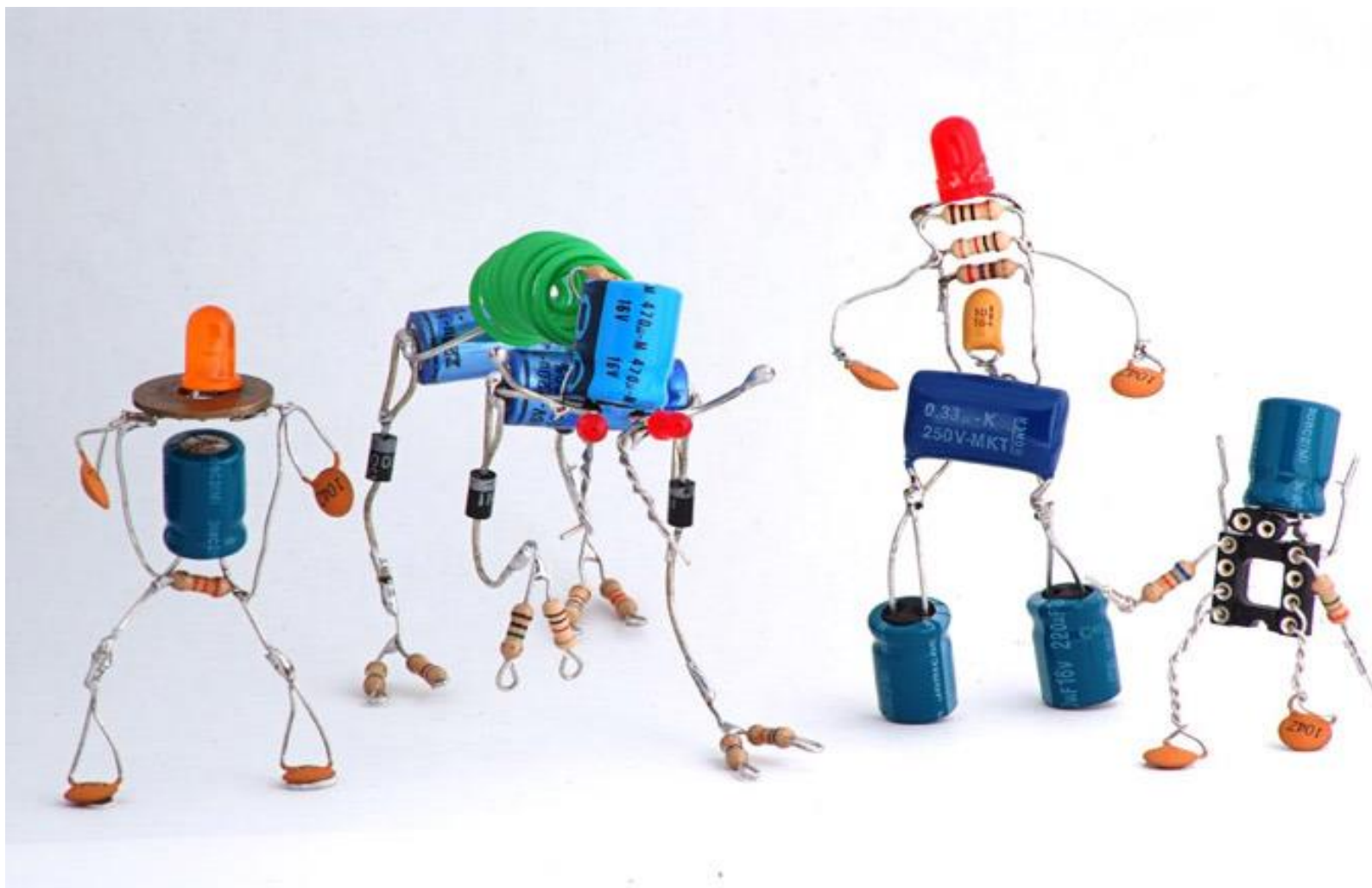


# Podstawy elektrotechniki

E5, E7



# Rozkład materiału

Blok tematyczny	I. godzin
Pole elektryczne	3
Potencjał, napięcie	2
Prąd elektryczny	2
Obwody elektryczne	4
Prawo Ohma, rezystancja	4
Łączenie rezystorów	3
Moc i energia prądu stałego	3
I, II prawo Kirchhoffa	8
Źródła energii elektrycznej	4
Stany pracy źródła, łączenie źródeł	4
Elementy półprzewodnikowe	8
Analiza elementów nieliniowych	4
Pojemność elektryczna, kondensatory	4
Pole magnetyczne	3
Obwody magnetyczne	3
Indukcyjność, cewki	3
Indukcja elektromagnetyczna	3
Transformatory	4
Silniki elektryczne	6
Prąd przemienny	3
Elementy RLC w obwodach prądu przemiennego	6
Moc i energia prądu przemiennego.	3
Rezonans	3
Obwody trójfazowe	4
Elektromagnetyzm	2

# Przedrostki wielokrotności i podwielokrotności jednostek miar

Nazwa	Symbol	Mnożnik	Mnożnik	Nazwa mnożnika	Przykład
tera	T	1 000 000 000 000	$10^{12}$	bilion	THz – <u>teraherc</u>
giga	G	1 000 000 000	$10^9$	miliard	GHz – <u>gigaherc</u>
mega	M	1 000 000	$10^6$	milion	MV – <u>megavolt</u>
kilo	k	1 000	$10^3$	tysiąc	kΩ – <u>kiloom</u>
		1 = $10^0$	$10^0$	jeden	A – <u>amper</u>
mili	m	0,001	$10^{-3}$	jedna tysięczna	ms – <u>milisekunda</u>
mikro	μ	0,000 001	$10^{-6}$	jedna milionowa	μH – <u>mikrohenr</u>
nano	n	0,000 000 001	$10^{-9}$	jedna miliardowa	nF – <u>nanofarad</u>
piko	p	0,000 000 000 001	$10^{-12}$	jedna bilionowa	pF – <u>pikofarad</u>

$$1\text{mA} = 0.001\text{A}$$

$$10\text{MHz} = 10000000\text{Hz}$$

$$0.001\text{V} = 1\text{mV}$$

$$1\mu\text{s} = 0.000001\text{s}$$

$$1\text{cal} = 2.54\text{cm}$$

$$1\text{cal} = 25.4\text{mm}$$

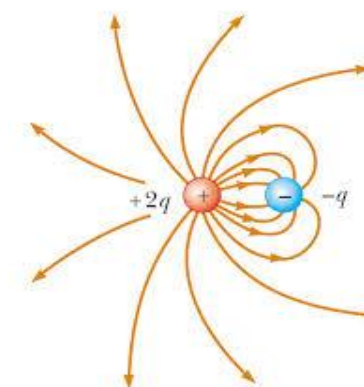
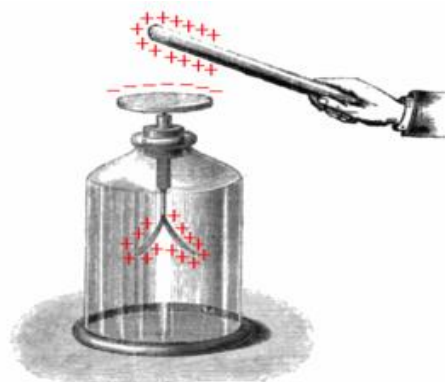
$$1\text{cal} = 0.0254\text{m}$$

# Pole elektryczne

- **Pole elektryczne** – obszar w którym na ładunki elektryczne działa siła
- **Pole elektrostatyczne** występuje wtedy, kiedy nieruchomy ładunek elektryczny lub naelektryzowane ciało oddziałuje na otaczającą go przestrzeń.
- **Ładunek elektryczny** ciała może być dodatni lub ujemny. Dwa ładunki jednego znaku odpychają się, a pomiędzy ładunkiem dodatnim i ujemnym działa siła przyciągająca. Ładunki elektryczne są skwantowane, elektronowi przypisano elementarny ładunek ujemny, protonowi dodatni. Jednostką ładunku jest kulomb [C].
- **Ładunek elementarny elektronu** ma wartość równą  $q = -1.6 \cdot 10^{-19} [C]$
- **Linie sił pola** – służą do obrazowego przedstawienia pola. Są to linie, które w każdym punkcie przestrzeni są styczne do wektora siły działającej w tym polu na dodatni ładunek próbny.
- **Zasada superpozycji** - siła pochodząca od kilku źródeł pól elektrycznych jest wektorową sumą sił.



Zjawisko elektryzowania się ciał w polu elektrycznym (indukcja elektrostatyczna)



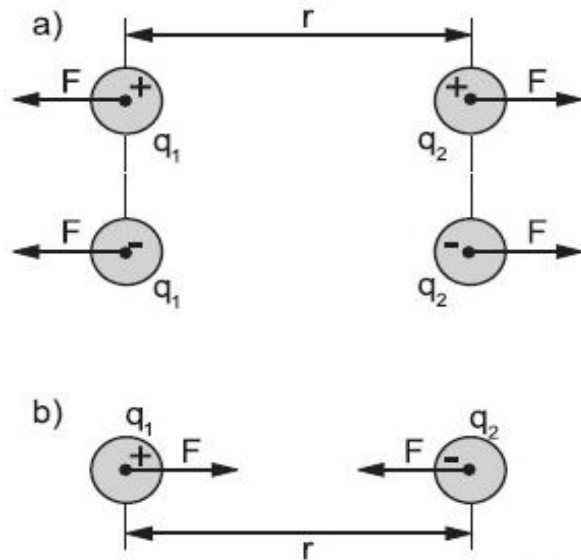
Obraz pola wytworzonego przez dwa ładunki – linie sił pola

**Pytanie:** Kto wyznaczył wartość ładunku elementarnego?



# Prawo Culomba

**Charles de Coulomb** (1736-1806) – francuski fizyk. Wykazał relację między siłą a ładunkiem (prawo Culomba), opracował podstawowe prawa elektrostatyki i zasady pomiarów wielkości elektrycznych. Od jego nazwiska pochodzi jednostka ładunku elektrycznego – kulomb.



- ładunki o tym samym znaku odpychają się
- ładunki o przeciwnych znakach przyciągają się

$$F = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Siła jest wprost proporcjonalna do iloczynu ładunków i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między nimi. Współczynnik  $k$  zależy od własności elektrycznej środowiska  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$

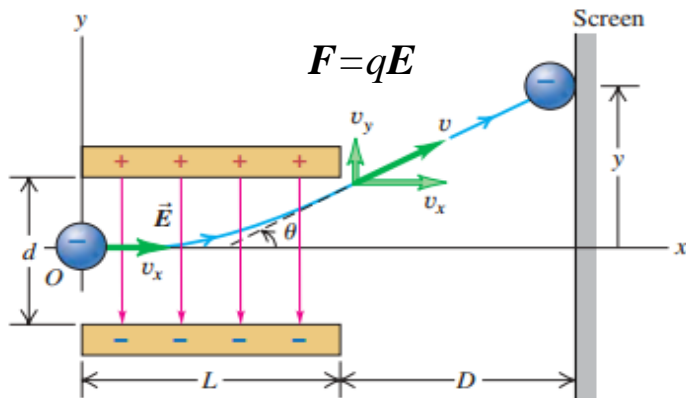
**Przenikalność elektryczna** – wielkość fizyczna charakteryzująca właściwości elektryczne środowiska, oznaczana grecką literą  $\epsilon$  (epsilon). Spośród wszystkich ośrodków, najmniejszą przenikalność elektryczną wykazuje próżnia. Wartość ta, oznaczana  $\epsilon_0$ , jest stałą fizyczną:

$$\epsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

# Natężenie pola elektrycznego

Podstawowymi wielkościami charakteryzującymi pole elektrostatyczne są:

- Natężenie pola  $E$ ,
- Indukcja elektryczna  $D$ ,
- Potencjał  $V$ ,
- Różnica potencjałów  $U$ .



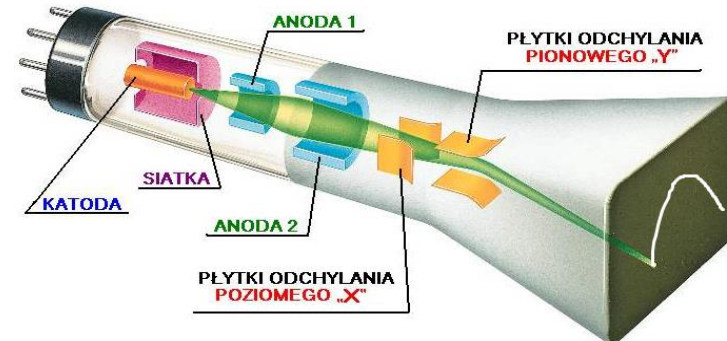
Oddziaływanie jednorodnego pola elektrycznego na poruszający się ładunek ujemny  $-q$ .  $E=U/d$ .

**Pole jednorodne** to pole, dla którego we wszystkich punktach natężenie pola jest takie samo (np. We wnętrzu kondensator płaskiego)

**Natężenie pola elektrycznego** – wielkość fizyczna charakteryzująca pole elektryczne. Natężenie pola elektrycznego wytwarzanego przez ładunek  $Q$  w odległości  $r$  wyraża wzór:

$$E(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

Jednostką natężenia pola jest wolt/metr [V/m].



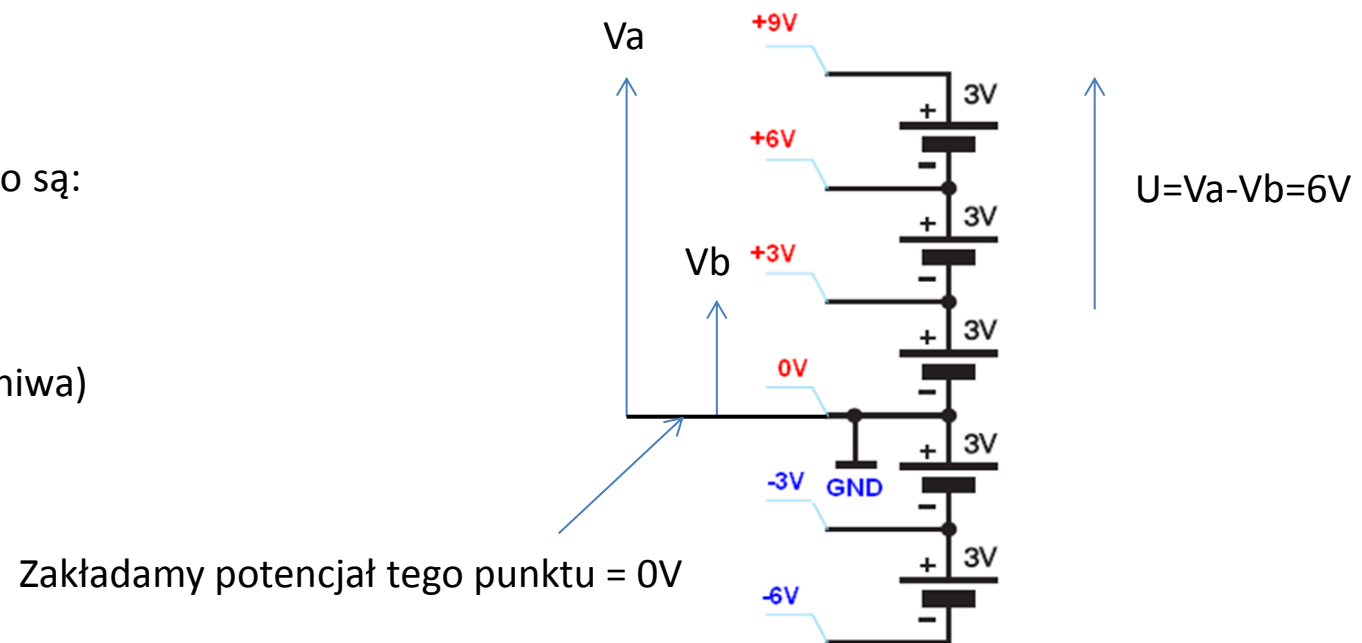
Lampa oscyloskopowa - charakteryzuje się elektrostatycznym odchyleniem wiązki elektronów. Wiązka elektronów wytworzona przez podgrzany drucik (katodę) jest przyspieszana przez pole elektryczne anody i wysłana zostaje w kierunku ekranu. Do odchylenia wiązki tak, aby mogła trafić w każdy punkt ekranu, służą dwie pary płytek odchyłających – jedna dla kierunku pionowego, druga dla poziomego.

# Potencjał, napięcie elektryczne

- **Potencjał elektryczny** w danym punkcie pola jest wielkością skalarną równą energii potencjalnej przypadającej na jednostkowy ładunek umieszczony w tym punkcie.
- **Napięcie elektryczne ( $U$ )** jest równe różnicy potencjałów  $U_{AB} = V_A - V_B$ . Określa zdolność źródła energii elektrycznej do wykonania pracy. Napięcie elektryczne między dwoma punktami pola (A, B) jest równe pracy jaką wykonały siły pola przy przenoszeniu ładunku  $q$  z punktu A do punktu B do wartości tego ładunku
- Jednostką potencjału i napięcia jest **wolt [V]**
- Napięcie mierzymy woltomierzem

Źródłem napięcia elektrycznego są:

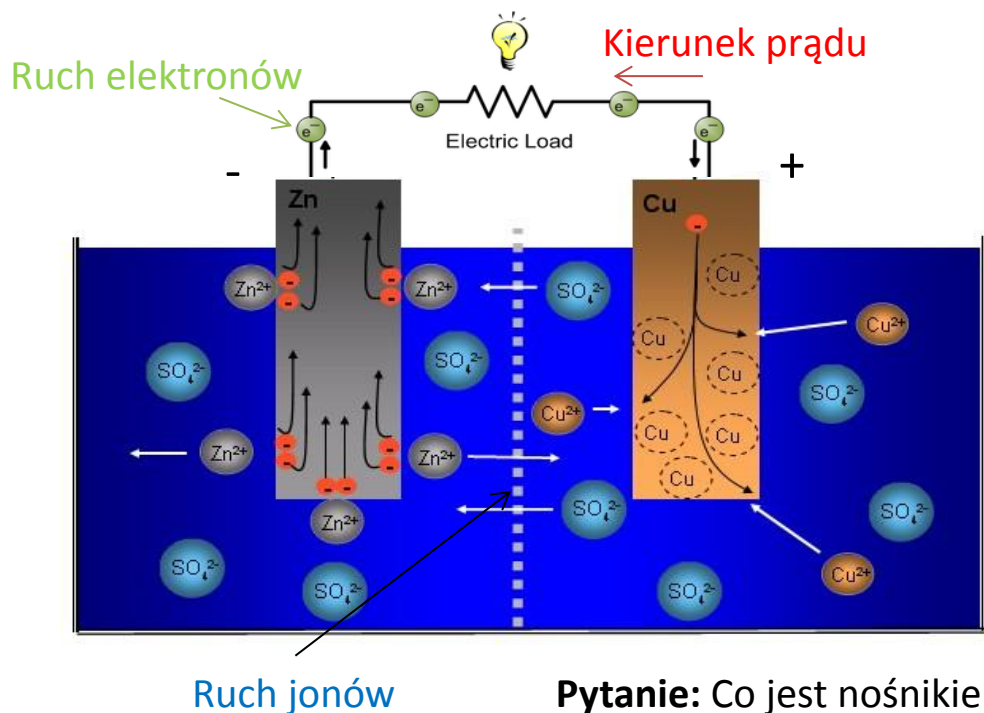
- Baterie
- Akumulatory
- Prądnice
- Ogniwa słoneczne (fotoogniwa)
- Zasilacze, ładowarki



**Pytanie:** Jakie jest napięcie pomiędzy zewnętrznymi wyprowadzeniami powyższego układu ogniw?

# Prąd elektryczny

- **Prąd elektryczny** – uporządkowany ruch ładunków elektrycznych.
- W metalach nośnikami ładunku są elektrony. W elektrolitach i gazach nośnikami ładunku są jony. Jony to atomy lub cząstki posiadające ładunek (niedomiar lub nadmiar elektronów w stosunku do protonów). Jony naładowane dodatnio nazywa się kationami, zaś ujemnie anionami. W rozrzedzonych gazach może też występować ruch swobodnych elektronów.
- **Natężenie prądu elektrycznego (I)** zwane potocznie prądem elektrycznym zależy od szybkości przepływu ładunku przez wyznaczoną powierzchnię  $I=Q/t$
- Jednostką natężenia prądu w układzie SI jest **amper [A]**
- Prąd mierzymy amperomierzem



**Prąd stały** charakteryzuje się stałą wartością natężenia oraz kierunkiem przepływu.

**Prąd zmienny** to prąd elektryczny, którego wartość natężenia zmienia się w czasie.

**Prąd przemienny** to prąd elektryczny, w którym zmienia okresowo kierunek prądu. Największe znaczenie praktyczne ma prąd o przebiegu sinusoidalnym.

**Pytanie:** Co jest nośnikiem ładunku podczas wyładowania atmosferycznego?

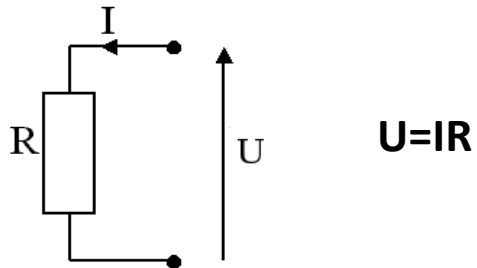




# Prawo Ohma



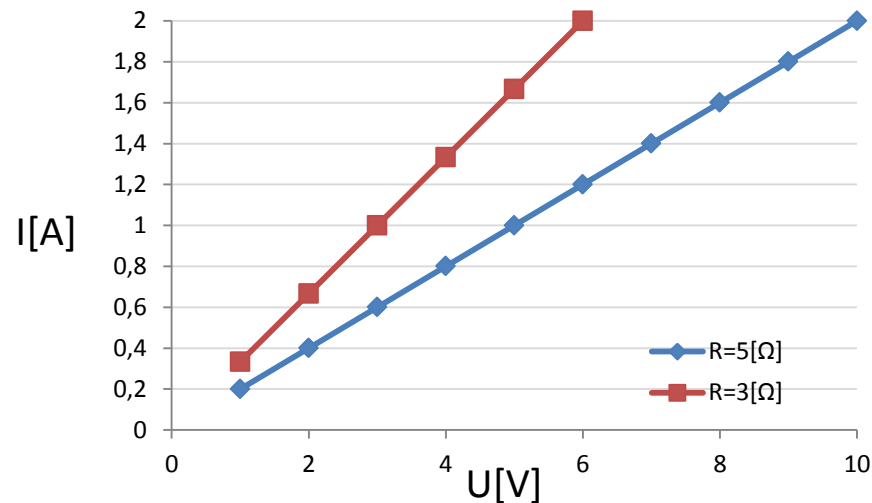
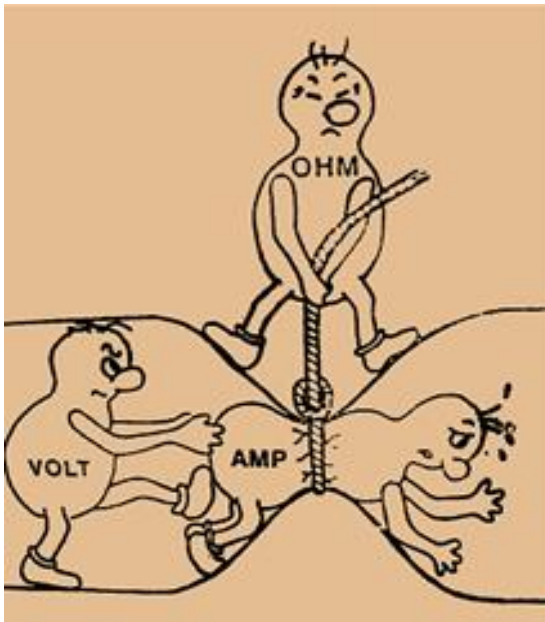
**Georg Simon Ohm (1789 -1854)** – matematyk niemiecki. Sformułował (1826) prawo opisujące związek pomiędzy natężeniem prądu elektrycznego a napięciem elektrycznym (tzw. Prawo Ohma). Badał nagrzewanie się przewodników przy przepływie prądu elektrycznego. Znalazł zależność oporu od formy geometrycznej przewodnika.



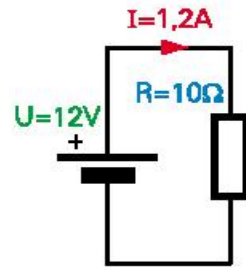
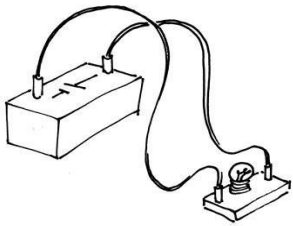
Współczynnik proporcjonalności **R** nazywa się **rezystancją lub oporem** elektrycznym. Jednostką rezystancji jest **om** [ $\Omega$ ]. Odwrotność rezystancji nazywamy konduktancją i oznaczamy literą **G**. Jednostką konduktancji jest **simens** [**S**].

Prawo Ohma przedstawione za pomocą konduktancji:  $I=GU$

- Elementy spełniające prawo Ohma nazywamy liniowymi ( $R=const$ ). W elementach nieliniowych  $R$  zależy od prądu lub napięcia
- Rezystancję mierzymy omomierzem



# Prawo Ohma



U - Napięcie	<input type="text" value="12"/>	[V]
I - Prąd	<input type="text" value="0.6"/>	[A]
R - Rezystancja	<input type="text" value="20"/>	[Ohm]
P - Moc	<input type="text" value="7.2"/>	[W]

**Zadanie 1:** Oblicz prąd jaki popłynie przez żarówkę o rezystancji  $R=5\Omega$  podłączoną do akumulatora o napięciu  $U=12V$

**Odp.**  $I=U/R = 12V/5\Omega = 2.4A$

**Zadanie 2:** Oblicz spadek napięcia na rezystorze  $R=100\Omega$ , jeśli płynie przez niego prąd 25mA.

**Odp.**  $U=IR$

Zamieniamy miliampery na ampery (podstawiamy za m=mili wartość 0.001 – patrz tabela)

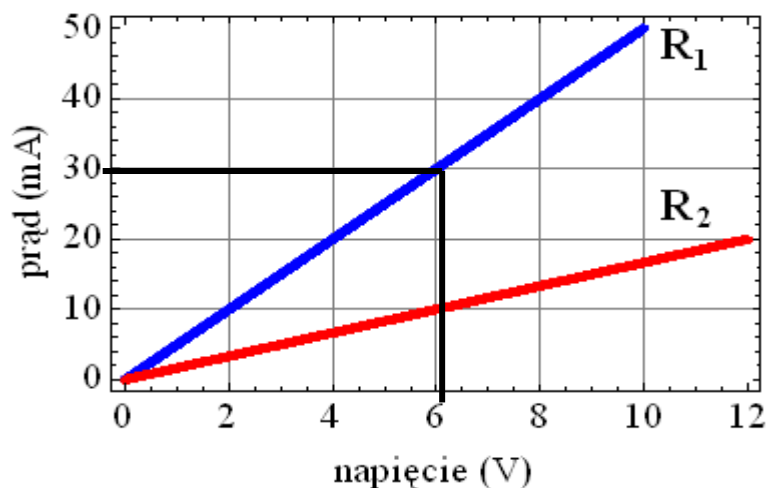
$I=25mA = 0.025A$

$U=0.025A*100 \Omega = 2.5V$

# Prawo Ohma



**Zadanie 3:** Na wykresie przedstawiono wyniki pomiarów prądu i napięcia dla rezystorów  $R_1$  i  $R_2$ . Wyznacz wartości rezystancji tych rezystorów.



Odczytujemy z wykresu napięcie i prąd:

$$U_1 = 6V$$

Zamieniamy mA na A

$$I_1 = 30\text{mA} = 30 \cdot 0.001\text{A} = 0.03\text{A}$$

$$R_1 = U_1 / I_1 = 6 / 0.03 = 200 \Omega$$

## Pytania:

1. Jak zmieni się prąd w odbiorniku jeśli jego rezystancja zwiększy się 2 krotnie, przy niezmiennym napięciu?
2. Od czego zależy rezystancja przewodnika?
3. Jaki wpływ na rezystancję przewodników ma temperatura?

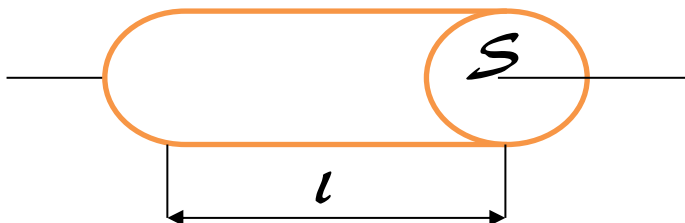
# Zależność oporu od wymiarów przewodnika

Rezystancja przewodu zależy od:

- długości  $l$  (wprost proporcjonalnie) - im dłuższa długość przewodu tym większy opór
- pola przekroju poprzecznego  $S$  (odwrotnie proporcjonalna) - przewodnik o większym przekroju ma mniejszy opór
- materiału z którego przewód został wykonany – materiał charakteryzuje opór właściwy (rezystywność).

Opór właściwy oznaczamy literą  $\rho$ . Jednostką oporu właściwego jest  $[\Omega m]$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$



Opór właściwy metali w temperaturze  $25^{\circ}C$

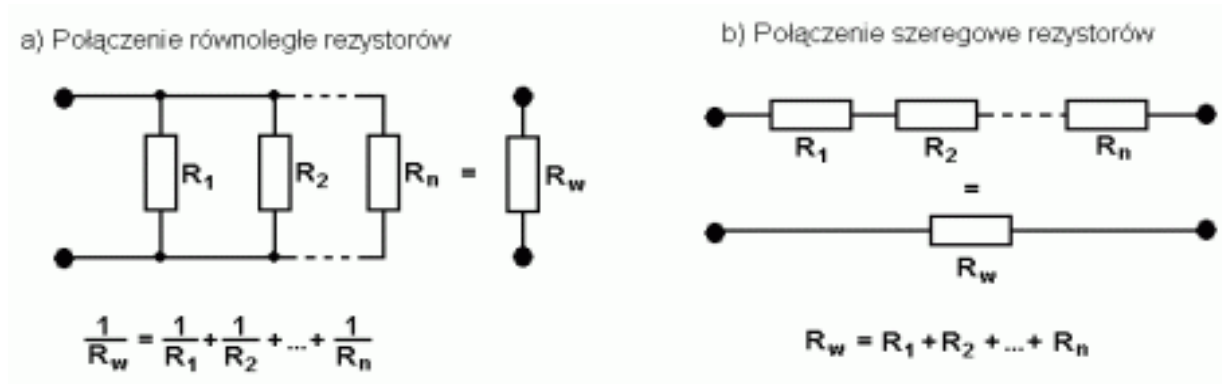
Metal	Opór właściwy metalu ( $10^{-8} \Omega m$ )
wolfram	5,4
srebro	1,6
miedź	1,7
glin	2,7
żelazo	9,7

**Zadanie 4.** Oblicz rezystancję drutu miedzianego o długości  $l=10m$  i średnicy  $d=0.2mm$ . Rezystywność miedzi:  $\rho = 1.7 \cdot 10^{-8} [\Omega m]$

promień  $r=d/2=0.1$  [mm]  
 pole przekroju  $S=\pi r^2=3.14 \cdot 0.1^2 = 0.0314$  [mm<sup>2</sup>]  
 zamieniamy mm<sup>2</sup> na m<sup>2</sup>  $mm=10^{-3}m \Rightarrow mm^2 = (10^{-3})^2 m^2 = 10^{-6}m^2$

$$R = \frac{1.7 \cdot 10^{-8} [\Omega m] \cdot 10 [m]}{0.0314 \cdot 10^{-6} [m^2]} = \frac{17 \cdot 10^{-8} [\Omega]}{0.0314 \cdot 10^{-6}} = 541.4 \cdot 10^{-2} = 5.414 [\Omega]$$

# Łączenie rezystorów



**Zadanie 5:** Oblicz rezystancję wypadkową połączenia szeregowego i równoległego dwóch rezystorów  $R_1=4\Omega$  i  $R_2=5\Omega$

**Połączenie szeregowe:**

$$R = R_1 + R_2 = 4 + 5 = 9\Omega$$

**Połączenie równoległe:**

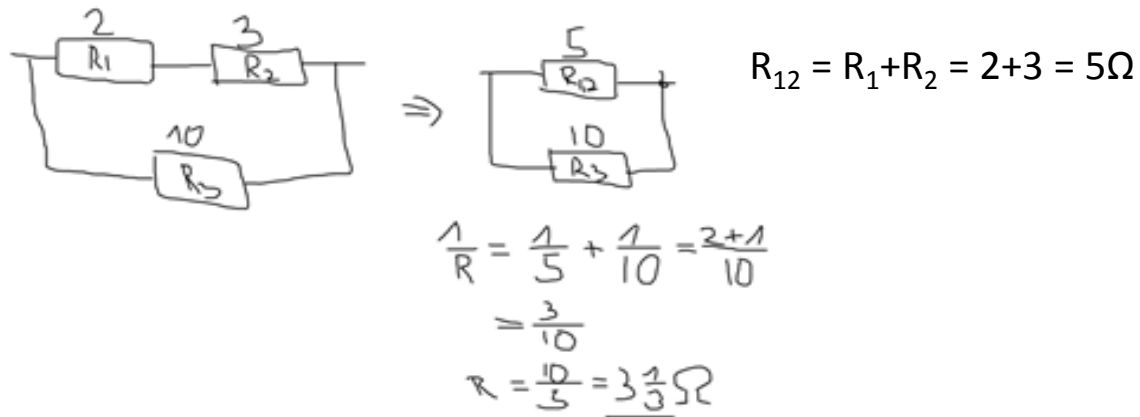
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{4} + \frac{1}{5} = \frac{5 + 4}{20} = \frac{9}{20}$$

Obliczyliśmy odwrotność rezystancji, więc

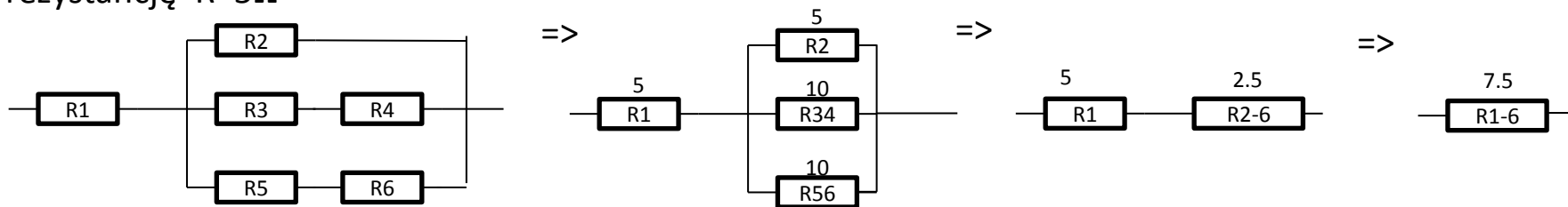
$$R = 20/9 \Omega = 2\frac{2}{9}\Omega = 2.22\Omega$$

# Łączenie rezystorów

**Zadanie 6.** Oblicz rezystancję zastępczą układu rezystorów



**Zadanie 7.** Oblicz rezystancję zastępczą układu rezystorów. Wszystkie rezystory mają taką samą rezystancję  $R=5\Omega$

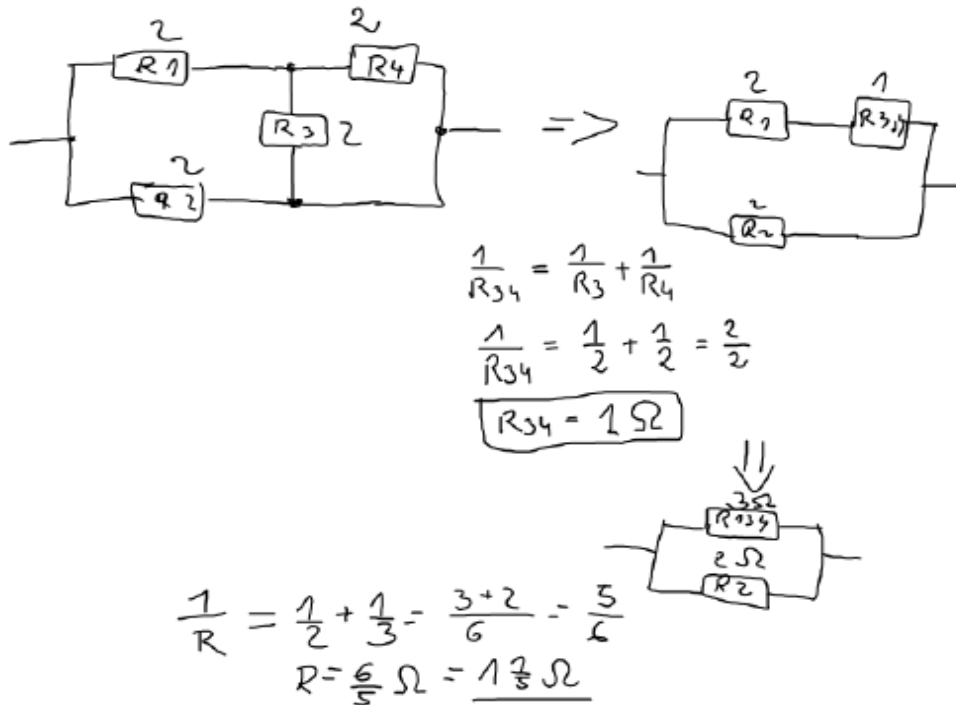


$$\frac{1}{R_{26}} = \frac{1}{5} + \frac{1}{10} + \frac{1}{10} = \frac{2+1+1}{10} = \frac{4}{10} \Rightarrow R_{26} = 10/4 = 2.5\Omega$$

# Łączenie rezystorów

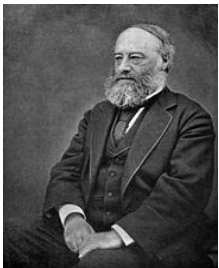
**Zadanie 8.** Oblicz rezystancję zastępczą układu rezystorów

Wyk. A C



**Zadanie 9.** Ile wynosi rezystancja wypadkowa szeregowego połączenia rezystorów:  $R_1=1\text{k}\Omega$  i  $R_2=250\Omega$

Odp.  $R = R_1 + R_2 = 1000\Omega + 250\Omega = 1250\Omega = 1.25\text{k}\Omega$



# Moc i energia elektryczna

**James Prescott Joule** – fizyk angielski. Interesował się zagadnieniami ciepła, podjął się wyjaśnienia właściwości termicznych prądu elektrycznego. Odkrył prawo przemiany prądu elektrycznego na ciepło, które przedstawił w formie matematycznej znanej dziś jako prawo Joule'a (zwane również prawem Joule'a-Lenza)

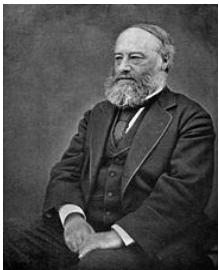
- Moc  $P = U \cdot I$
- Korzystając z prawa Ohma możemy zapisać:  $P = \frac{U^2}{R}$     lub     $P = I^2 \cdot R$
- Jednostką mocy jest **wat [W]**

**Zadanie.** Oblicz prąd płynący przez żarówkę samochodowa o mocy  $P=55W$ .  $U=12V$ .

$$P = U \cdot I \quad /:U$$

$$\frac{P}{U} = I \quad \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{55W}{12V} = 4.58[A]$$





# Moc i energia elektryczna



- Energia elektryczna jest iloczynem mocy i czasu  $W = P \cdot t$
- Jednostką energii elektrycznej jest [Ws] – watosekunda lub [kWh] – kilowatogodzina
- Prawo Joule'a-Lenza - ilość ciepła  $Q$  wydzielanego w czasie przepływu prądu elektrycznego przez przewodnik elektryczny jest wprost proporcjonalna do iloczynu oporu elektrycznego przewodnika, kwadratu natężenia prądu i czasu jego przepływu.  $Q = I^2 \cdot R \cdot t$  [J]
- Jednostka ciepła jest **dżul [J]**       $1J=1W \cdot s$  (wat razy sekunda)

**Zadanie.** Oblicz ile trzeba zapłacić miesięcznie za energię elektryczną zużytą przez telewizor o mocy 100W, który jest włączony przez 7 godzin dziennie. Koszt 1kWh wynosi 56groszy.

$$W = P \cdot t = 100W \cdot 7h \cdot 31 = 21700Wh = 21.7kWh$$

x      -    21.7kWh

56gr - 1kWh

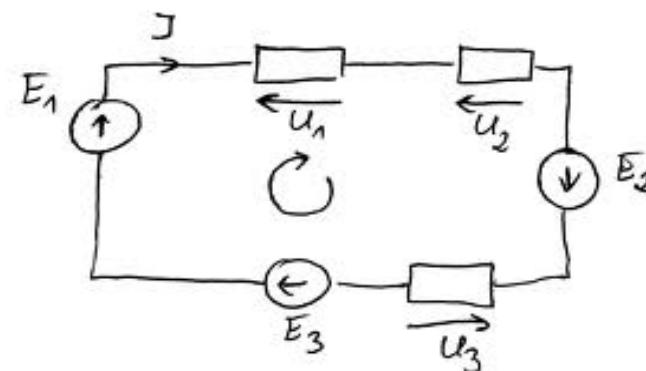
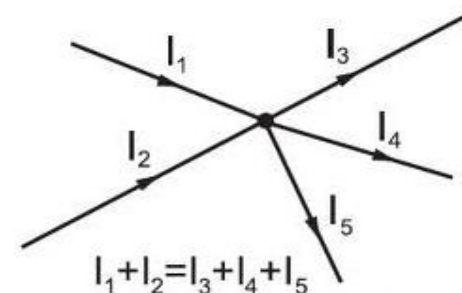
$$x = \frac{21.7kWh \cdot 0.56zł}{1kWh} = 12.15zł$$



# Prawa Kirchhoffa

**Gustav Robert Kirchhoff** (1824-1887) – niemiecki fizyk, twórca prawa promieniowania cieplnego, oraz praw dotyczących obwodów elektrycznych (pierwsze i drugie prawo Kirchhoffa). Razem z Robertem W. Bunsenem odkryli cez i rubid, wynaleźli spektroskop, a także opracowali metody analizy spektralnej.

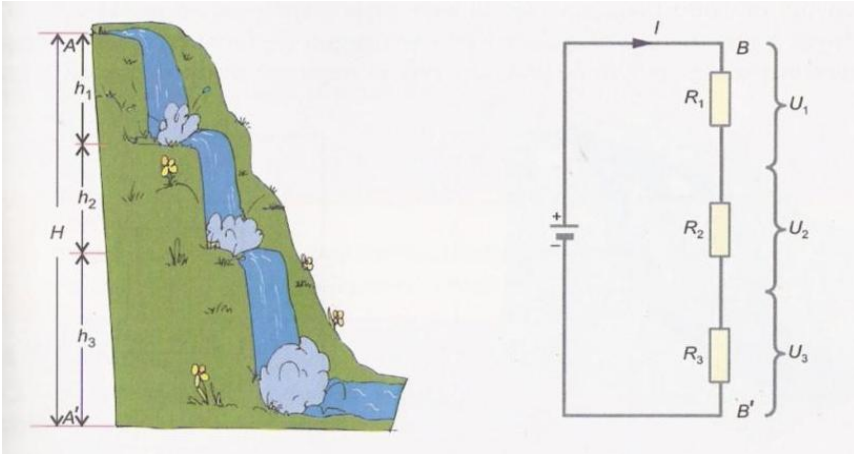
- **I prawo Kirchhoffa** (prądowe prawo Kirchhoffa) – suma prądów wpływających do węzła jest równa sumie prądów wyływających z węzła.
- **II prawo Kirchhoffa** (napięciowe prawo Kirchhoffa) – w zamkniętym obwodzie elektrycznym (oczku) suma sił elektromotorycznych źródeł jest równa sumie spadków napięć na odbiornikach (oporach).
- Zarówno spadki napięcia jak i siły elektromotoryczne mogą przybierać wartości ujemne i dodatnie. Ich znak ustala się w sposób:
  - ustala się kierunek obiegu obwodu (np zgodnie z ruchem wskazówek zegara)
  - gdy kierunek prądu w odbiorniku jest zgodny z kierunkiem obiegu, spadek napięcia ( $U$ ) jest dodatni (w przypadku niezgodności – ujemny)
  - gdy siła elektromotoryczna źródła SEM ( $E$ ) jest spolaryzowana zgodnie z kierunkiem obiegu, jej wartość jest dodatnia



$$E_1 + E_2 + E_3 = U_1 + U_2 + U_3$$

# Dzielnik napięcia i prądu

**Zadanie.** Oblicz spadki napięć w obwodzie dzielnika napięcia.  $E_1=15V$ ,  $R_1=5\Omega$ ,  $R_2=10\Omega$ ,  $R_3=15\Omega$



**Z II prawa Kirchhoffa mamy:**

$$E_1 = U_1 + U_2 + U_3$$

**Z prawa Ohma możemy zapisać:**

$$E_1 = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3$$

$$E_1 = I \cdot (R_1 + R_2 + R_3) \Rightarrow I = 15[V] / (5 + 10 + 15)[\Omega] = 0.5A$$

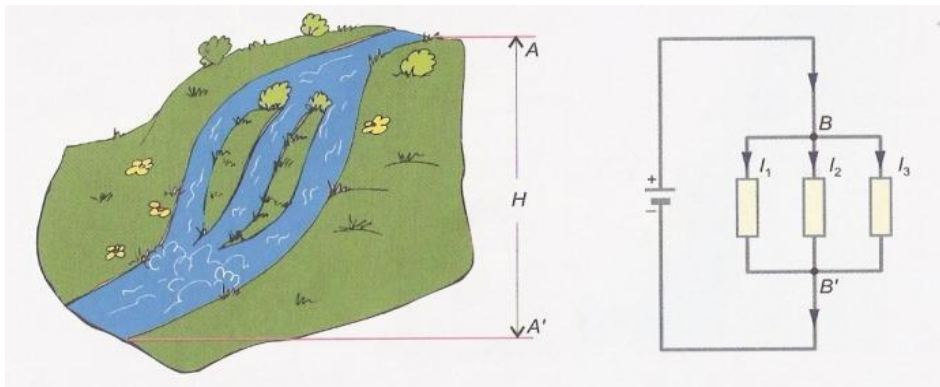
$$U_1 = I \cdot R_1 = 0.5 \cdot 5 = 2.5V$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = 0.5 \cdot 10 = 5V$$

$$U_3 = I \cdot R_3 = 0.5 \cdot 15 = 7.5V$$

**Uwaga:** w połączeniu szeregowym wszędzie płynie ten sam prąd (wniosek z I pr. Kirchhoffa).

**Zadanie.** Oblicz prądy w obwodzie dzielnika prądu.  $E_1=10V$ ,  $R_1=5\Omega$ ,  $R_2=10\Omega$ ,  $R_3=20\Omega$



**Z I prawa Kirchhoffa mamy:**

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

**Z prawa Ohma możemy zapisać:**

$$I_1 = E_1 / R_1 = 10 / 5 = 2A$$

$$I_2 = E_1 / R_2 = 10 / 10 = 1A$$

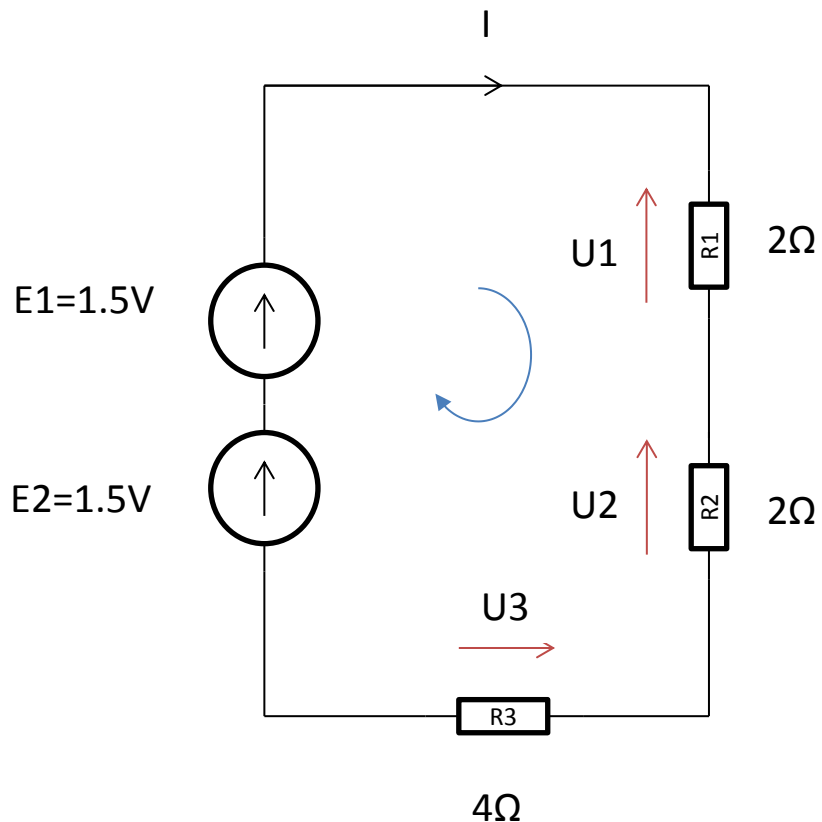
$$I_3 = E_1 / R_3 = 10 / 20 = 0.5A$$

**Uwaga:** w połączeniu równoległym na wszystkich odbiornikach jest takie samo napięcie (wniosek z II pr. Kirchhoffa).

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 3.5A$$

# Prawa Kirchhoffa - ćwiczenia

**Zadanie.** Oblicz prąd i spadki napięć na odbiornikach w obwodzie przedstawionym na rysunku.  $E_1=E_2=6V$



**Korzystamy z II pr. Kirchhoffa:**

$$E_1 + E_2 = U_1 + U_2 + U_3$$

**z prawa Ohma mamy:**

$$E_1 + E_2 = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3$$

$$E_1 + E_2 = I \cdot (R_1 + R_2 + R_3)$$

$$12V = I \cdot 8\Omega$$

$$I = 12/8[A] = 1.5A$$

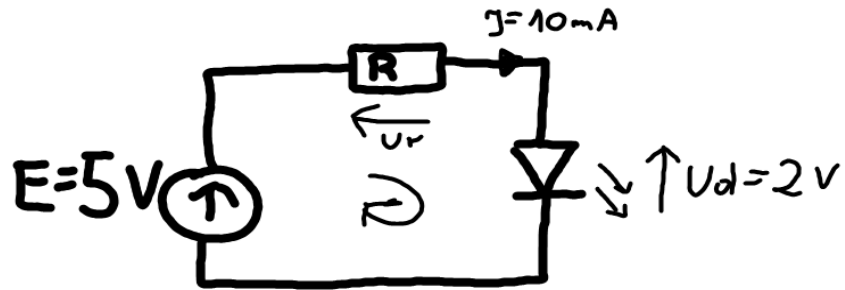
$$U_1 = I \cdot R_1 = 1.5 \cdot 2 = 3V$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = 1.5 \cdot 2 = 3V$$

$$U_3 = I \cdot R_3 = 1.5 \cdot 4 = 6V$$

# Prawa Kirchhoffa - ćwiczenia

**Zadanie.** Wyznacz wartość rezystancji  $R$ , przy której prąd diody LED wynosi  $10\text{mA}$ . Załóż napięcie zasilania  $E=5\text{V}$  i spadek napięcia na diodzie  $U_d=2\text{V}$ .



**Korzystamy z II pr. Kirchhoffa**

$$E = U_r + U_d$$

$$5\text{V} = U_r + 2\text{V}$$

$$U_r = 3\text{V}$$

**Z prawa Ohma**

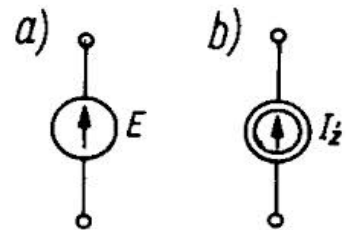
$$R = U_r / I = 3\text{V} / 10\text{mA} = 3\text{V} / 0.010\text{A} = 300\Omega$$

**Moc dla opornika**

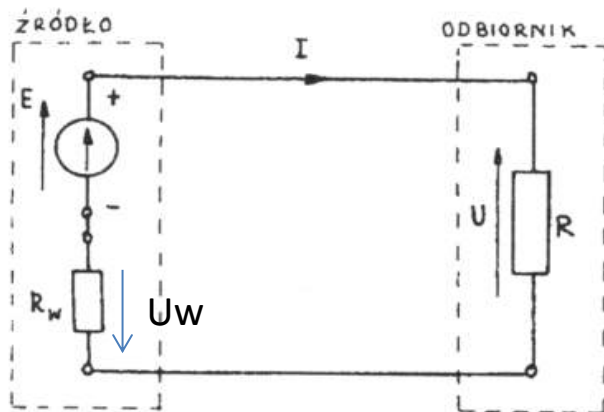
$$P = U_r \cdot I = 3\text{V} \cdot 10\text{mA} = 30\text{mW}$$

# Źródła napięcia i prądu

- Źródło idealne a) napięciowe, b) prądowe



- SEM, E – siła elektromotoryczna źródła
- Źródło rzeczywiste. Rzeczywiste źródło napięcia stałego można scharakteryzować podając jego siłę elektromotoryczną E oraz rezystancję wewnętrzną R<sub>w</sub>. R<sub>w</sub> odpowiada za straty.



Z drugiego prawa Kirchhoffa mamy:

$$E = U + U_w$$

Stąd napięcie na odbiorniku wynosi:

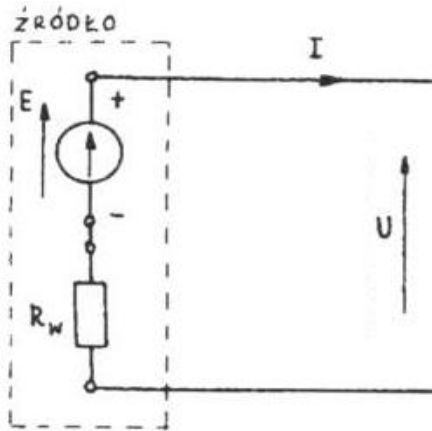
$$U = E - U_w$$

$$U = E - I \cdot R_w$$

**Wniosek:** Większy prąd powoduje powstanie spadku napięcia  $U_w$  na rezystancji wewnętrznej i w konsekwencji mniejsze napięcie na odbiorniku!!! Np. włączenie rozrusznika w samochodzie, który pobiera znaczny prąd powoduje przygasanie świateł.

# Stany pracy źródła

- Stan jałowy (brak obciążenia, prąd nie płynie  $I=0A$ ). W tym stanie możemy zmierzyć  $E$

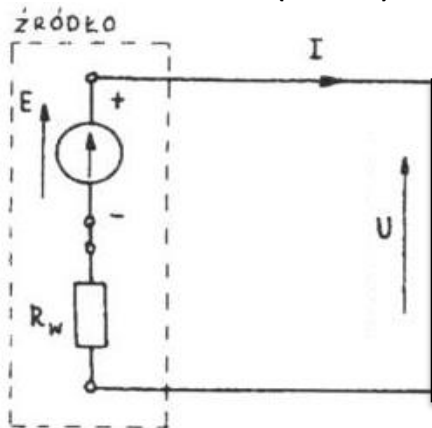


$$U = E - I \cdot R_w$$

Jeśli  $I=0$ , to

$$U = E$$

- Stan zwarcia ( $U=0V$ ). Powoduje przepływ maksymalnego prądu tzw. prądu zwarcia  $I_{zw}$ .

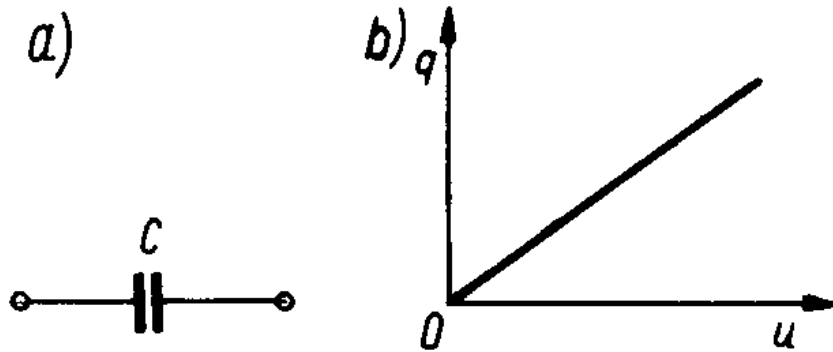


$$I_{zw} = E / R_w$$

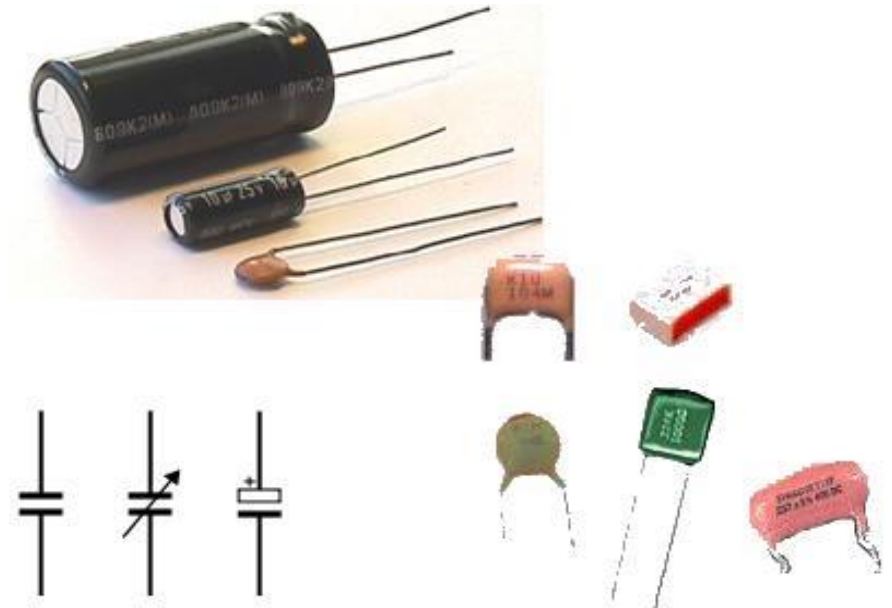
# Pojemność elektryczna



- Pojemność elektryczna  $C=Q/U$
- Jednostką pojemności jest Farad [F]
- Kondensator składa się z dwóch przewodników (zwanymi okładkami) rozdzielonych izolatorem (lub próżnią...).



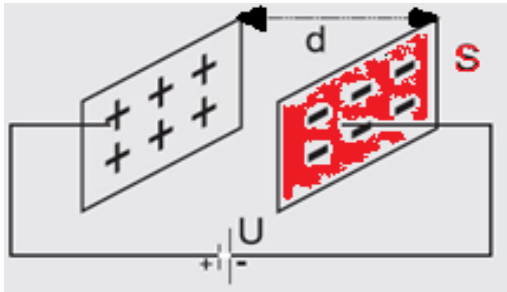
a) symbol kondensatora, b) zależność ładunku od napięcia  $C = Q/u$





# Pojemność kondensatora

- Od czego zależy pojemność kondensatora?



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

- $S$  – pole powierzchni okładek kondensatora
- $d$  – odległość pomiędzy okładzinami
- $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  - przenikalność elektryczna izolatora
- $\epsilon_0$  - przenikalność elektryczna próżni
- $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  [F/m]

# Łączenie kondensatorów

**Zadanie 5:** Oblicz pojemność wypadkową połączenia szeregowego i równoległego dwóch kondensatorów  $C_1=3\mu\text{F}$  i  $C_2=5\mu\text{F}$

- **Połączenie równoległe:**

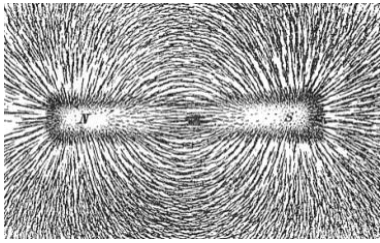
$$C = C_1 + C_2 = 8\mu\text{F}$$

- **Połączenie szeregowe:**

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{3} + \frac{1}{5} = \frac{5 + 3}{15} = \frac{8}{15}$$

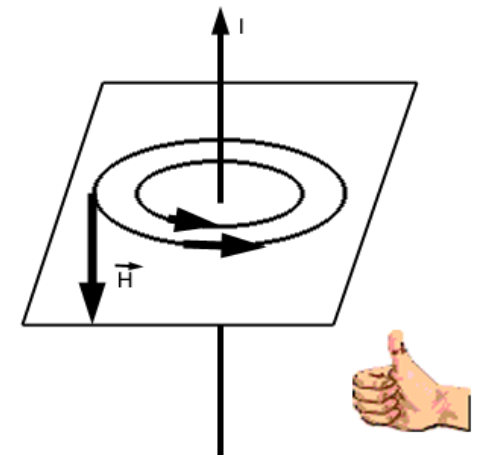
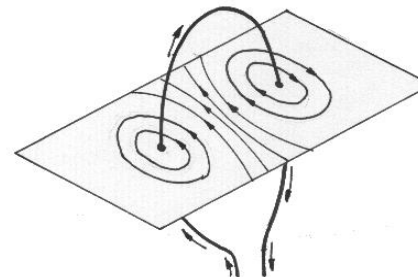
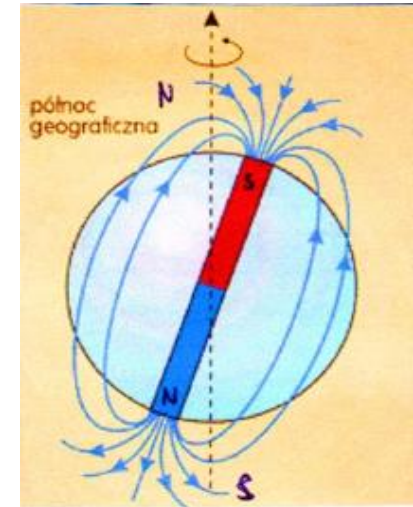
- Obliczyliśmy odwrotność pojemności, więc

- $C = 15/8 \mu\text{F} = 1\frac{7}{8}\mu\text{F} = 1.875\mu\text{F}$



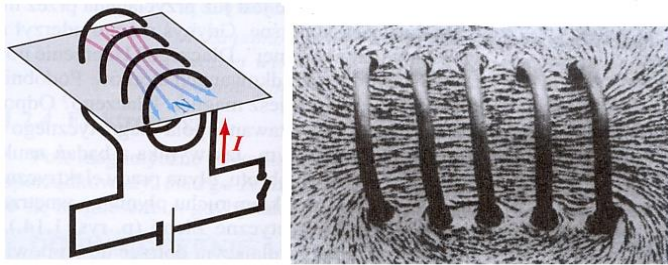
# Pole magnetyczne

- **Pole magnetyczne** – stan przestrzeni, w której siły działają na poruszające się ładunki elektryczne, a także na ciała mające moment magnetyczny
- **Źródła pola magnetycznego:**
  - Magnes
  - Przewód z prądem (elektromagnes)
- Obraz pola - linie pola magnetycznego
- **Reguła prawej dłoni** - jeśli prawą dłonią obejmiemy przewodnik elektryczny tak, że kciuk wskazuje kierunek przepływu prądu elektrycznego  $I$  w przewodniku, to zgięte palce wskażą kierunek i zwrot wektora natężenia pola magnetycznego  $H$  [A/m]

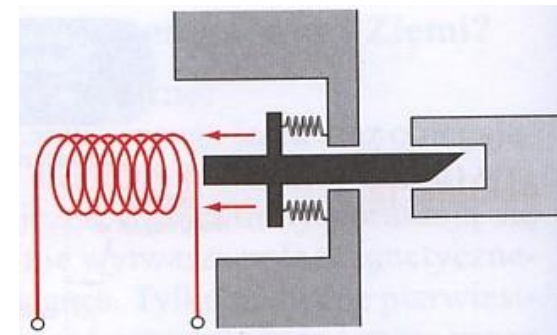


# Pole magnetyczne cewki

- Pole magnetyczne w cewce

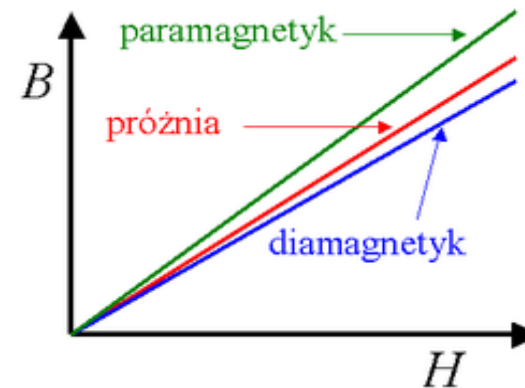


- **Elektromagnes** – urządzenie wytwarzające pole magnetyczne w wyniku przepływu przez nie prądu elektrycznego. Zbudowany jest z cewki nawiniętej zazwyczaj na rdzeniu ferromagnetycznym, o otwartym obwodzie magnetycznym
- Dzwonek elektryczny, dźwig elektromagnetyczny, zamek elektromagnetyczny



# Natężenie pola magnetycznego, indukcja magnetyczna

- $B = \mu H$
- Jednostką indukcji magnetycznej  $B$  jest Tesla [T]
- Natężenie pola magnetycznego  $H$  jest wielkością charakteryzującą pole magnetyczne niezależną od własności materiału – wartością zależną jest natomiast indukcja magnetyczna  $B$ .
- Własności magnetyczne materiału określa przenikalność magnetyczna  $\mu = \mu_0 * \mu_r$
- **Próżnia**  $\mu_r = 1$
- **Paramagnetyki**  $\mu_r > 1$ :
  - powietrze ( $\mu_r = 1.0000004$ )
  - Aluminium ( $\mu_r = 1.0000008$ )
- **Diamagnetyki**  $\mu_r < 1$ :
  - woda ( $\mu_r = 0.999991$ )
  - Miedź ( $\mu_r = 0.999999$ )
- **Ferromagnetyki**  $\mu_r \gg 1$ :
  - Stal (0.03% C) ( $\mu_r = \text{ok. } 2000$ )
  - Stal (9.99% C)



Strumień magnetyczny  $\Phi = BS$

Strumień przepływający przez powierzchnię  $S$  jest zdefiniowany jako iloczyn skalarny wektora indukcji magnetycznej i wektora powierzchni  $S$ .

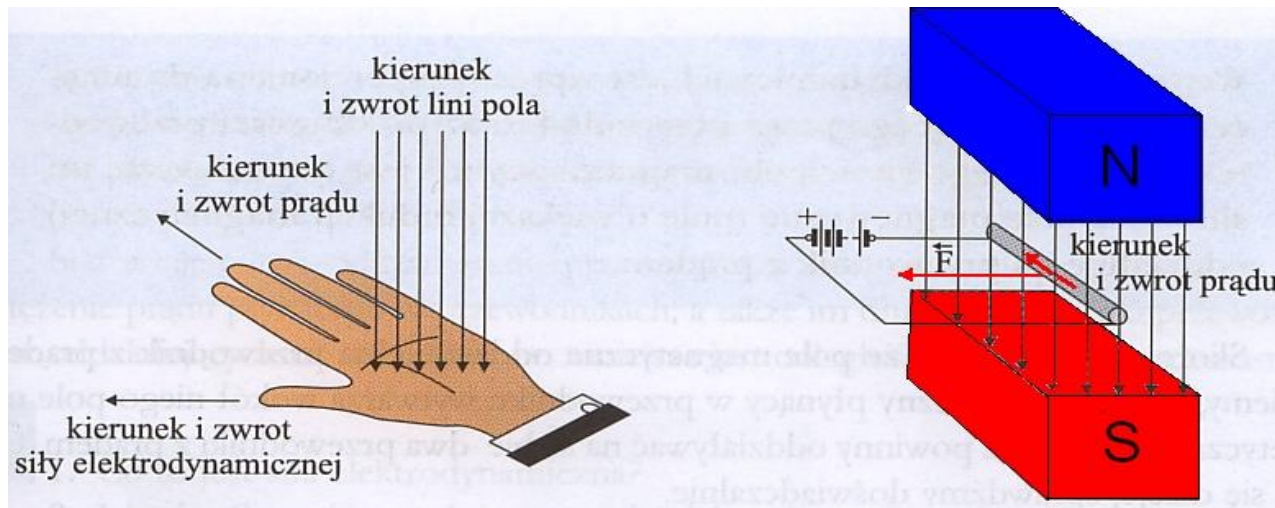
Jednostką strumienia indukcji magnetycznej jest weber (Wb).

# Ferromagnetyki

- **ferromagnetyk** – ciało, które wykazuje własności ferromagnetyczne. Znajdują się w nim obszary stałego namagnesowania (tzw. domeny magnetyczne), wytwarzające wokół siebie pole magnetyczne (jak małe magnesy). Do ferromagnetyków należą m.in. żelazo, kobalt, nikiel
- **Ferromagnetyki** dzieli się umownie na:
  - **twarde** – zachowują stan namagnesowania pomimo zmian zewnętrznego pola magnetycznego,
  - **miękkie** – tracą zewnętrzne namagnesowanie po usunięciu pola magnetycznego zachowując jedynie namagnesowanie reszkowe znacznie mniejsze od maksymalnego,
  - **półtwarde** – zachowują stan namagnesowania, ale jest on stosunkowo łatwy do usunięcia.
- Ferromagnetyki twarde stosuje się do wyrobu magnesów trwałych. Ferromagnetyki miękkie do budowy magnetowodów i rdzeni magnetycznych silników elektrycznych, transformatorów itp. w celu kształtowania pola magnetycznego. Ferromagnetyki półtwarde używane są np. do zapisu danych cyfrowych na dyskach lub kartach magnetycznych.

# Siła elektrodynamiczna

- **Reguła lewej dłoni** - reguła określająca kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej działającej na przewodnik z prądem elektrycznym umieszczony w polu magnetycznym:
  - jeśli lewą dłoń ustawi się tak, że linie indukcji pola magnetycznego wnikają prostopadle do dłoni, a 4 palce (bez kciuka) wskazują kierunek i zwrot prądu, to odchylony kciuk wskazuje zwrot siły elektrodynamicznej.

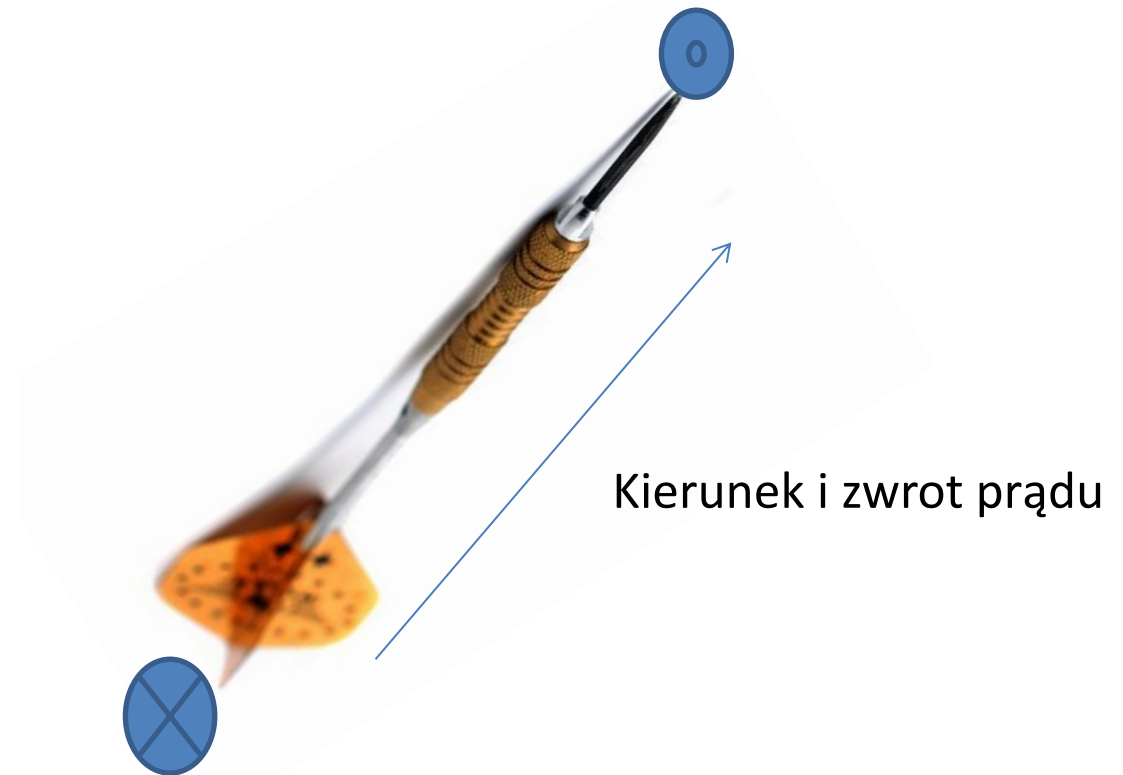
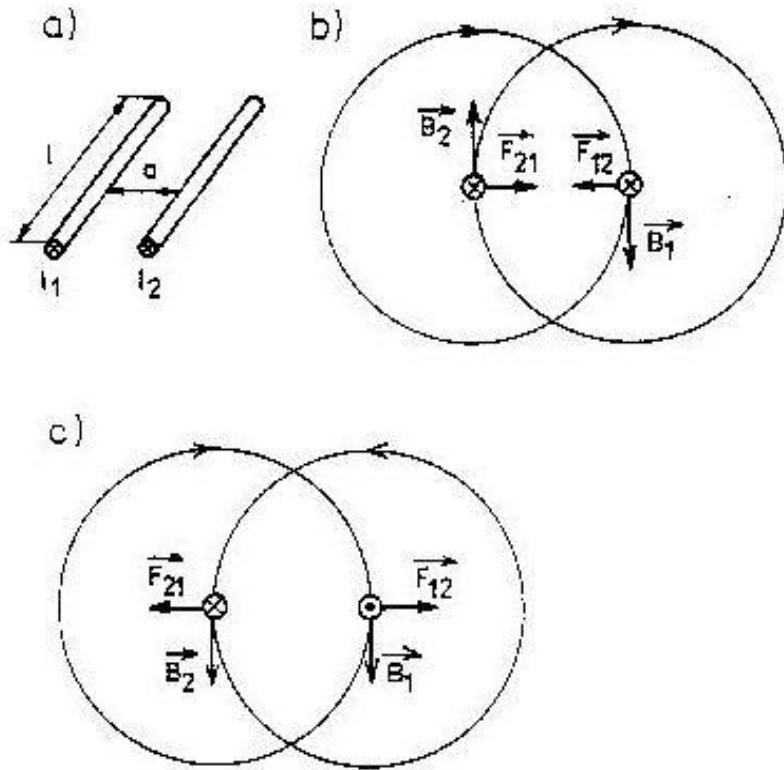


$$F = B I L \sin\alpha$$

Zastosowania siły elektrodynamicznej: **silniki, głośniki**

# Siła elektrodynamiczna

- Oddziaływanie przewodów z prądem na siebie



- b) prądy w przewodach mają ten sam zwrot – przyciąganie
- c) prądy w przewodach mają przeciwny zwrot - odpychanie



# Indukcja elektromagnetyczna

- **Indukcja elektromagnetyczna** - zjawisko powstawania siły elektromotorycznej  $\mathcal{E}$  w przewodniku na skutek zmian strumienia pola magnetycznego. Zjawisko to zostało odkryte w 1831 roku przez angielskiego fizyka **Michaela Faradaya**.

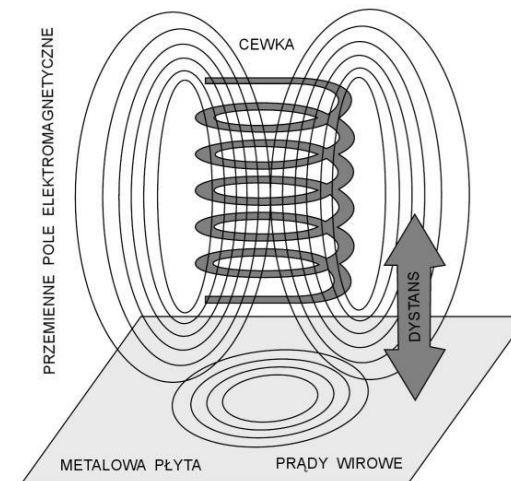
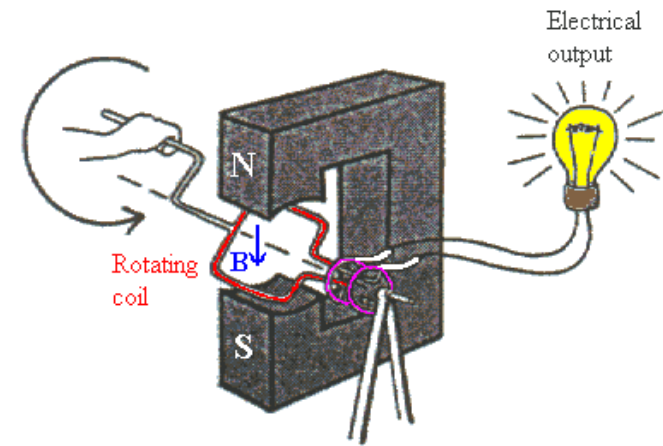
$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$



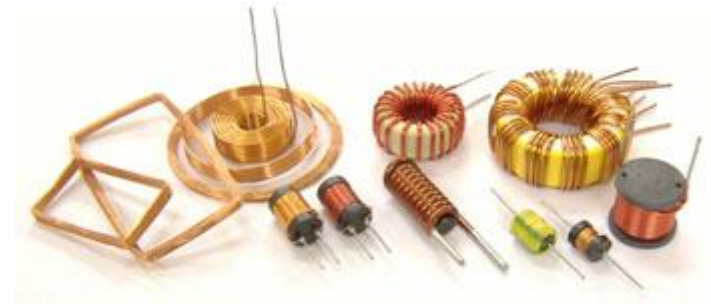
- Zmiana strumienia pola magnetycznego może wynikać z ruchu przewodnika lub źródła pola magnetycznego.
- **Indukcja elektromagnetyczna** jest obecnie podstawową metodą wytwarzania prądu elektrycznego oraz podstawą działania wielu urządzeń elektrycznych np. **prądnic, alternatorów, generatorów w elektrowniach, transformatorów, pieców indukcyjnych, silników indukcyjnych.**

# Indukcja - zastosowania

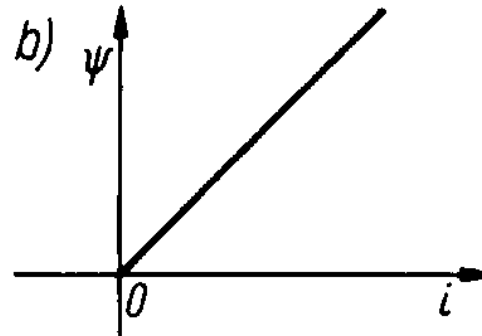
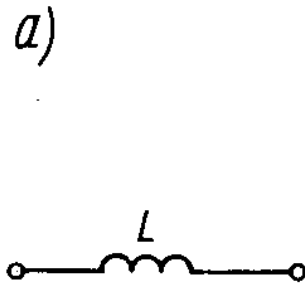
- Prądnica, alternator, „dynamo” – zmiana pola magnetycznego poprzez ruch przewodu powoduje indukowanie napięcia w przewodzie
- Piece indukcyjne - zmienne pole magnetyczne indukuje w przewodzącym materiale przepływ ogromnych prądów wewnątrz materiału. Prądy te nazywa się prądami wirowymi i powodują one nagrzewanie materiału
- Jak działa silnik indukcyjny???



# Cewki



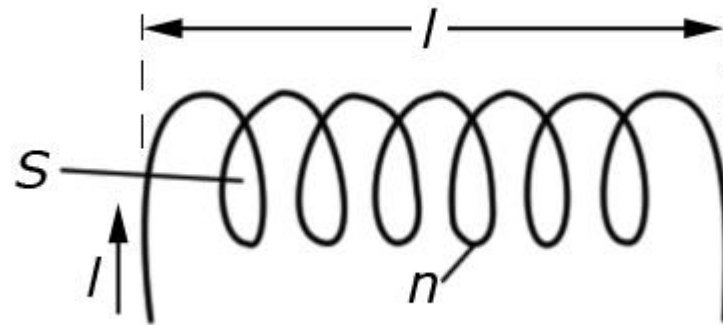
- Cewką nazywamy zwojnicę, której podstawowym parametrem jest indukcyjność.
- Cewki dzielimy na bezrdzeniowe (powietrzne) lub z rdzeniem ferromagnetycznym
- Jednostką indukcyjności jest henr [H].
- Cewka o indukcyjności 1H, daje siłę elektromotoryczną 1V, jeżeli prąd przepływający zmienia się z prędkością 1A/s ( $1\text{H} = 1\text{Vs/A}$ )



- a) symbol cewki, b) zależność strumienia od prądu w cewce  $L = \psi/i$

# Indukcyjność cewki

- $L = \mu n^2 S / L$



- $\mu$  – przenikalność magnetyczna (rdzenia)
- $S$  – powierzchnia przekroju
- $L$  – długość cewki
- $n$  – liczba zwojów

# Łączenie cewek

**Zadanie:** Oblicz indukcyjność wypadkową połączenia szeregowego i równoległego dwóch cewek  $L_1=4\text{mH}$  i  $L_2=12\text{mH}$

- **Połączenie szeregowe:**

$$L = L_1 + L_2 = 16\text{mH}$$

- **Połączenie równoległe:**

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{4} + \frac{1}{12} = \frac{3 + 1}{12} = \frac{4}{12}$$

- Obliczyliśmy odwrotność indukcyjności, więc
  - $L=12/4 \text{ mH} = 3\text{mH}$

# Transformator

**Transformator** – maszyna elektryczna służąca do przenoszenia energii elektrycznej prądu przemiennego drogą indukcji z jednego obwodu elektrycznego do drugiego, z zachowaniem pierwotnej częstotliwości. Zwykle zmieniane jest równocześnie napięcie elektryczne (wyjątek stanowi transformator separacyjny, w którym napięcie nie ulega zmianie) (wikipedia).

## Parametry transformatora:

W transformatorze idealnym (bez zstrat):

$$P_{we} = P_{wy}$$

$$U_{we} \cdot I_{we} = U_{wy} \cdot I_{wy}$$

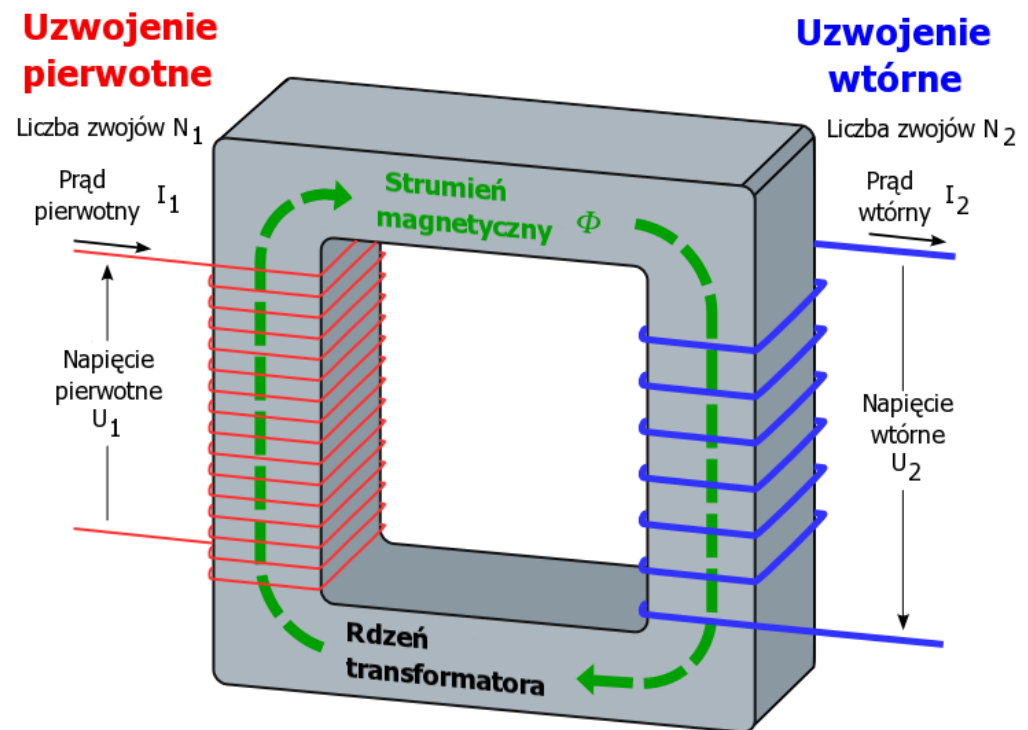
$$\frac{U_{we}}{U_{wy}} = \frac{I_{wy}}{I_{we}} = \frac{N_1}{N_2} = \eta$$

$\eta$  – przekładnia transformatora

$N_1$  – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego

$N_2$  – liczba zwojów uzwojenia wtórnego

**Wniosek:** jeżeli  $N_1 > N_2$  to  $U_{we} > U_{wy}$



# Transformator

**Transformator toroidalny** to transformator, który składa się z dwóch lub więcej nawiniętych uzwojeń na wspólnym rdzeniu o toroidalnym kształcie. Konstrukcja taka umożliwia, w stosunku do transformatorów kształtowych, mniejsze straty w rdzeniu, małą reaktancję rozproszenia jak również mniejszy poziom hałasu.

## Liczba zwojów

$$U_1 = 4.44 * f * z_1 * \Phi$$

$$U_2 = 4.44 * f * z_2 * \Phi$$

$z_1$  – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego

$z_2$  - liczba zwojów uzwojenia wtórnego

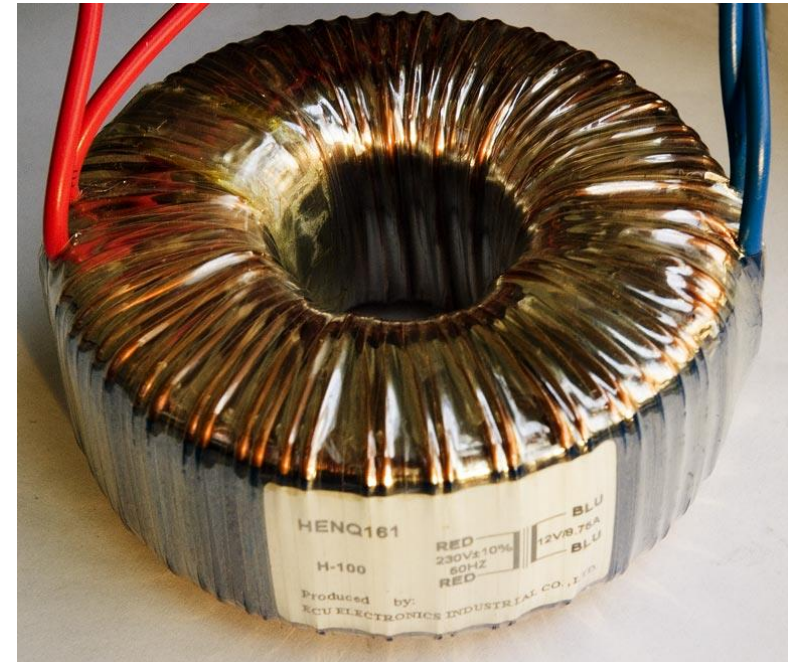
$f$  - częstotliwość

$\Phi$  – strumień magnetyczny (BS)

Maksymalny strumień wynika z zależności  $\Phi = BS$

**Wniosek:** Zwiększenie częstotliwości umożliwia zmniejszenie liczbę zwojów.

**Pytanie:** Co to jest autotransformator



# Transformator - obliczenia

Wyznacz liczbę zwojów transformatora toroidalnego o przekroju poprzecznym rdzenia  $6\text{cm}^2$ . Załóż indukcję w rdzeniu  $B=1\text{T}$ . Napięcie sieciowe  $U_1=230\text{V}/50\text{Hz}$ .

$$U_1 = 4.44 * f * z * \Phi$$

$$\Phi = B * S$$

$$S = 6\text{cm}^2 = 0.0006\text{m}^2$$

$$\text{cm} = 0.01\text{m} \quad | \quad ^2$$

$$\text{cm}^2 = 0.0001\text{m}^2$$

$$230 = 4.44 * 50 * z * 0.0006$$

$$z = 230 / (4.44 * 50 * 0.0006) = 230 / 0.1332 = 1726 \text{zwojów}$$

**Ile zwojów powinno posiadać uzwojenie wtórne jeżeli  $U_2=10\text{V}$**

$$U_1 / U_2 = Z_1 / Z_2$$

$$230 / 10 = 1726 / z_2$$

$$Z_2 = 1726 / 23 = 75 \text{zwojów}$$



# Transformatory impulsowe

**Zasilacze impulsowe** prawie całkowicie wyparły zasilacze transformatorowe.

## Zalety:

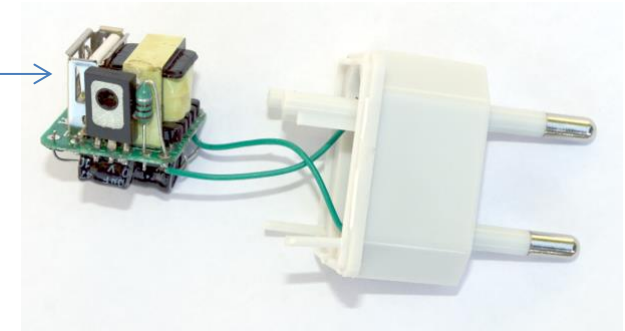
- większa sprawność (mniejsze straty)
- małe rozmiary i waga
- szeroki zakres napięć wejściowych np. 100..240V
- odporność na zakłócenia i zaniki napięcia
- możliwość łatwego wbudowania zabezpieczeń przeciwzwarciowych

## Wady:

- wprowadzają zakłócenia w.cz.
- czasami wymagają obciążenia wstępnego
- skomplikowana budowa pod względem ilości części potrzebnych do pracy, przez co zasilacze impulsowe mają być droższe niż tradycyjne.

Zasilacz impulsowy

gniazdo USB →



Zasilacz transformatorowy



# Silniki elektryczne

**Silnik elektryczny** – maszyna elektryczna, w której energia elektryczna zamieniana jest na energię mechaniczną.

## Rodzaje silników – podział ze względu na zasilanie

- Silniki prądu stałego (z magnesem trwałym, z uzwojeniem wzbudzenia)
- Silniki prądu zmiennego (indukcyjne)
- Silniki uniwersalne (silniki szeregowo)

## Silniki stosowane w robotyce

- **Silniki skokowe** (krokowe) - stosowane wszędzie tam, gdzie kluczowe znaczenie ma możliwość precyzyjnego sterowania ruchem
- **Silniki bezszczotkowe**, silnik BLDC (ang. BrushLess Direct-Current motor) – rodzaj silnika elektrycznego zasilanego przez prąd stały, w którym zamiast szczotek zastosowano elektrycznie sterowany komutator, cewki są nieruchome, a magnesy znajdują się na wirniku.

# Silniki prądu stałego

## Rodzaje silników prądu stałego

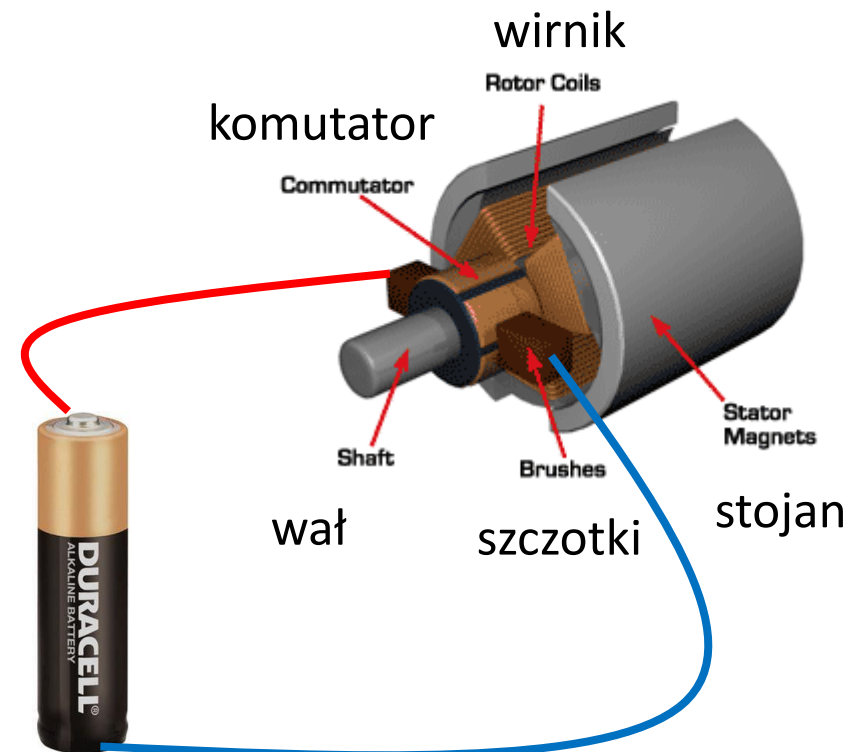
- **Silnik elektryczny obcowzbudny** - silnik elektryczny prądu stałego, w którym uzwojenie wzbudzące jest zasilane z oddzielnego źródła napięcia (innego niż uzwojenie twornika). Silniki obcowzbudne ze względu na identyczne właściwości z silnikami wzbudzanych magnesami trwałymi rozpatruje się łącznie. Stosowane głównie w napędach wymagających regulacji prędkości w szerokim zakresie obrotów.
- **Silnik elektryczny samowzbudny** – silnik prądu stałego z elektromagnesem w stojanie mogą mieć połączone uzwojenia stojana i wirnika szeregowo, równoległe (bocznikowo) lub w sposób mieszany.
  - **Silniki szeregowe** zalety (duży moment), wady (rozbieganie się), zastosowania (tramwaj, wózki akumulatorowe, rozruszniki, dźwigi, wentylatory)
  - **Silniki bocznikowe** zalety (mała zmiana prędkości obrotowej na skutek zmiany obciążenia). Stosowany głównie w napędach obrabiarek, pomp, dmuchaw, kompresorów
  - **Silniki szeregowo-bocznikowe** – wykorzystują zalety obu rodzajów silników. Stosowany jest zazwyczaj jako silniki dużych mocy, tam gdzie występuje ciężki rozruch: do napędu walcarek, pras, dźwigów

# Silniki prądu stałego

Silnik elektryczny prądu stałego zbudowany jest z dwóch magnesów zwróconych do siebie biegunami różnoimiennymi, tak aby pomiędzy nimi znajdowało się pole magnetyczne. Pomiedzy magnesami znajduje się przewodnik w kształcie ramki podłączony do źródła prądu poprzez komutator i ślizgające się po nim szczotki. Przewodnik zawieszony jest na osi, aby mógł się swobodnie obracać. Na ramkę, w której płynie prąd elektryczny, działa para sił elektrodynamicznych z powodu obecności pola magnetycznego. Siły te powodują powstanie momentu obrotowego.

## Budowa silnika

- **Stojan** (magnes trwały lub elektromagnes – uzwojenie wzbudzenia)
- **Wirnik z uzwojeniem twornika** – uzwojenie zawieszony na osi wału;
- **Komutator** - przełącza synchronicznie kierunek prądu w uzwojeniach wirnika wraz z jego obrotem.
- **Szczotki** – doprowadzają prąd do cewek wirnika



# Silniki prądu zmiennego

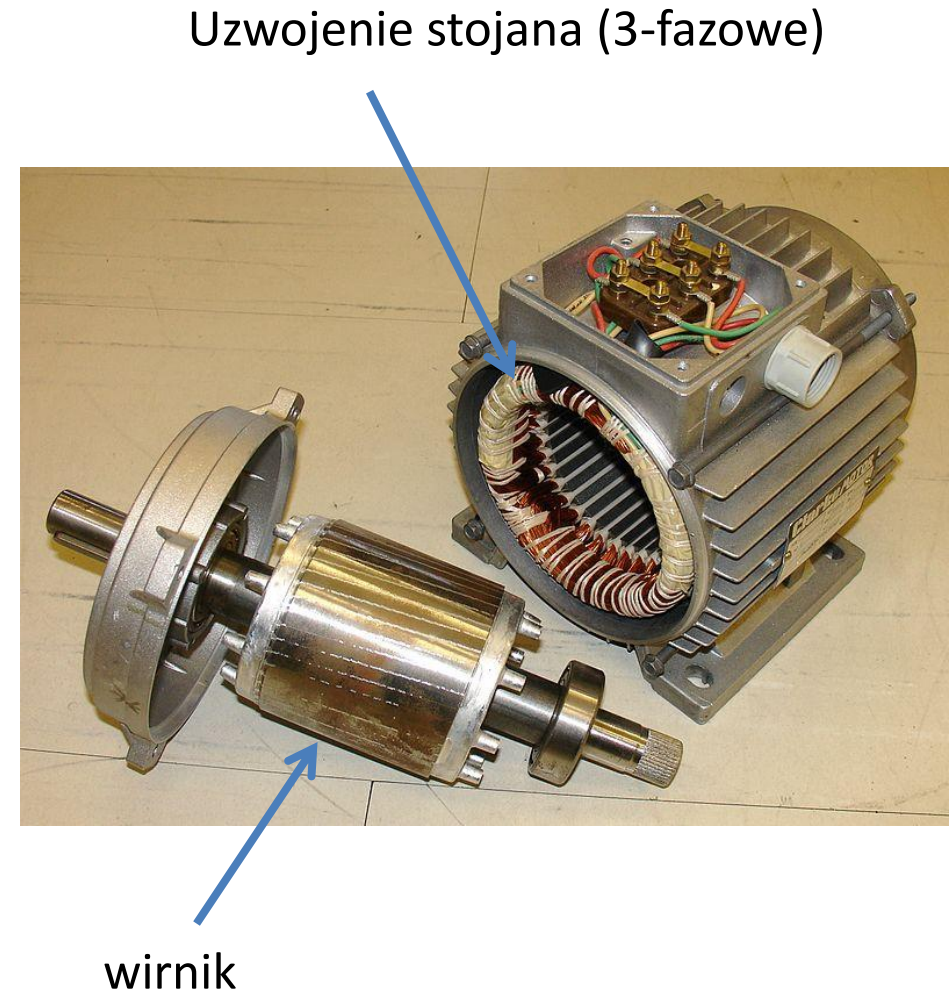
## Indukcyjne 3-fazowe

- Wirujące pole magnetyczne - wytwarzane jest np. przez uzwojenia stojana zasilane z sieci trójfazowej
- Na wirnik w postaci zwartych zwojów (klatkowy) umieszczony na wale silnika działa siła powodująca jego ruch

## Silniki indukcyjne ze względu na konstrukcję wirnika dzielimy na:

- **klatkowe** (wirnik stanowi „klatka” z prętów połączonych na końcach pierścieniami zwierającymi),
- **pierścieniowe** (wirnik posiada uzwojenia wyprowadzone na zewnątrz za pośrednictwem pierścieni ślizgowych).

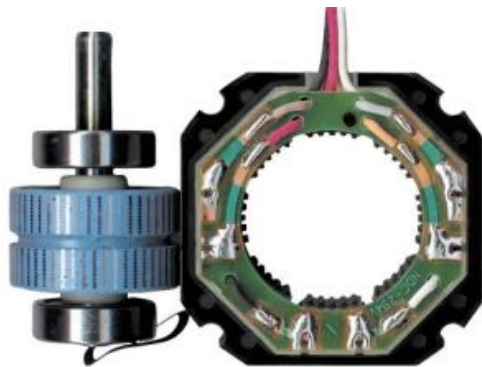
<http://www.elektroonline.pl/a/5169/3,Maszyny-elektryczne>



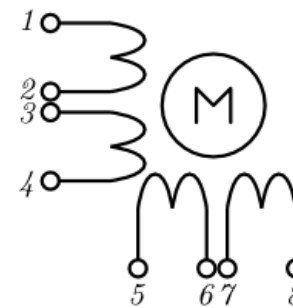
# Silniki krokowe (skokowe)



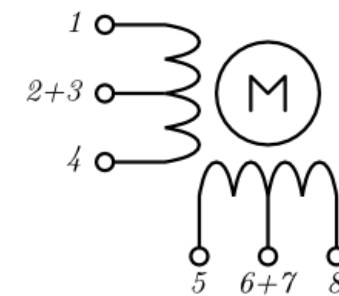
- Bipolarne (zmiana kierunku prądu w uzwojeniach 1-4, 4-1, 5-8, 8-5)
- Unipolarne (1 wspólny przewód + 4 uzwojenia dołączane kolejno do jednokierunkowego źródła napięcia: 1, 4, 5, 8)



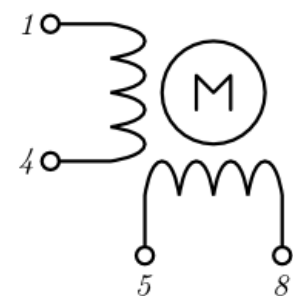
*Bipolar 8 wires*



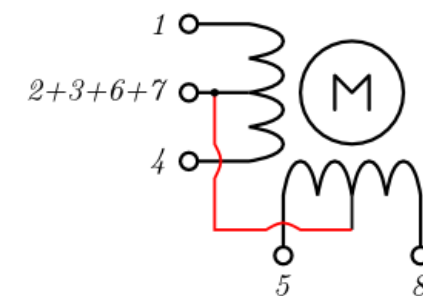
*Bipolar 6 wires*



*Bipolar 4 wires*



*Unipolar 5 wires*



# Silniki krokowe c.d.

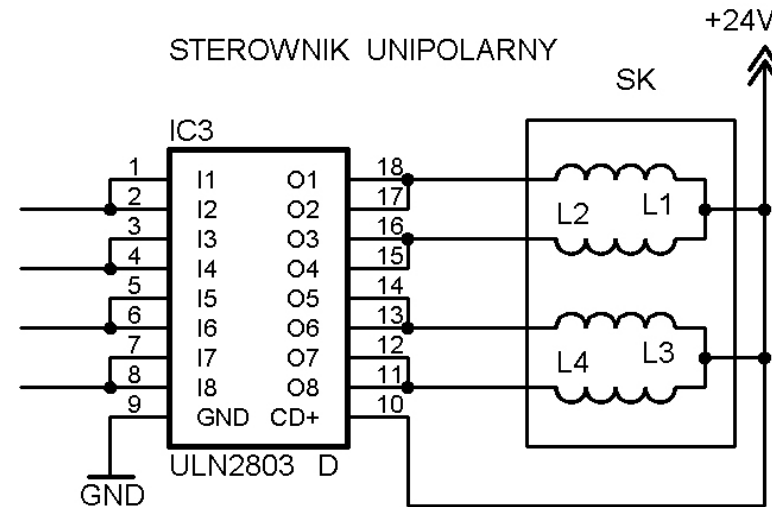
## Sterownie silnikiem unipolarnym

- **5V** 0V 0V 0V **5V** 0V 0V 0V
- 0V **5V** 0V 0V 0V **5V** 0V 0V
- 0V 0V **5V** 0V 0V 0V **5V** 0V
- 0V 0V 0V **5V** 0V 0V 0V **5V**

## Zmiana kierunku

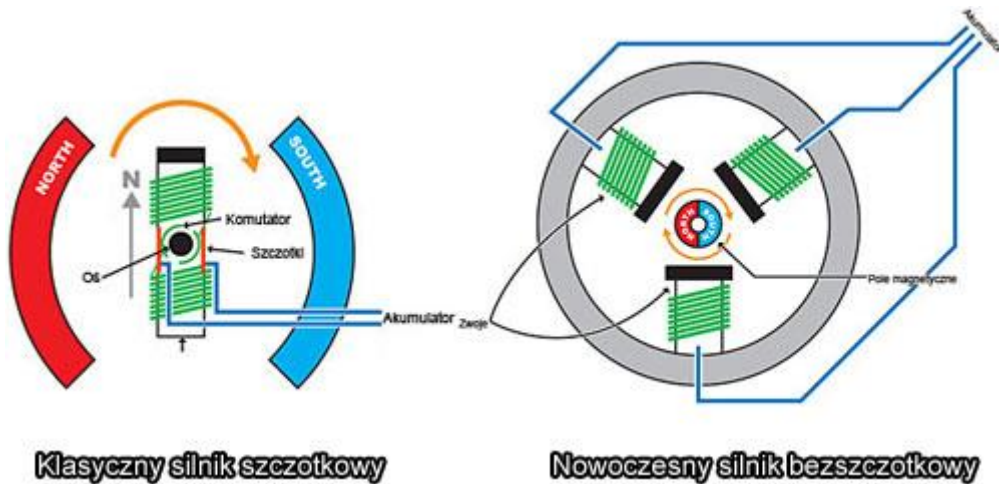
- 0V 0V 0V **5V**
- 0V 0V **5V** 0V
- 0V **5V** 0V 0V
- **5V** 0V 0V 0V

## Sterowniki step/dir



# Silniki BLDC

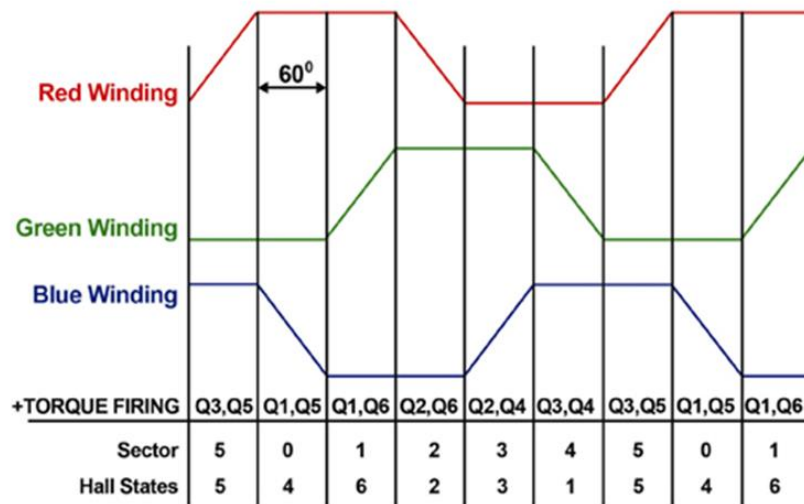
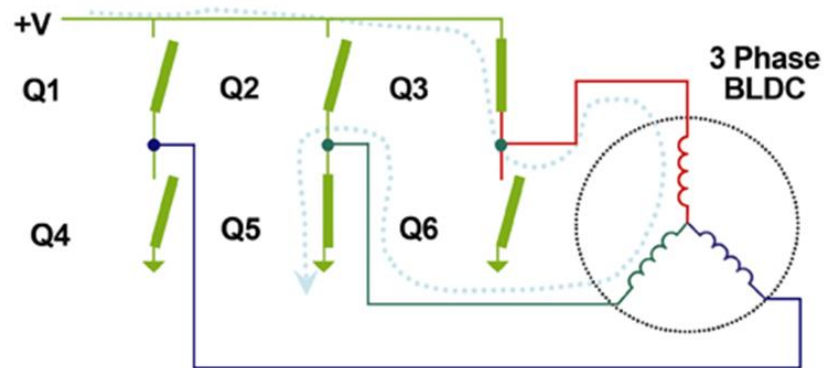
- BrushLess Direct Current motor



- Silnik modelarski z sterownikiem
- **Zastosowania:** modelarstwo, samochody, rowery, wiatraki komputerowe, napędy HDD/FDD

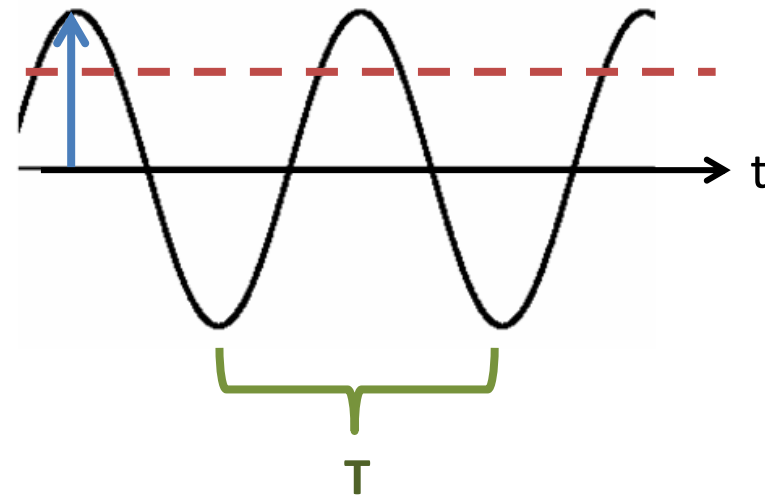


# Silniki BLDC



# Przebiegi zmienne, przemienne

- Napięcie w sieci elektrycznej
  - Sygnał sinusoidalny
  - **Amplituda  $A = 324V$**
  - **Wartość skuteczna  $230V = \frac{A}{\sqrt{2}}$**
  - **Częstotliwość  $50Hz$       $f=1/T$**
  - **Sygnał okresowy, okres  $T = 0.02s = 20ms$**
  - **Sygnał jest okresowy, gdy  $f(x) = f(x+T)$**



**Wartość skuteczna** przebiegu zmiennego jest to taka wartość prądu stałego, która w tym samym czasie, na takim samym obciążeniu wydzieli taka samą ilość energii.

# Elementy RLC

Element	Prąd stały	Dziedzina czasu	Dziedzina częstotliwości (impedancja)	Przesunięcie fazowe pomiędzy prądem i napięciem
R	$R=U/I$	$U=RI$	$R=U/I$	Napięcie na rezystancji jest w fazie z prądem
L	Zwarcie (rezystancja przewodu)	$u = L \cdot \frac{di}{dt}$	$X_L = 2\pi fL$	Napięcie w elemencie indukcyjnym wyprzedza prąd o $90^\circ$
C	Rozwarcie	$i = C \cdot \frac{du}{dt}$	$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$	Napięcie w elemencie pojemnościowym opóźnia się względem prądu o $90^\circ$

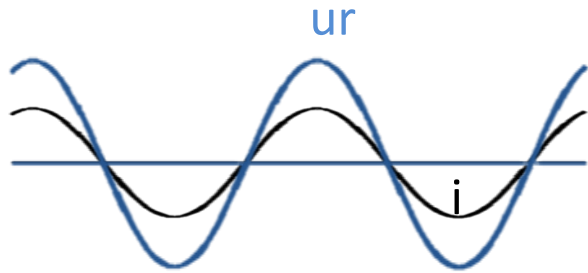
$\frac{di}{dt}$  – szybkość zmian prądu

$\frac{du}{dt}$  - szybkość zmian napięcia

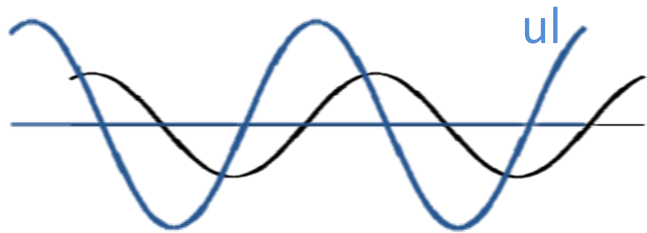
$X_L$  – reaktancja indukcyjna (opór bierny)

$X_C$  – reaktancja pojemnościowa (opór bierny)

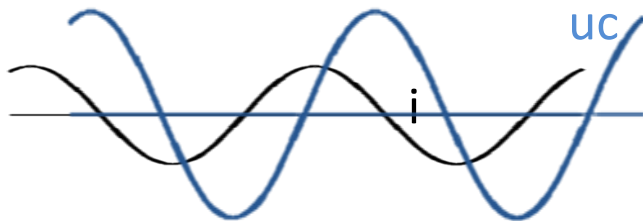
# Przebiegi napięcia i prądu



Napięcie na rezystancji jest w fazie z prądem



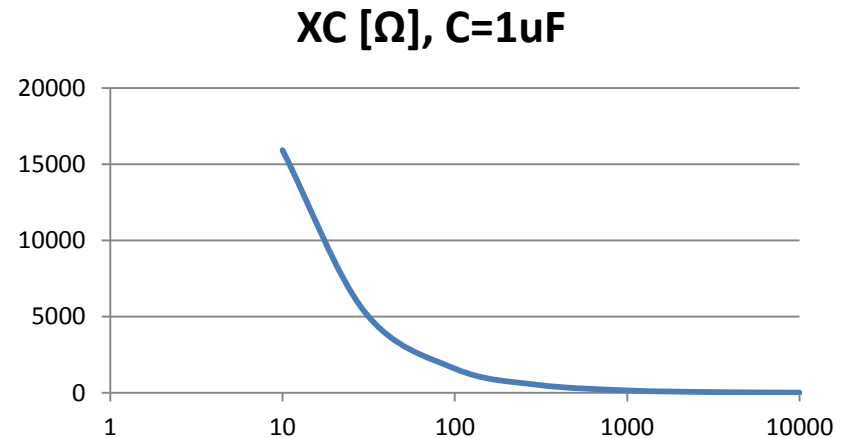
Napięcie w elemencie indukcyjnym wyprzedza prąd o  $90^\circ$



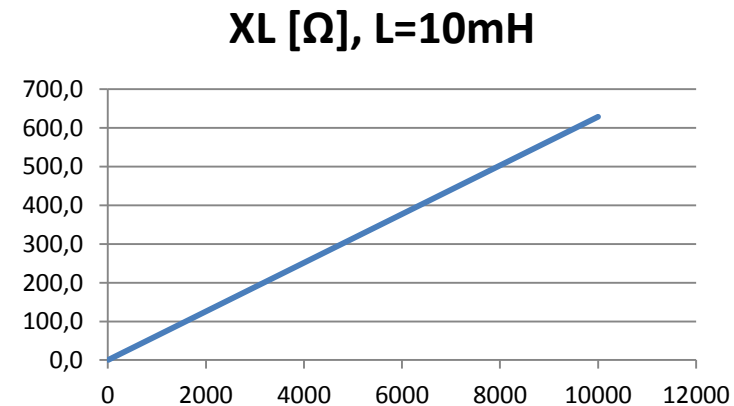
Napięcie w elemencie pojemnościowym opóźnia się względem prądu o  $90^\circ$

# Reaktancja (opór bierny)

- $X_C$  – reaktancja pojemnościowa
- Maleje przy zwiększaniu częstotliwości
- $X_C = \frac{1}{2\pi f C} [\Omega]$



- $X_L$  – reaktancja indukcyjna
- Rośnie przy zwiększaniu częstotliwości
- $X_L = 2\pi f L [\Omega]$

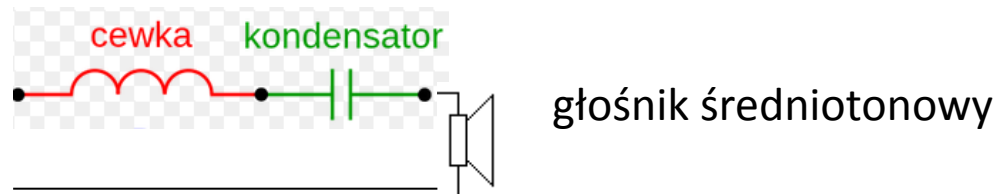


# Zwrotnica głośnikowa

- Kondensator ma mniejszy opór przy dużych częstotliwościach, stąd szeregowe połączenie z odbiornikiem tworzy filtr górnoprzepustowy
- Cewka ma mały opór dla małych częstotliwości, stąd szeregowe połączenie z odbiornikiem tworzy filtr dolnoprzepustowy

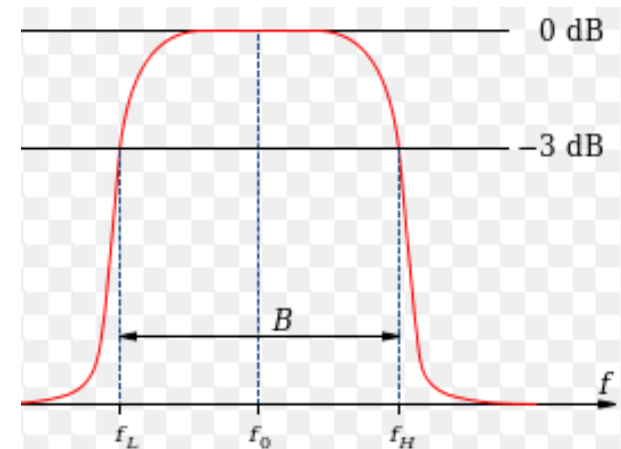


Filtr pasmowo przepustowy ("środkowoprzepustowy")

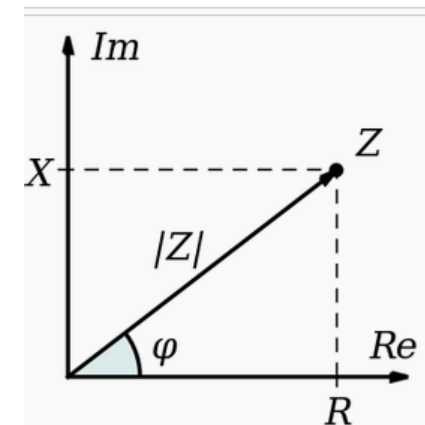


Szeregowy obwód rezonansowy  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$

Dla  $f_0$  – impedancja  $Z$  szeregowego obwodu jest najmniejsza



# Impedancja



- Rezystancja  $R$  [ $\Omega$ ]
- Reaktancja (opór bierny)  $X - X_L, X_C$  [ $\Omega$ ]
- Impedancja  $Z$  – wielkość charakteryzująca zależność między natężeniem prądu i napięciem w obwodach prądu zmiennego  $\rightarrow Z=U/I$  [ $\Omega$ ].

**Zadanie.** Wyznacz impedancję szeregowego obwodu RL o następujących parametrach  $R=100\Omega$  i  $L=1H$ .  
Częstotliwość  $f=50Hz$

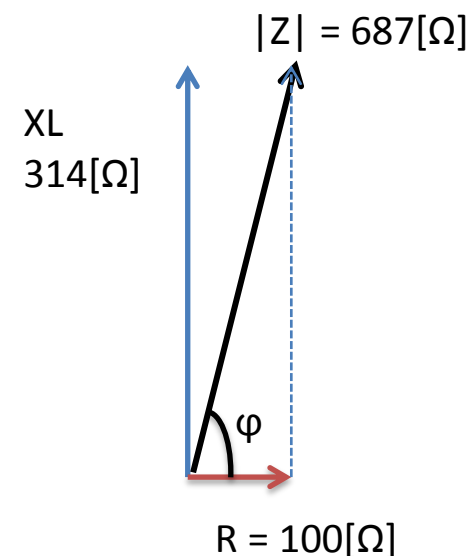
$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 1 = 314[\Omega]$$

$$\tan(\varphi) = X/R$$

$$\varphi = \text{atan}(X/R) \rightarrow \text{Google: atan}(314/100) \text{ to deg} \rightarrow 72.33\text{deg}$$

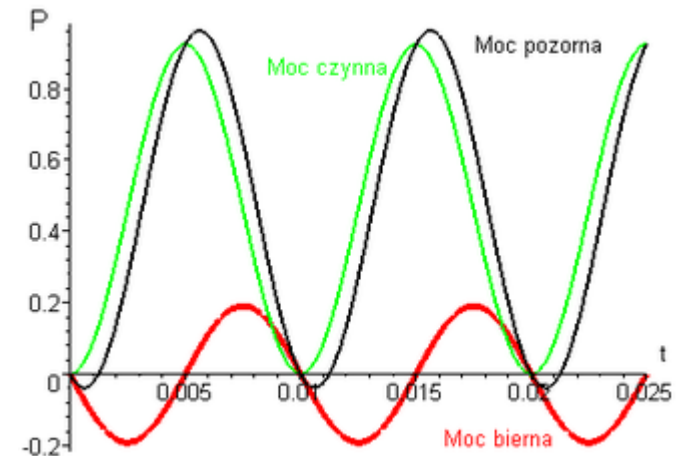
$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\text{Google: sqrt}(100^2+314^2) \text{ 329.5}[\Omega]$$

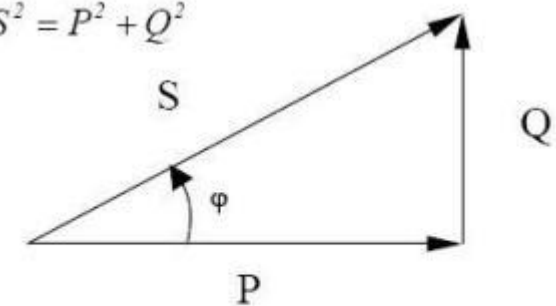


# Moc czynna, bierna, pozorna

- **Moc czynna (P)** – w układach prądu przemiennego (również prądu zmiennego) część mocy, którą odbiornik pobiera ze źródła i zamienia na pracę lub ciepło. W układach prądu stałego cała moc jest mocą czynną. Jednostką mocy czynnej jest wat [W].
- **Moc bierna (Q)** - Moc bierna w obwodach prądu zmiennego jest wielkością opisującą pulsowanie energii elektrycznej między elementami obwodu elektrycznego. Występowanie mocy biernej powoduje zwiększenie natężenia prądu co zwiększa straty energii elektrycznej w urządzeniach wytwarzających i przesyłających energię elektryczną prądu przemiennego. Jednostka mocy biernej jest war [Var]
- **Moc pozorna (S)** - wielkość fizyczna określana dla obwodów prądu przemiennego. Wyraża się ją jako iloczyn wartości skutecznych napięcia i natężenia prądu:  $S=UI$ . Jednostka mocy pozornej jest voltoamper [VA].



$$S^2 = P^2 + Q^2$$



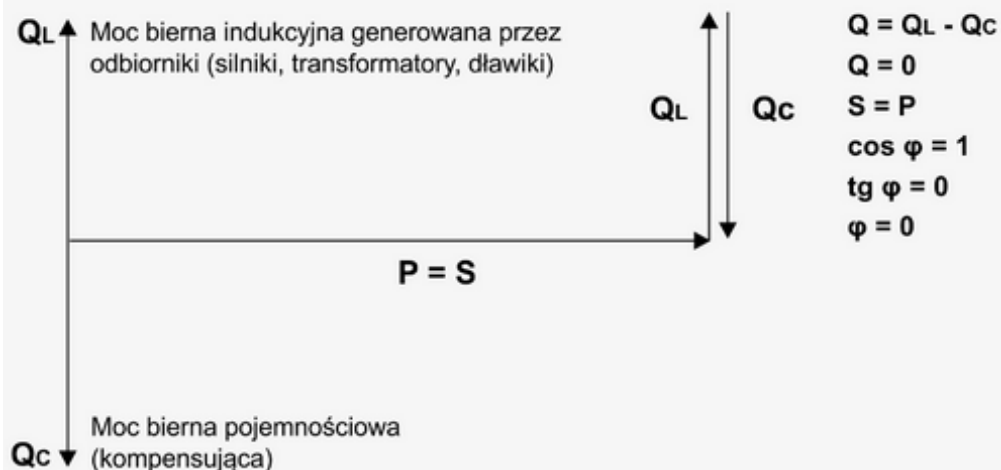
Współczynnik mocy  $\cos \varphi = \frac{P}{S}$



# Kompensacja mocy biernej

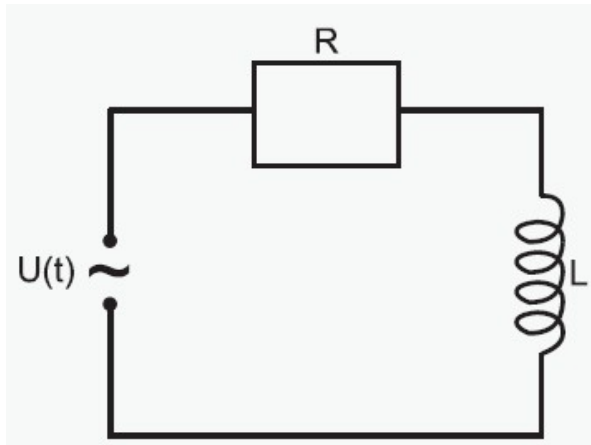
- Optymalną sytuacją jest taka, w której moc pozorna **S** jest równa mocy czynnej **P**, a więc taka, w której moc bierna **Q** ma wartość 0. Współczynnik mocy  $P/S = 1$ .
- Występowanie mocy biernej powoduje zwiększenie natężenia prądu co zwiększa straty energii elektrycznej w urządzeniach wytwarzających i przesyłających energię elektryczną prądu przemiennego (generatorach, liniach przesyłowych i transformatorach).
- Duzi odbiorcy energii (fabryki) są rozliczani również z mocy biernej, ponadto mają zazwyczaj określony umownie minimalny dopuszczalny współczynnik mocy.
- Do kompensacji mocy biernej stosuje się elementy pojemnościowe (dla odbiorników indukcyjnych) i odwrotnie

## Pełna kompensacja mocy biernej



# Zadanie obliczeniowe

- Oblicz reaktancję cewki  $X_L$ , impedancję obwodu -  $Z$ , wartość skuteczną prądu  $I$  oraz moce  $P$ ,  $Q$ ,  $S$  i współczynnik mocy  $\cos(\varphi)$
- Dane:  $R=10[\Omega]$ ,  $L=100\text{mH}$ ,  $U=230\text{V}/50\text{Hz}$



$$X_L = 31.4[\Omega]$$

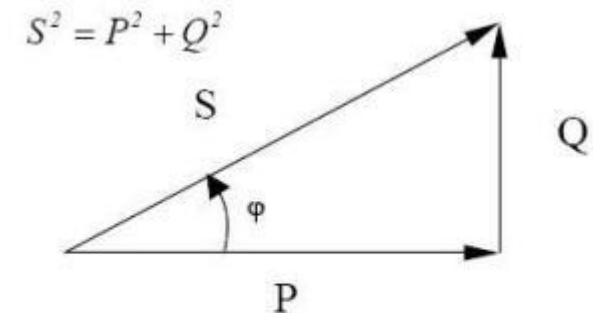
$$|Z| = \sqrt{10^2 + 31.4^2} = \sqrt{1085} = 33[\Omega]$$

$$I = \frac{230}{33} = 7[\text{A}], \quad P = 490[\text{W}], \quad Q = 1538[\text{Var}]$$

$$S = U \cdot I = 230 \cdot 7 = 1610[\text{VA}]$$

$$X_L = 2\pi fL$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

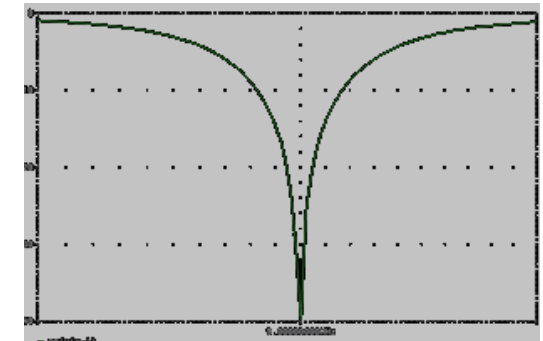
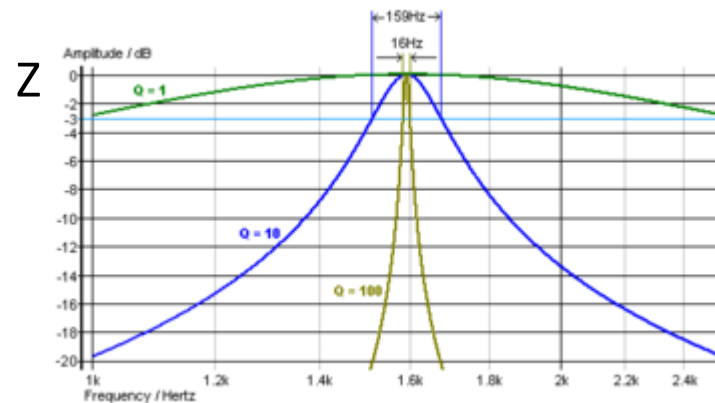
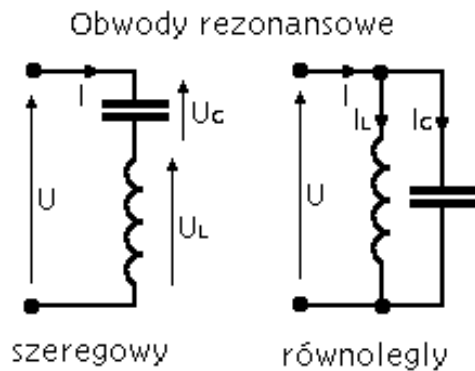


Współczynnik mocy  $\cos \varphi = \frac{P}{S}$

$$I = \frac{U}{Z}, P = I^2 \cdot R, Q = I^2 \cdot X_L$$

# Obwody rezonansowe

- Częstotliwość rezonansowa:  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$



- Szeregowy obwód rezonansowy ma dla częstotliwości  $f_r$  najmniejszą impedancję
- Równoległy obwód rezonansowy ma dla częstotliwości  $f_r$  największą impedancję