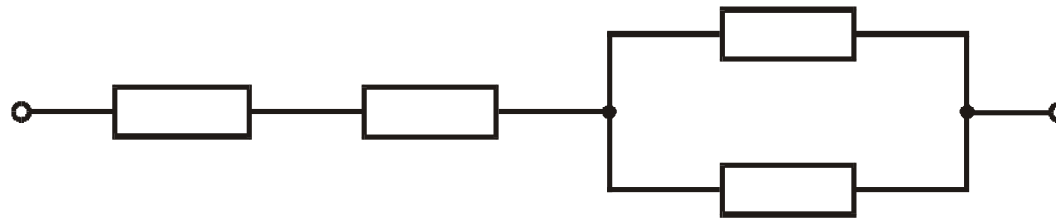


- Mostkowe połączenie oporników

$$R_{zast} = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \Leftrightarrow R_1 R_3 = R_2 R_4$$

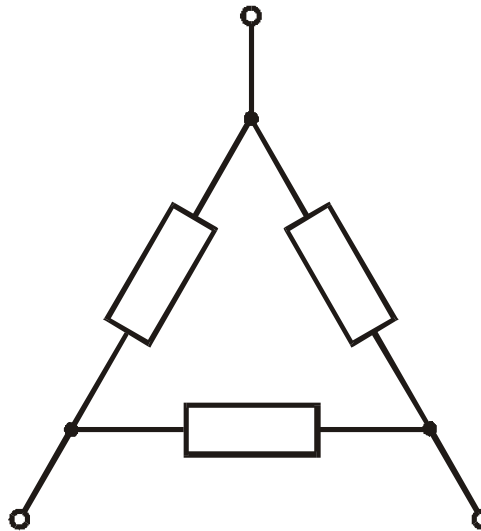
W pozostałych przypadkach wzór na opór zastępczy jest bardzo skomplikowany.

- Mieszane połączenie oporników \Leftrightarrow układ utworzony z oporników połączonych szeregowo, równoległe, mostkowo oraz zwartych oporników.



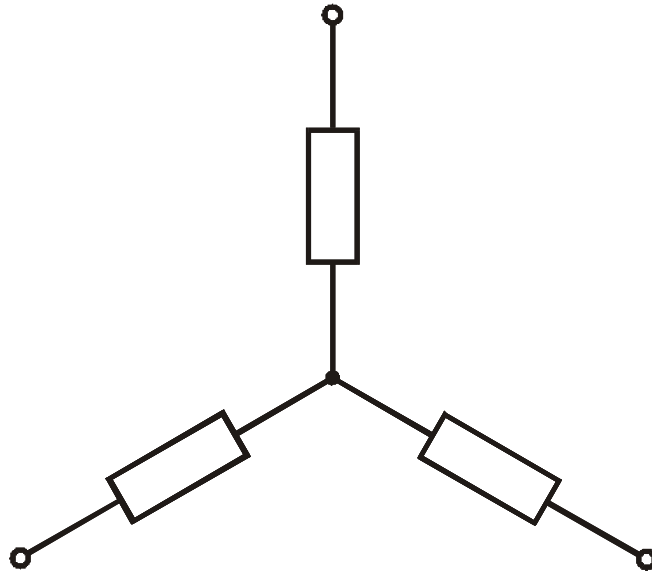
- Szeregowo-równoległe połączenie oporników

- Połączenie oporników w trójkąt \Leftrightarrow układ trzech oporników połączonych tak jak na rysunku.



- Połączenie oporników w trójkąt

- Połączenie oporników w gwiazdę \Leftrightarrow układ trzech oporników połączonych tak jak na rysunku.



- Połączenie oporników w gwiazdę

- Transformacja trójkąta w gwiazdę \Leftrightarrow wyznaczanie oporów w połączeniu oporników w gwiazdę, gdy dane są opory w połączeniu oporników w trójkąt. Opór danej gałęzi gwiazdy jest równy iloczynowi oporów dwóch gałęzi trójkąta, spotykających się w węźle należącym do danej gałęzi gwiazdy, podzielonemu przez sumę oporów wszystkich gałęzi trójkąta.

H Reguła zamiany trójkąta w gwiazdę została podana przez Kennelly'ego.

B Arthur Edwin Kennelly (1861-1939), amerykański inżynier elektryk pochodzenia irlandzkiego.

• Transformacja gwiazdy w trójkąt \Leftrightarrow wyznaczanie oporów w połączeniu oporników w trójkąt, gdy dane są opory w połączeniu oporników w gwiazdę. Opór danej gałęzi trójkąta jest równy sumie oporów dwóch gałęzi gwiazdy, łączących parę węzłów należących do danej gałęzi trójkąta, plus iloczyn tych oporów gwiazdy podzielony przez opór trzeciej gałęzi gwiazdy.

H Reguła zamiany gwiazdy w trójkąt została podana przez Kennelly'ego.

B Arthur Edwin Kennelly (1861-1939), amerykański inżynier elektryk pochodzenia irlandzkiego.

- Zależność mocy od oporu w połączeniu szeregowym oporników 225
- Zależność mocy od oporu w połączeniu równoległym oporników 226

Zależność mocy od oporu w szeregowym połączeniu oporników

- Zależność mocy od oporu w połączeniu szeregowym oporników \Leftrightarrow w połączeniu szeregowym przewodników, ze względu na równość natężeń (I), więcej mocy (P) wydziela się w przewodniku o większym oporze (R).

$$P = I^2 R, \quad I = \text{const}, \quad P \sim R$$

Zależność mocy od oporu w równoległym połączeniu oporników

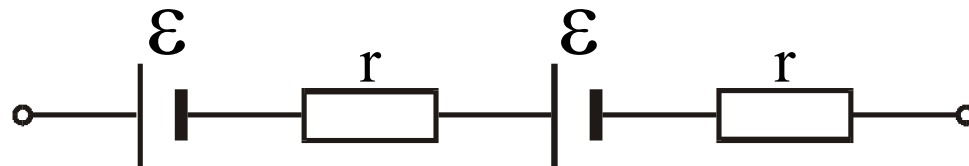
- Zależność mocy od oporu w połączeniu równoległym oporników \Leftrightarrow w połączeniu równoległym przewodników, ze względu na równość napięć (U), więcej mocy (P) wydziela się w przewodniku o mniejszym oporze (R).

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad U = \text{const}, \quad P \sim \frac{1}{R}$$

- Szeregowe połączenie źródeł napięcia 228
- Równoległe połączenie źródeł napięcia 230
- Mieszane połączenie źródeł napięcia 232
- Zwarcie elektryczne 233

- Szeregowe połączenie źródeł napięcia \Leftrightarrow układ źródeł napięcia, w którym dodatni biegun pierwszego źródła jest połączony z ujemnym biegunem drugiego źródła, dodatni biegun drugiego źródła jest połączony z ujemnym biegunem trzeciego źródła itd. Końcówkami tego układu są ujemny biegun pierwszego źródła oraz dodatni biegun ostatniego źródła. W połączeniu szeregowym obciążonych źródeł o zgodnych siłach elektromotorycznych natężenie prądu płynącego przez każde źródło jest takie samo. Siła elektromotoryczna źródła zastępczego jest równa sumie sił elektromotorycznych poszczególnych źródeł. Opór źródła zastępczego jest sumą oporów poszczególnych źródeł.

• Szeregowe
połączenie źródeł
napięcia



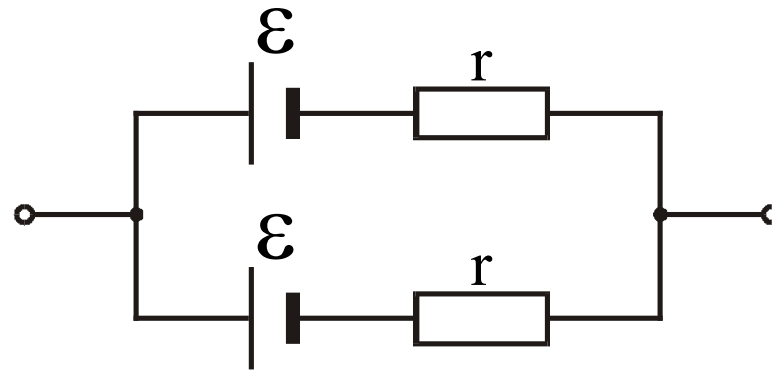
U W przypadku różnych kierunków sił elektromotorycznych poszczególnych źródeł należy pamiętać o konwencji znakowej przyjętej przy omawianiu drugiego prawa Kirchhoffa.

- Równoległe połączenie źródeł napięcia \Leftrightarrow układ źródeł napięcia, w którym połączone ze sobą ujemne bieguny wszystkich źródeł stanowią wspólny ujemny biegun, a dodatnie – dodatni.

W równoległym połączeniu (n) identycznych źródeł, każde o sile elektromotorycznej (\mathcal{E}) i oporze wewnętrznym (r), siła elektromotoryczna ($\mathcal{E}_{\text{zast}}$) i opór wewnętrzny (r_{zast}) źródła zastępczego wynoszą:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{zast}} &= \mathcal{E} \\ r_{\text{zast}} &= \frac{r}{n}\end{aligned}$$

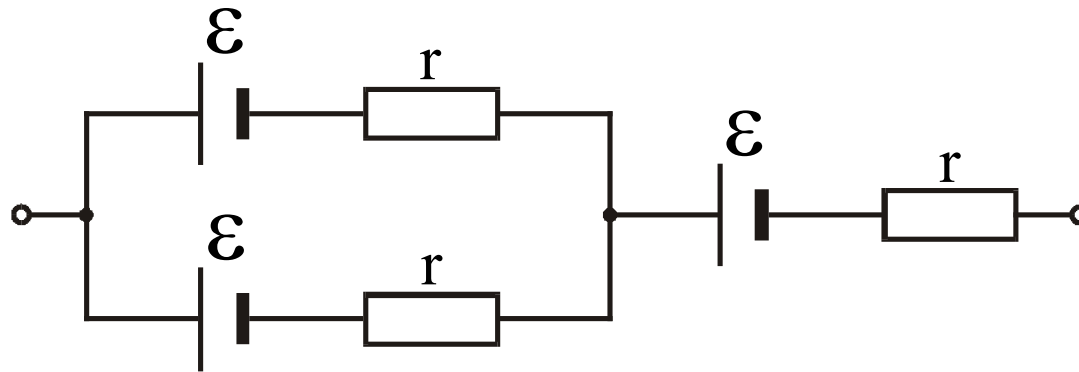
- Połączenie równoległe identycznych źródeł zwiększa sprawność źródła zastępczego.



- Równoległe połączenie źródeł napięcia

U Połączenie równoległe różnych źródeł jest nieekonomiczne, ponieważ źródła rozładują się. Aby tego uniknąć, w praktyce stosuje się połączenia równoległe identycznych źródeł.

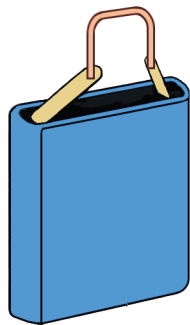
- Mieszane połączenie źródeł napięcia \Leftrightarrow układ utworzony ze źródeł napięcia połączonych szeregowo i równoległe.



- Przykład mieszanego połączenia źródeł napięcia

- Zwarcie elektryczne \Leftrightarrow stan obwodu, w którym bieguny źródła napięcia zostały połączone (zwarte) opornikiem o bardzo małym oporze. Natężenie prądu (I) oraz moc ciepła (P_w) wydzielonego w zwartym źródle o sile elektromotorycznej (\mathcal{E}) i oporze wewnętrznym (R_w) osiągają maksymalne wartości.

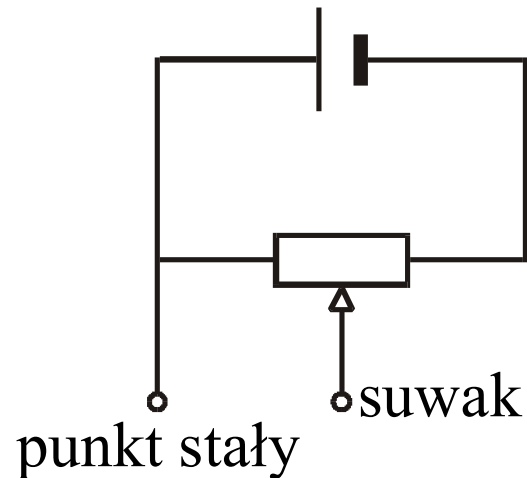
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_w}, \quad P_w = \frac{\mathcal{E}^2}{R_w}$$



- Zwarte źródło napięcia

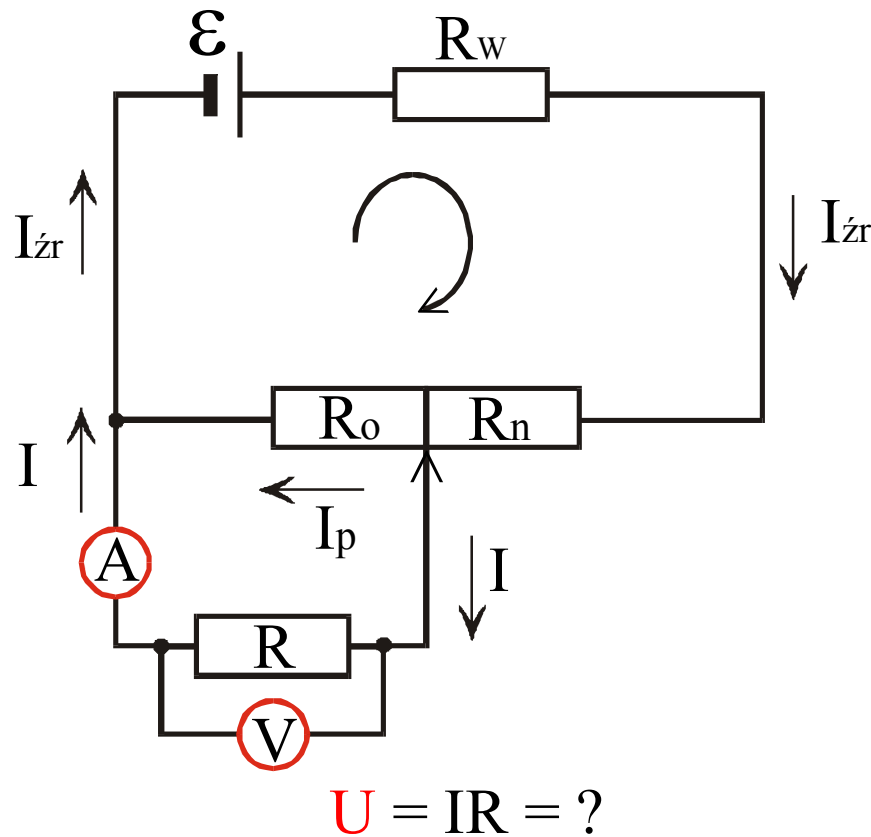
- Potencjometr – rozważania jakościowe 235
- Obciążony potencjometr – rozważania ilościowe 236

- Potencjometr \Leftrightarrow układ regulujący napięcie, tworzymy go, spinając źródło stałego napięcia odpowiednio dużym oporem, aby zminimalizować moc wydzielanego w nim ciepła. Zasadę działania potencjometru wyjaśnia rysunek poniżej.



• Potencjometr

- Jeżeli suwak oddala się od punktu stałego, to napięcie na zaciskach wyjściowych potencjometru rośnie. Jeżeli suwak zbliża się do punktu stałego, to napięcie na zaciskach wyjściowych potencjometru maleje.



$$I_{zr} = I + I_p$$

$$\mathcal{E} = I_{zr} R_w + I_{zr} R_n + IR$$

$$0 = IR - I_p R_o$$

$$U = IR$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_w \left(1 + \frac{R}{R_o}\right) + R_n + R \left(1 + \frac{R_n}{R_o}\right)}$$

$$U = \frac{\mathcal{E}}{(R_w + R_n) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_o}\right) + 1}$$

- Woltomierz 238
- Rozszerzanie zakresu pomiarowego woltomierza 239
- Posobnik 240
- Kompensacyjna metoda pomiaru siły elektromotorycznej 241

• Woltomierz \Leftrightarrow przyrząd służący do pomiaru napięcia. Idealny woltomierz powinien mieć opór wewnętrzny nieskończenie wielki, aby do gałęzi z miernikiem nie wpływał żaden prąd.

U Pomiar napięcia ma “bezinwazyjny” charakter, polega na podłączenia końcówek woltomierza równolegle względem danego elementu. Inaczej mówiąc, po usunięciu woltomierza nie powstaje przerwa w obwodzie.

C Woltomierz można przerobić na amperomierz, przyłączając do niego równolegle bardzo mały opór.

C Nazwa woltomierz pochodzi od nazwiska Volta.

B Alessandro Gusepppe Antonio Anastasio Volta (1745-1827), włoski fizyk.

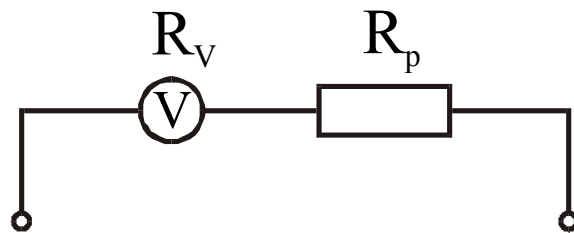


• Symbol woltomierza

- Rozszerzanie zakresu pomiarowego woltomierza \Leftrightarrow dostosowanie woltomierza do pomiaru większych napięć elektrycznych. W tym celu należy dołączyć szeregowo względem miernika opornik zwany posobnikiem.

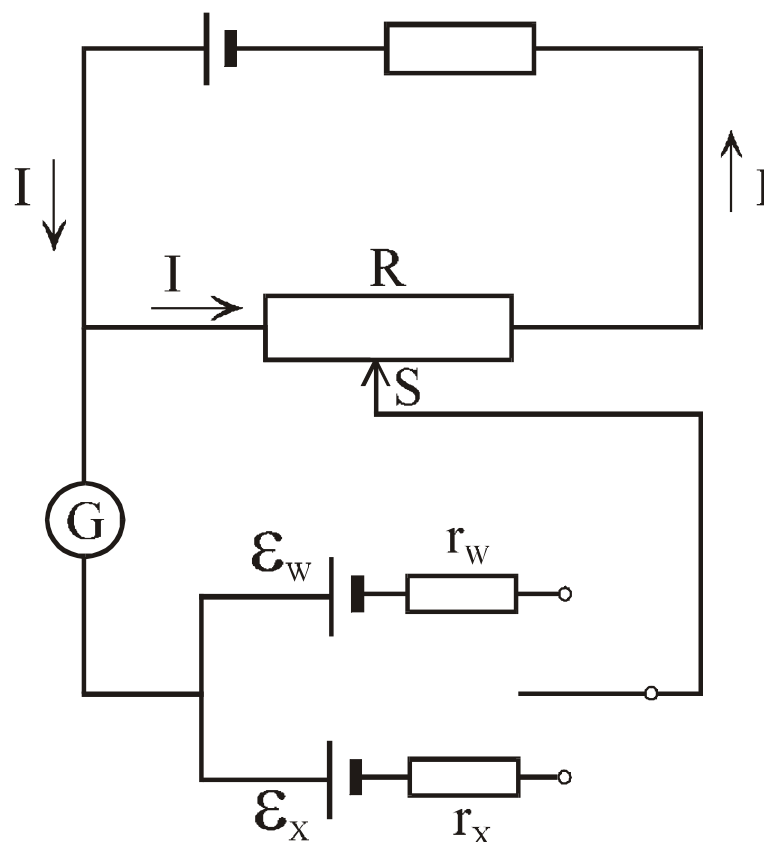
- Posobnik \Leftrightarrow opornik o oporze (R_p), jaki należy dołączyć szeregowo względem woltomierza o oporze wewnętrznym (R_v), aby n -krotnie zwiększyć zakres pomiarowy tego miernika.

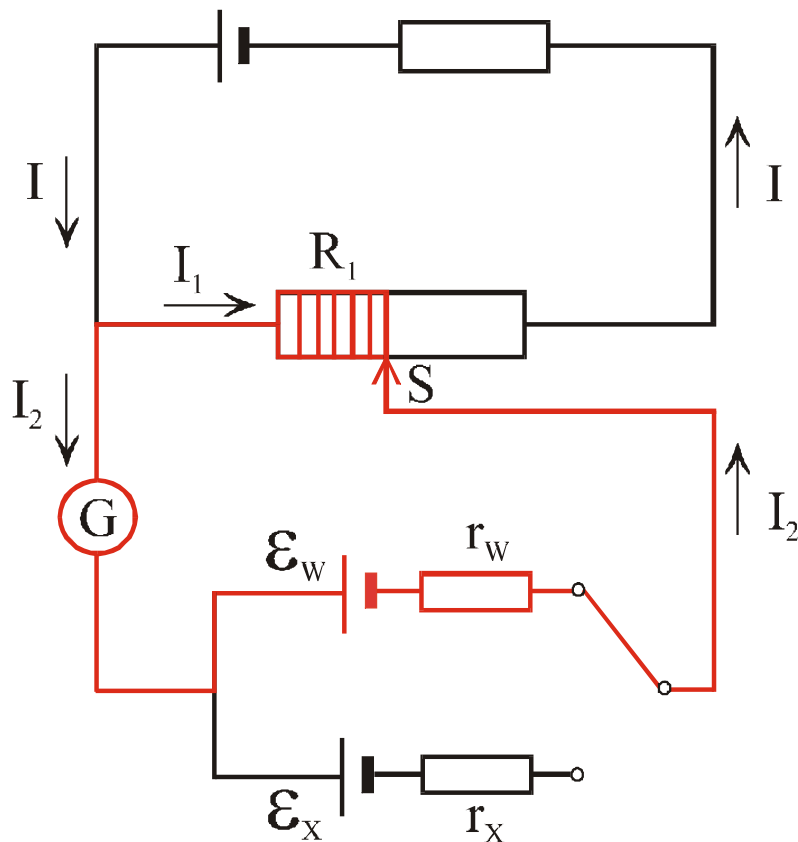
$$R_p = (n - 1)R_v$$
$$n = \frac{\text{nowy zakres}}{\text{stary zakres}}$$



- Posobnik (R_p)

- Kompensacyjna metoda pomiaru siły elektromotorycznej \Leftrightarrow metoda polegająca na porównaniu nieznannej siły elektromotorycznej (\mathcal{E}_x) badanego źródła ze znaną siłą elektromotoryczną źródła wzorcowego (\mathcal{E}_w).

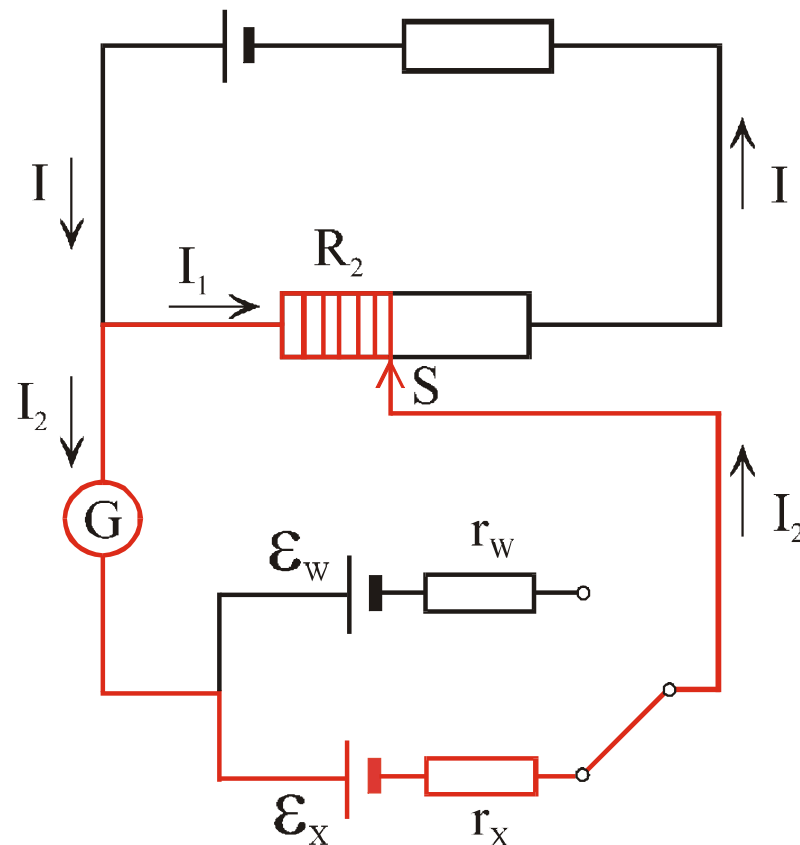




$$\begin{aligned}\mathcal{E}_w &= I_1 R_1 - I_2 R_w \\ I &= I_1 + I_2 \\ I_2 &= 0\end{aligned}$$

$$\mathcal{E}_w = I_1 R_1$$

- Suwak S potencjometru przesuwamy aż do wyzerowania galwanometru, $I_2 = 0$. Siła elektromotoryczna (\mathcal{E}_w) zostaje wtedy skompensowana przez napięcie na oporze (R_1).



$$\mathcal{E}_x = I_1 R_2 - I_2 R_x$$

$$I = I_1 + I_2$$

$$I_2 = 0$$

$$\mathcal{E}_x = I_1 R_1$$

- Suwak S potencjometru przesuwamy aż do wyzerowania galwanometru, $I_2 = 0$. Siła elektromotoryczna (\mathcal{E}_x) zostaje wtedy skompensowana przez napięcie na oporze (R_2).

$$\mathcal{E}_x = IR_2$$

$$\mathcal{E}_w = IR_1$$

$$\frac{\mathcal{E}_x}{\mathcal{E}_w} = \frac{R_2}{R_1}$$

Uwaga

$$\mathcal{E}_x, \mathcal{E}_w \leq IR$$

- Amperomierz 246
- Galwanometr 247
- Rozszerzanie zakresu pomiarowego amperomierza 248
- Bocznik 249

- Amperomierz \Leftrightarrow przyrząd służący do pomiaru natężenia prądu. Idealny amperomierz powinien mieć opór wewnętrzny nieskończenie mały, aby na mierniku nie pojawiało się napięcie.

U Pomiar natężenia prądu ma “inwazyjny” charakter, wymaga przecięcia przewodu i podłączenia jego końcówek do amperomierza. Inaczej mówiąc, po usunięciu amperomierza powstaje przerwa w obwodzie.

C Amperomierz można przerobić na woltomierz, dołączając do niego szeregowo bardzo duży opór.

C Nazwa amperomierz pochodzi od nazwiska Ampère.

B Andrè-Marie Ampère (1775-1836), francuski fizyk i matematyk.



• Symbol amperomierza

• Galwanometr \Leftrightarrow przyrząd służący do pomiaru małych wartości natężenia prądu. Stanowi go odpowiednio podwieszona cewka, która może obracać się wokół ferromagnetycznego rdzenia. Cewka i rdzeń znajdują się między biegunami trwałego magnesu. Przepływ prądu przez cewkę powoduje jej obrót o kąt, przy którym momenty sił działających na cewkę równoważą się. Kąt ten jest proporcjonalny do mierzonego natężenia prądu. Cewka połączona jest z lekkim zwierciadełkiem, umożliwia to bardzo dokładny pomiar kąta obrotu metodą optyczną. Galwanometrami zwierciadlanymi z ruchomą cewką można mierzyć natężenia prądu rzędu 10^{-10} ampera.

H Pierwszy galwanometr skonstruował Schweigger w 1820.

B Johann Salomo Christoph Schweigger (1779-1857), niemiecki chemik i fizyk.

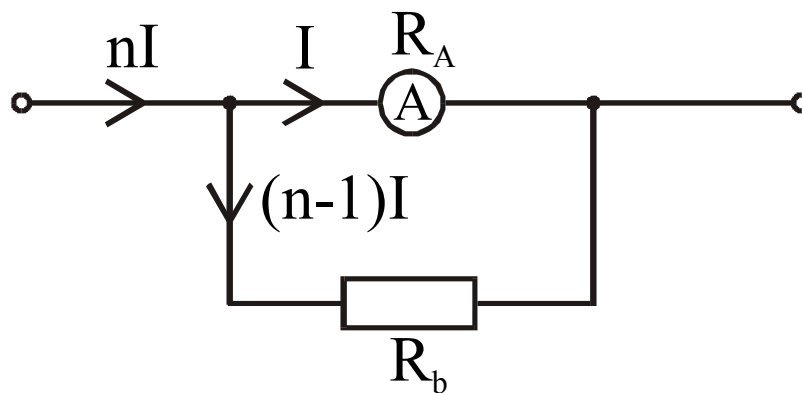


• Symbol galwanometru

- Rozszerzanie zakresu pomiarowego amperomierza \Leftrightarrow dostosowanie amperomierza do pomiaru większych natężeń prądu. W tym celu należy dołączyć równolegle względem miernika opornik zwany bocznikiem.

- Bocznik \Leftrightarrow opornik o oporze (R_b), jaki należy dołączyć równolegle względem amperomierza o oporze wewnętrznym (R_A), aby n -krotnie zwiększyć zakres pomiarowy tego miernika.

$$R_b = \frac{R_A}{n-1}$$
$$n = \frac{\text{nowy zakres}}{\text{stary zakres}}$$



- Bocznik (R_b)

- Omomierz 251
- Techniczna metoda pomiaru oporu 252
- Mostek Wheatstone'a 253

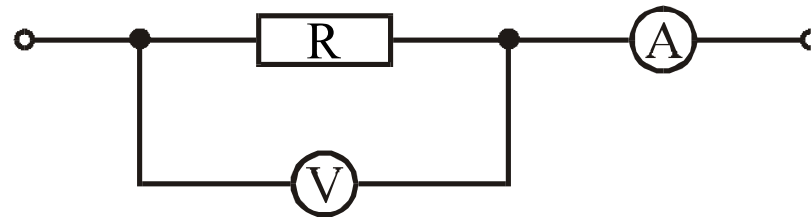
- Omomierz \Leftrightarrow przyrząd służący do pomiaru oporu elektrycznego.

C Nazwa omomierz pochodzi od nazwiska Ohm.

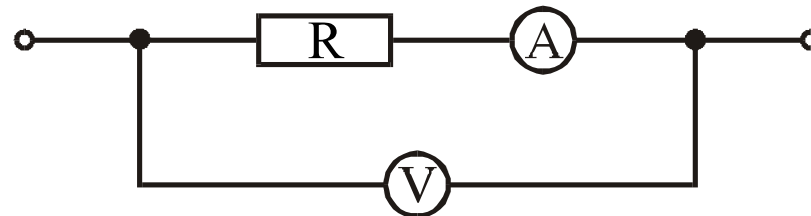
B Georg Simon Ohm (1787-1854), niemiecki fizyk.

- Techniczna metoda pomiaru oporu \Leftrightarrow pomiar oporu danego opornika jako ilorazu wskazania woltomierza i amperomierza. Można tego dokonać na dwa różne sposoby (patrz rysunki).

- Wersja z dokładnym pomiarem napięcia



- Wersja z dokładnym pomiarem natężenia prądu

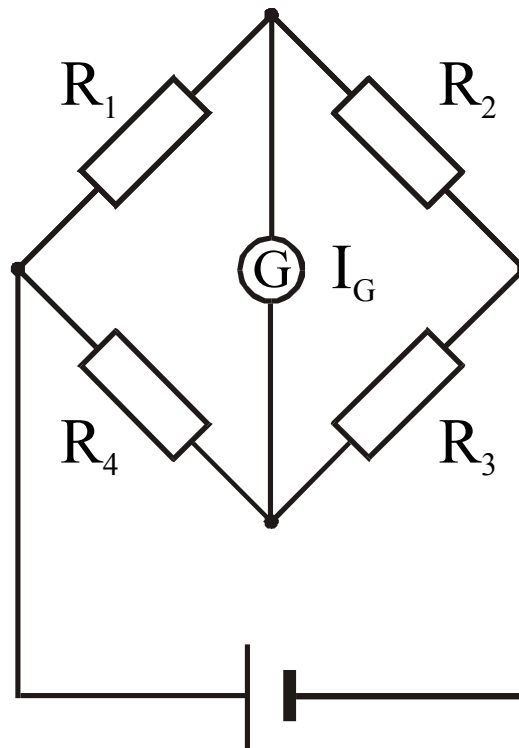


- Mostek Wheatstone'a \Leftrightarrow układ zaproponowany przez Wheatstone'a w 1844, służący do pomiaru nieznanego oporu danego opornika za pomocą trzech innych oporników o znanych oporach. Zasada pomiaru wynika z poniższego twierdzenia.

$$I_G = 0 \Leftrightarrow R_1 R_3 = R_2 R_4$$

- I_G – natężenie prądu przepływającego przez galwanometr

B Sir Charles Wheatstone (1802-1875), brytyjski fizyk.

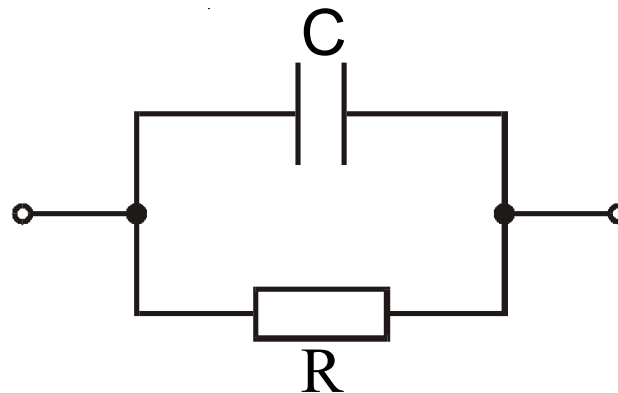


- Mostek Wheatstone'a

- Układ zastępczy 256

- Układ zastępczy \Leftrightarrow układ, którym można zastąpić dany obwód elektryczny w celu uproszczenia jego analizy lub/i uwzględnienia jego rzeczywistych własności.

P Rzeczywisty kondensator można zastąpić kondensatorem idealnym połączonym równoległe z idealnym opornikiem o dużym oporze.



- Układ zastępczy rzeczywistego kondensatora

Wykłady z Fizyki 06



Zbigniew Osiak

Elektryczność