

Kurs doskonalący z zakresu radiolokacji i telekomunikacji

WYBRANE ZAGADNIENIA Z ELEKTROTECHNIKI I ELEKTRONIKI MIKROFALOWEJ

prof. dr hab. inż. Mateusz Pasternak

110/80, 102/45

261 83 76 67, 26 83 92 23

mateusz.pasternak@wat.edu.pl

<http://mpasternak.wel.wat.edu.pl/Dydaktyka/dydaktyka.html>

Lp.	Temat/tematyka zajęć	liczba godz.	
		wyk.	lab.
1.	Podstawowe własności prądu elektrycznego i prawa fizyczne związane z elektrycznością i magnetyzmem. Podstawowe pojęcia i prawa elektromagnetyzmu.	2	
2.	Obwody prądu zmiennego wielkiej częstotliwości. Charakterystyczne cechy techniki mikrofal. Fale elektromagnetyczne i ich właściwości.	2	
3.	Transformacyjne własności linii przesyłowych. Linia długa. Rozkłady napięć, prądów i impedancji w linii długiej dla różnego typu obciążeń. Wykres Smith'a.	2	2
4.	Mikrofalowe linie przesyłowe. Linia koncentryczna, linie mikropaskowe. Falowody prostokątne i cylindryczne.	2	2
5.	Metody i układy dopasowania impedancji. Dopasowanie dwóch impedancji rzeczywistych. Dopasowanie impedancji rzeczywistej i zespolonej.	2	
6.	Podstawowe typy rezonatorów i filtrów mikrofalowych. Sposoby realizacji reaktancji w zakresie mikrofalowym. Sposoby sprzęgania rezonatorów z prowadnicą mikrofalową.	2	
7.	Mikrofalowe elementy ferrytowe. Własności ferrytów. Zjawiska rezonansu ferromagnetycznego i rotacji Faradaya. Izolatory ferrytowe, przesuwniki fazy, cyrkulatory ferrytowe.	2	
8.	Mikrofalowe elementy bierne. Obciążenia dopasowane, zwieracze regulowane, tłumiki stałe i regulowane, przesuwniki fazy, mikrofalowe dzielniki mocy, sprzęgacze kierunkowe, złącza, linie opóźniające.	2	2
Razem		20	

Literatura

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Podstawy fizyki. T. 3 Elektryczność i magnetyzm ISBN: 978-83-01-14076-2, PWN 2012
2. OpenStax Polska, Fizyka dla szkół wyższych, wersja darmowa
3. M. Pasternak, Podstawy techniki mikrofal, e-book, Warszawa 2002
4. M. Golio, The RF and Microwave Handbook, wyd. 2, CRC Press 2008.

**Warunkiem zaliczenia przedmiotu
jest uzyskanie co najmniej połowy punktów
z końcowego testu sprawdzającego**

Podstawowe własności prądu
elektrycznego i prawa fizyczne związane
z elektrycznością i magnetyzmem

Podstawowe pojęcia i prawa
elektromagnetyzmu

Pojęcia podstawowe i jednostki miar

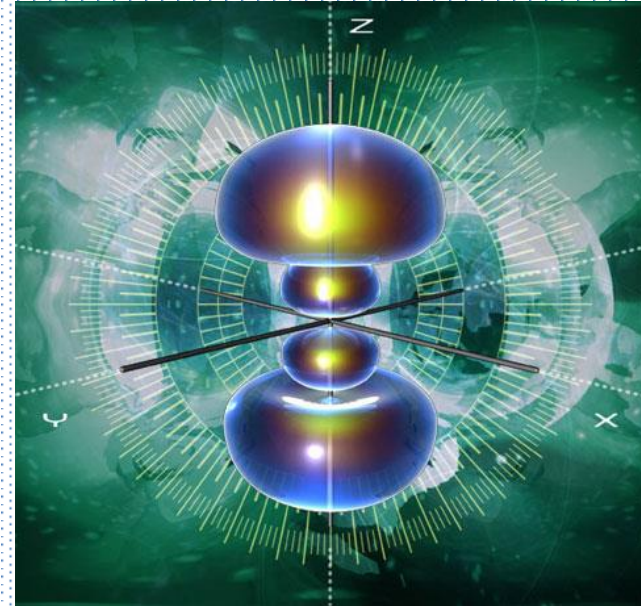
Jądro atomu składa się z protonów i neutronów. Ładunek dodatni protonów jest równy co wartości ładunkowi krążących wokół jądra elektronów.

Neutrony są elektrycznie obojętne – nie posiadają ładunku.

Atom (grupa atomów tj. cząsteczka) pozbawiony co najmniej jednego elektronu ma ładunek dodatni i nosi nazwę **JONU DODATNIEGO**

Atom (cząsteczka), do którego dołączył się co najmniej jeden elektron nosi nazwę **JONU UJEMNEGO**

ŁADUNKI = elektrony lub jony



Oznaczenie ładunków jest umowne

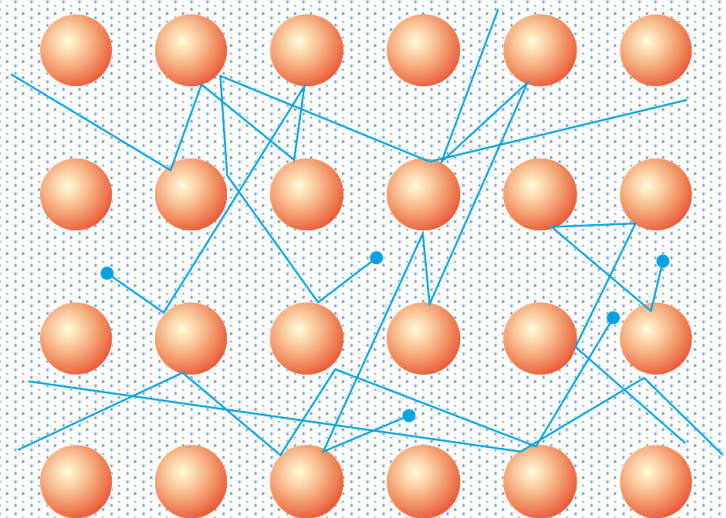
- za dodatnie uważa się takie, które gromadzą się na pręcie szklanym pocieranym jedwabiem
- za ujemne, ładunki gromadzące się na pręcie żywicznym pocieranym wełną

Elektron – elementarny nośnik ładunku elektrycznego $Q = 1,6 \cdot 10^{-19} [C]$

Elektron nie ma wymiarów, ale ma ładunek i masę spoczynkową równą ok. $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ czyli ponad 1800 razy mniejsza od protonu i neutronu

Jeżeli ilość energii dostarczonej do atomu jest dostatecznie duża, to elektrony mogą pokonać siły wiążące je z jądrem i stać się elektronami swobodnymi.

Zgodnie z modelem Drudego elektrony te poruszając się po metalu zachowują się jak gęsty gaz i zderzają z nieruchomymi jonami. Ich ruch jest chaotyczny.



Liczba elektronów swobodnych w jednostce objętości metalu może być oszacowana z zależności:

$$n = \frac{ZN_{Av}\rho}{A}$$

Z - liczba elektronów walencyjnych

N_{Av} – stałą Avogadro

ρ – gęstość metalu

A – masa atomowa metalu

$0,9 \cdot 10^{22} / \text{cm}^3$ dla cezu - $24,7 \cdot 10^{22} / \text{cm}^3$ dla berylu

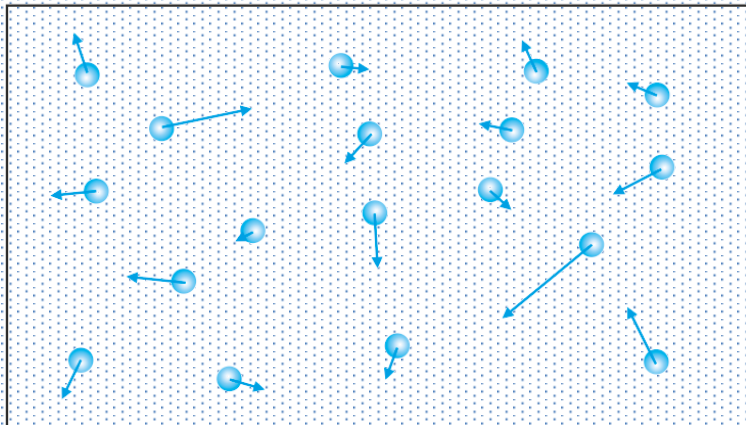
$7 \cdot 10^{18}$ szacunkowa liczba ziarenek piasku na świecie

Prąd jest ruchem ładunków wywołanym poprzez działanie pola elektrycznego

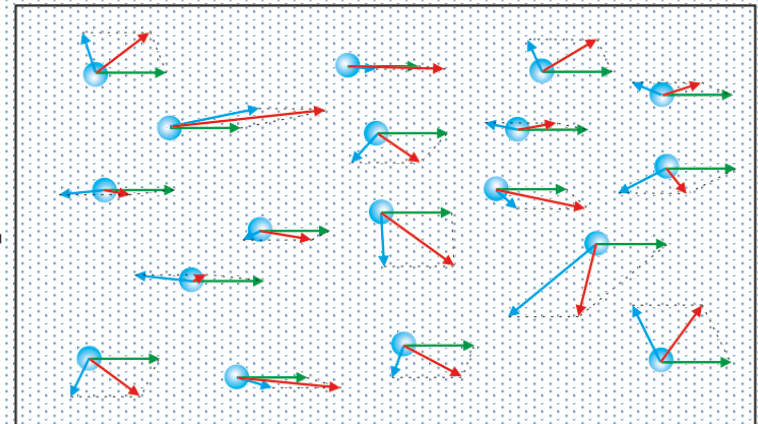
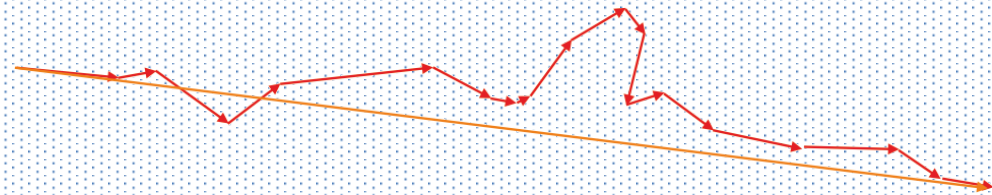
Ruch ładunków jest zwykle dość chaotyczny – ulegają one licznym zderzeniom

Pole elektryczne:

- jest wielkością fizyczną wyrażającą siłę działającą na ładunek elektryczny w dowolnym punkcie przestrzeni
- pojawia się tam gdzie została zachwiana równowaga elektryczna
- charakteryzuje siłę z jaką natura dąży do powrotu do równowagi

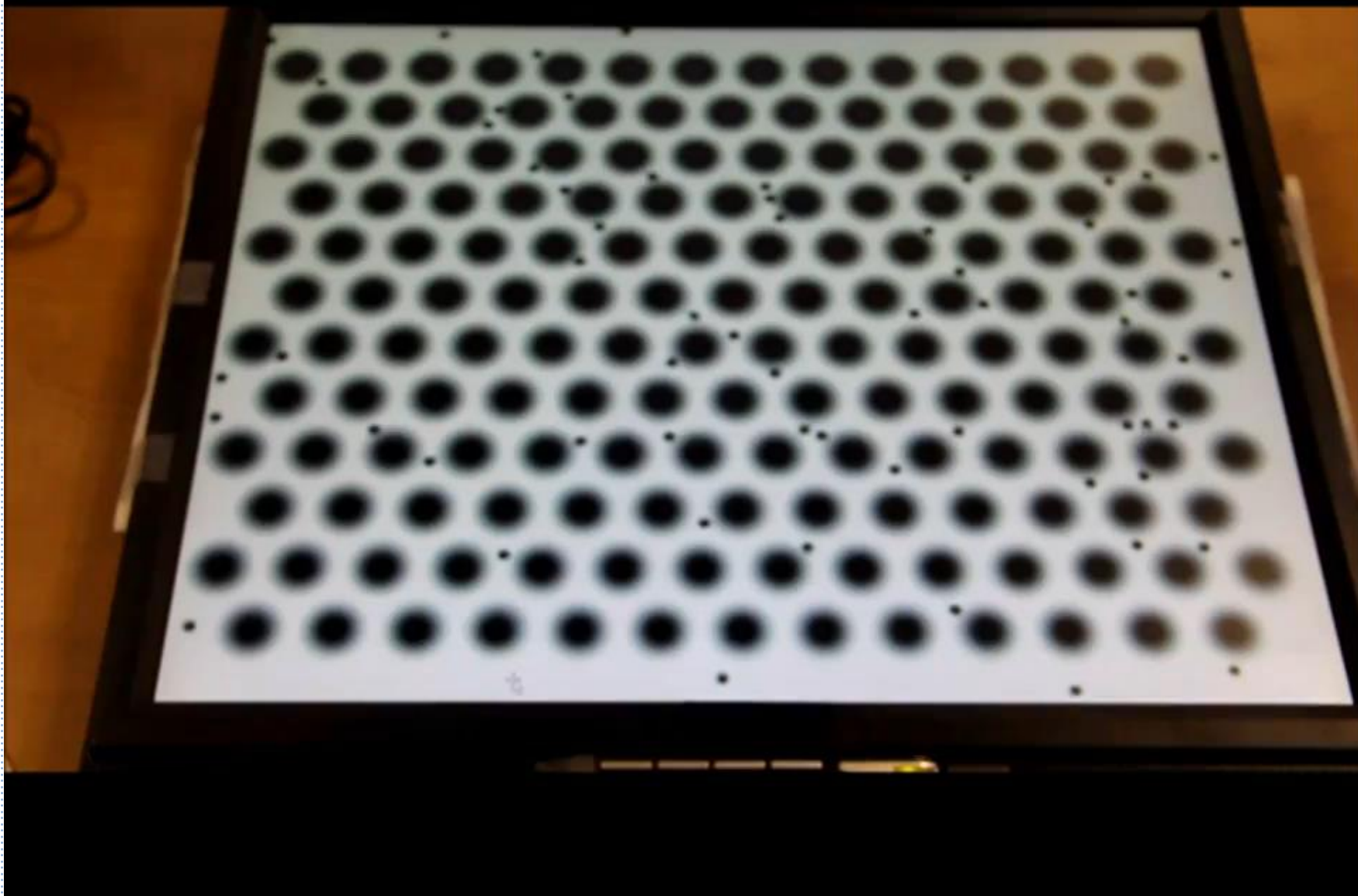


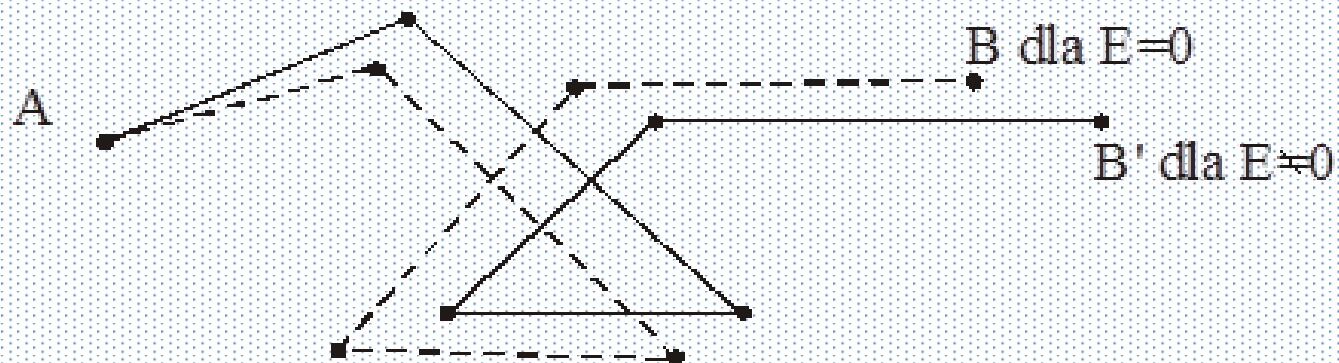
prąd nie płynie – siły się równoważą



prąd płynie – brak równowagi sił

Liczba elektronów jest tu znacznie zaniżona

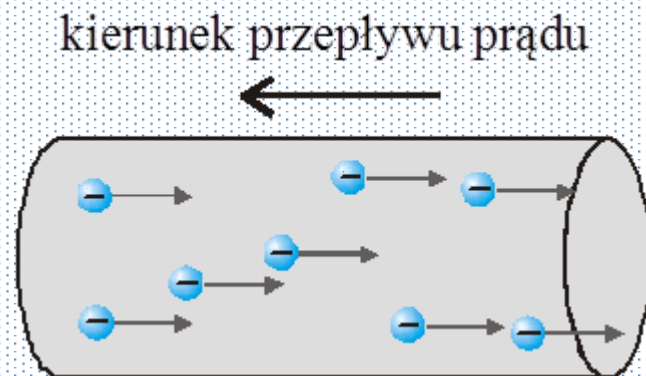
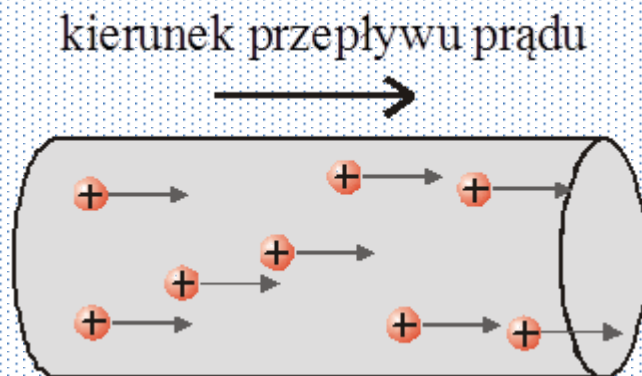


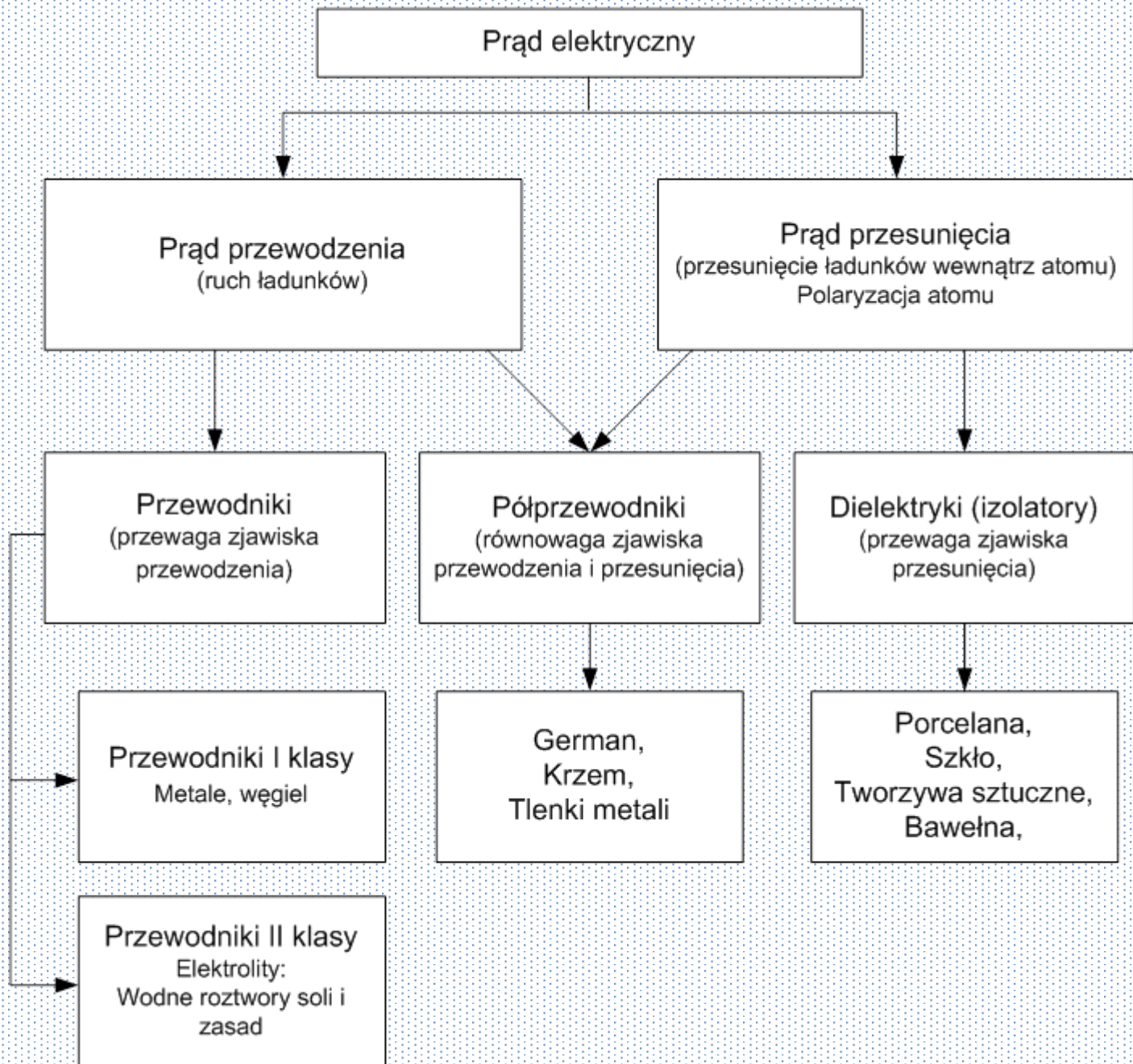


Prąd elektryczny wyraża więc pewien ogólny, statystyczny trend w kierunku ruchu ładunków.

Kierunek przepływu prądu jest umowny.

Przyjęto, że jest on zgodny z ruchem ładunków dodatnich (jonów).





Przedrostki w układzie - SI

Nazwa	Symbol	Mnożnik	Nazwa mnożnika	Przykład
tera (gr. <i>teras</i> – potwór)	T	$1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$	<u>bilion</u>	THz – <u>teraherc</u>
giga (gr. <i>gigas</i> – olbrzymi)	G	$1\,000\,000\,000 = 10^9$	<u>miliard</u>	GHz – <u>gigaherc</u>
mega (gr. <i>megas</i> – wielki)	M	$1\,000\,000 = 10^6$	<u>milion</u>	MHz – <u>megaherc</u>
kilo (gr. <i>khilioi</i> – tysiąc)	k	$1\,000 = 10^3$	<u>tysiąc</u>	kcal – <u>kilokaloria</u>
hekto (gr. <i>hekaton</i> – sto)	h	$100 = 10^2$	<u>sto</u>	hl – <u>hektolitr</u>
deka (gr. <i>deka</i> – dziesięć)	da	$10 = 10^1$	<u>dziesięć</u>	dag – <u>dekagram</u>
		$1 = 10^0$	<u>jeden</u>	m – <u>metr</u> , g – <u>gram</u>
decy (łac. <i>decimus</i> – dziesiąty)	d	$0,1 = 10^{-1}$	jedna dziesiąta	dm – <u>decymetr</u>
centy (łac. <i>centum</i> – sto)	c	$0,01 = 10^{-2}$	jedna setna	cm – <u>centymetr</u>
mili (łac. <i>mille</i> – tysiąc)	m	$0,001 = 10^{-3}$	jedna tysięczna	mm – <u>milimetr</u>
mikro (gr. <i>mikros</i> – mały)	μ	$0,000\,001 = 10^{-6}$	jedna milionowa	μm – <u>mikrometr</u>
nano (gr. <i>nanos</i> – karzeł)	n	$0,000\,000\,001 = 10^{-9}$	jedna miliardowa	nF – <u>nanofarad</u>
piko (wł. <i>piccolo</i> – mały)	p	$0,000\,000\,000\,001 = 10^{-12}$	jedna bilionowa	pF – <u>pikofarad</u>

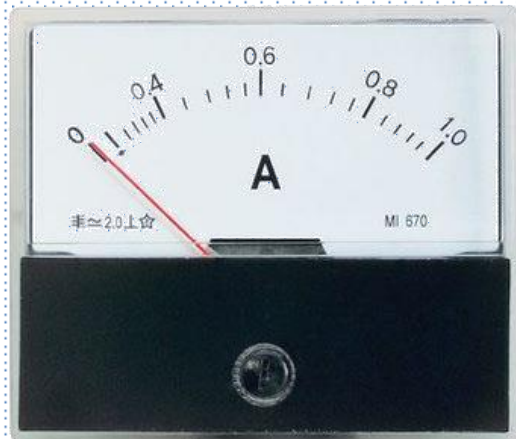
Pole elektrostatyczne, kondensatory

Polem elektrostatycznym nazywa się pole elektryczne wytwarzane przez ładunki nieruchome względem określonego układu odniesienia.

Jednostką ładunku jest kulomb C .

$$[C] = A \cdot s$$

Amper A to jednostka zwana natężeniem prądu elektrycznego (lub krótko prądem) wyrażająca liczbę ładunków przepływających w jednostce czasu



Jeden amper to taki prąd, który płynąc bez zmian w dwóch równoległych, nieskończenie długich i cienkich przewodach, oddległych od siebie o 1 m, wywołałby między nimi siłę $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$, na każdy metr ich długości.

Badając siły działające na ładunek q umieszczony w polu elektrycznym w próżni, można ustalić wartość natężenia pola elektrycznego E w dowolnym punkcie odległym o r od ładunku wytwarzającego to pole:

Siła F działająca na ładunek w takim polu jest proporcjonalna do wartości tego ładunku Q .

$$F = E Q$$

Wielkość E jest współczynnikiem proporcjonalności nazywanym

NATĘŻENIEM POLA ELEKTRYCZNEGO

jest to wektor skierowany zgodnie z kierunkiem siły działającej na ładunek.

$$\mathbf{E} = \frac{F}{q} = \frac{Q_{\text{źr}}}{4\pi \cdot r^2 \cdot \varepsilon_0} \quad [E] = \frac{N}{C} = \frac{W \cdot s}{m \cdot A \cdot s} = \frac{V}{m}$$

$Q_{\text{źr}}$ - ładunek punktowy wytwarzający pole [C] - zwany źródłem pola,

r - odległość ładunku próbnego od źródła [m],

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right] \quad - \text{współczynnik proporcjonalności zwany przenikalnością elektryczną ośrodka (tutaj próżni).}$$

Jest to współczynnik proporcjonalności pomiędzy tzw. indukcją elektryczną a natężeniem pola elektrycznego:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}$$

$$D = \frac{Q}{4\pi \cdot r^2}$$

Jeżeli ładunek elektryczny zostanie umieszczony w dowolnym ośrodku, natężenie pola elektrycznego E wyniesie:

$$E = \frac{Q}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot r^2}$$

$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ bezwzględna przenikalność elektryczna środowiska [F/m],

ε_r względna przenikalność elektryczna - wielkość wskazująca ile razy przenikalność elektryczna danego ośrodka jest większa od przenikalności elektrycznej próżni ε_0

$$\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

dielektryk	ε_r
Olej transformatorowy	2 – 2,5
Papier nasycony	3,7
PCV	3,3
Porcelana izolatorowa	5,4 – 6,5 ε_0
Powietrze w warunkach normalnych	ok. 1,0 bliskie
Preszpan nasycony	4,5 – 5
Szkło	3,1 – 4,4
Woda	80

Jeżeli natężenie pola elektrycznego przekroczy pewną wartość, nazywaną wytrzymałością elektryczną ośrodka, następuje jego tzw. przebicie czyli gwałtowny przepływ prądu.

Farad jest jednostką tzw. pojemności elektrycznej.

Przeniesienie ładunku q z punktu A do B w polu elektrycznym E wymaga pracy

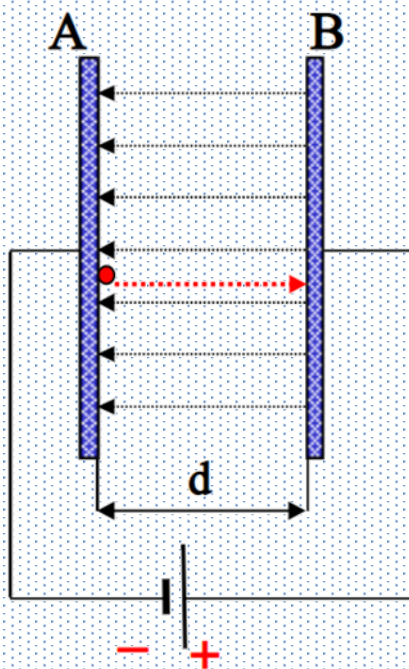
$$W_{AB} = \text{Energia}_B - \text{Energia}_A = Fd$$

w polu elektrycznym E

$$F = qE$$

czyli
$$\frac{\text{Energia}_B}{q} - \frac{\text{Energia}_A}{q} = Ed$$

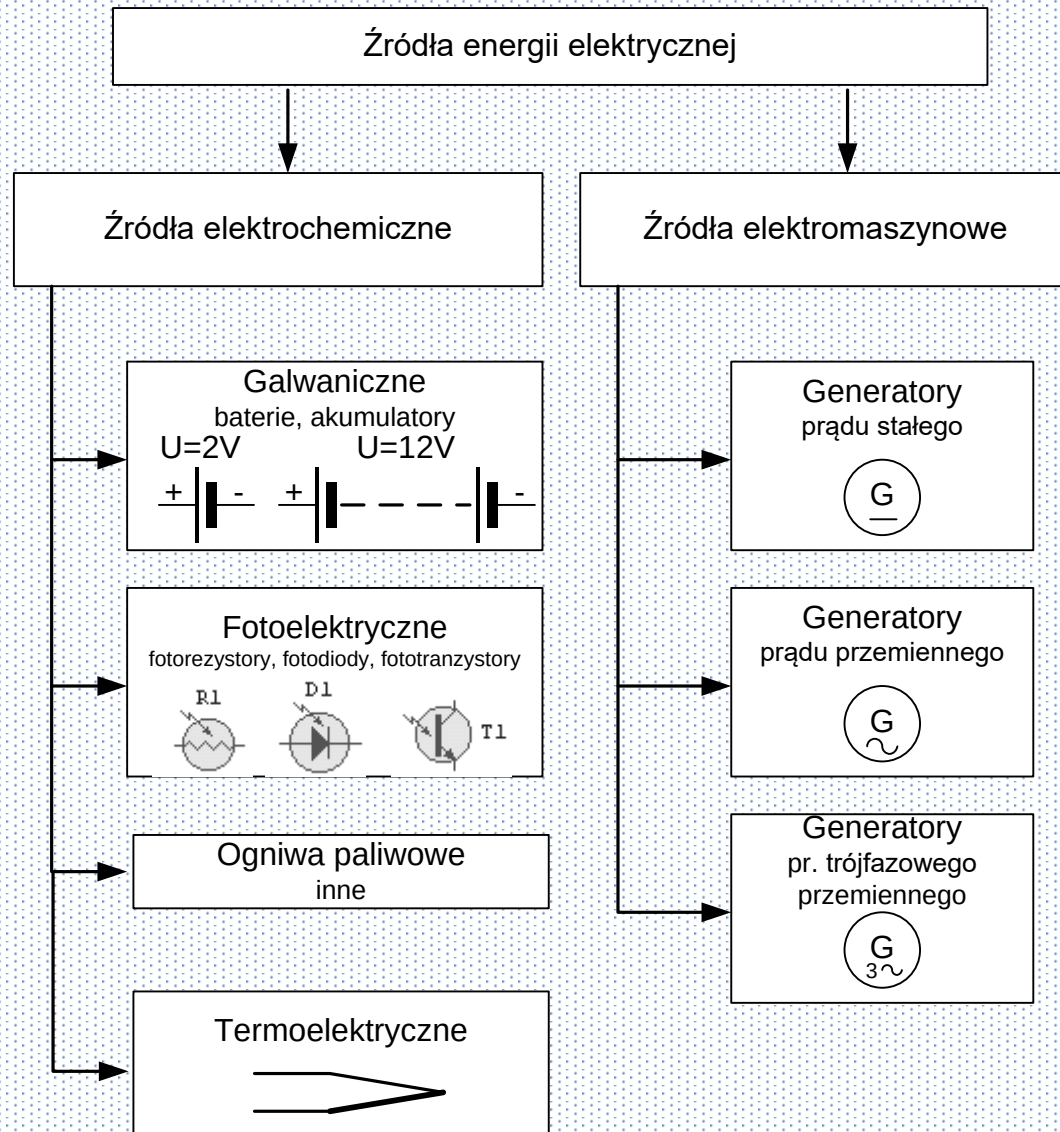
albo
$$V_B - V_A = Ed = U \quad E = \frac{U}{d}$$



Pojemność kondensatora

$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

S - powierzchnia okładek



Obwodem elektrycznym nazywa się dowolny układ fizyczny, w którym płynie prąd

Natężenie prądu (lub krótko prąd) w obwodzie elektrycznym jest proporcjonalny do różnicy potencjałów występującej na jego końcach (napięcia).

Współczynnik proporcjonalności nazywany jest opornością lub rezystancją obwodu.

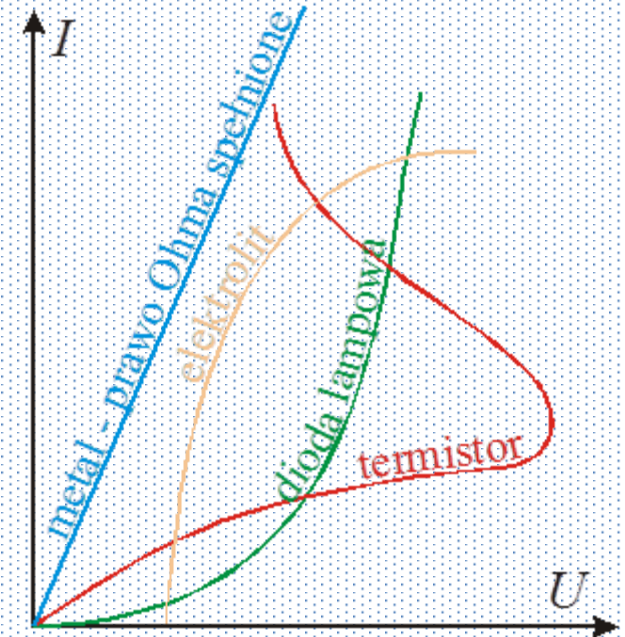
Jednostką rezystancji jest om [Ω] - z def. jest to jednostka oporu elektrycznego między dwoma powierzchniami ekwipotencjalnymi w jednorodnym przewodzie prostoliniowym.

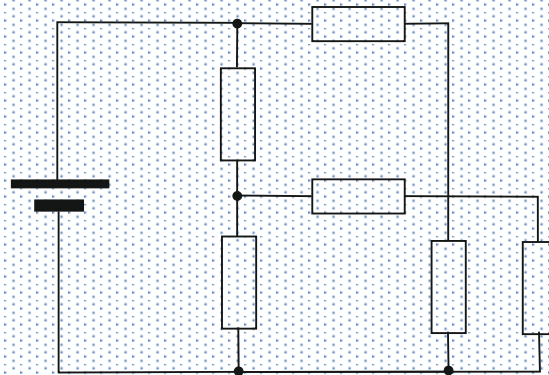
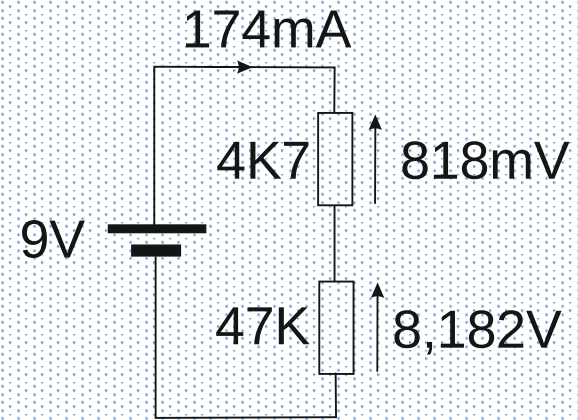
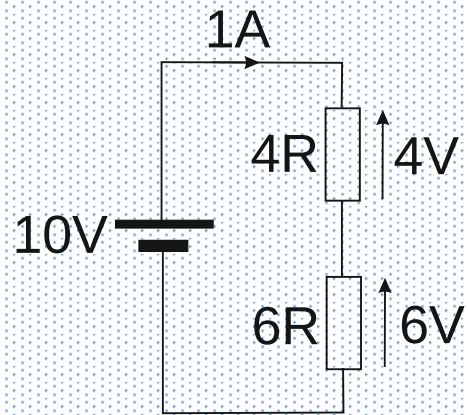
Jeśli różnica potencjałów między dwoma punktami (napięcie elektryczne) jest równa 1 V i wywołuje ona prąd o wartości 1 A to rezystancja między tymi punktami wynosi 1 Ω

$$U = RI \quad [V = \Omega A]$$

Zależność ta nosi nazwę prawa Ohma.

Jest ona spełniona zasadniczo tylko w przewodnikach - idealnych i prostoliniowych.

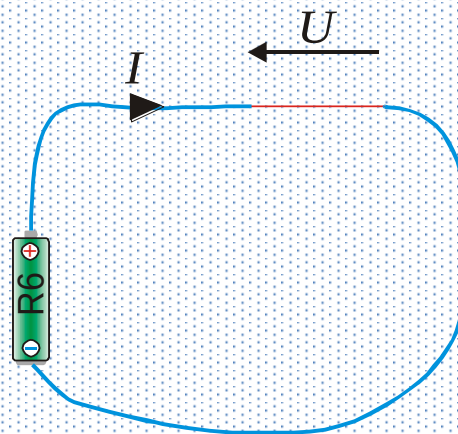




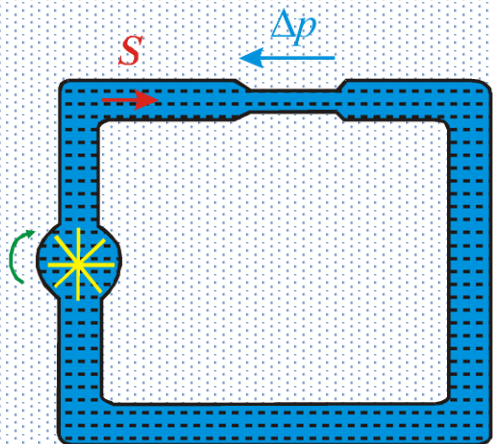
Najprostszy obwód elektryczny



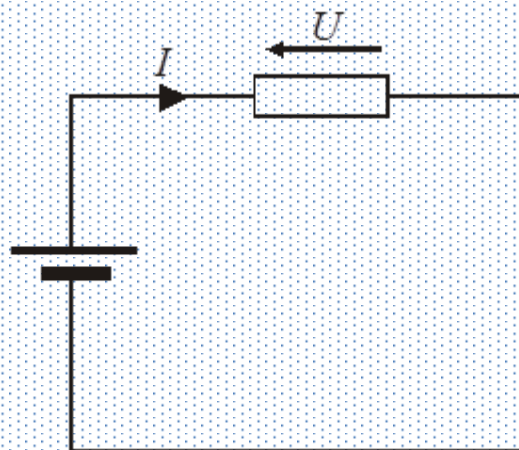
uproszczony rysunek



analogia wodna

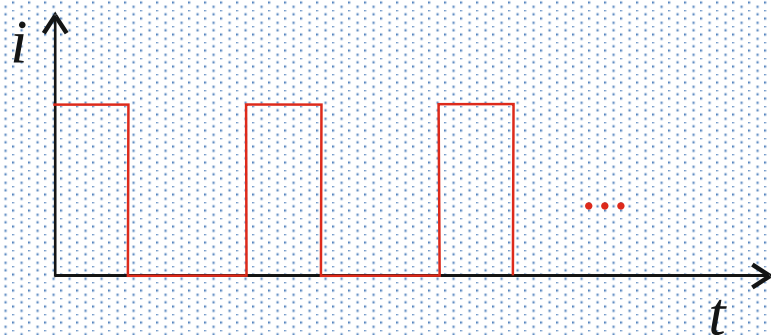
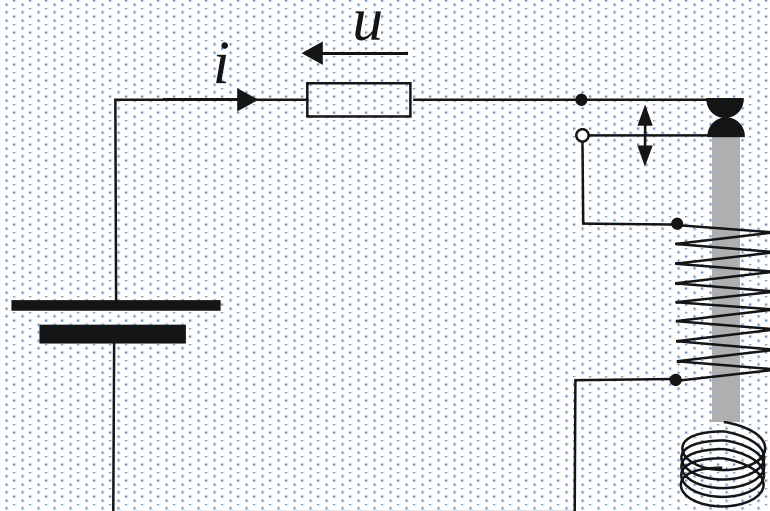


schemat



PN-EN 60617

Najprostszy obwód elektryczny dynamiczny



Rezystory

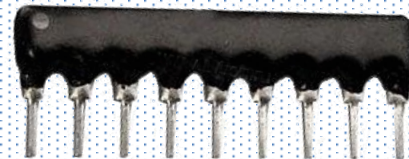
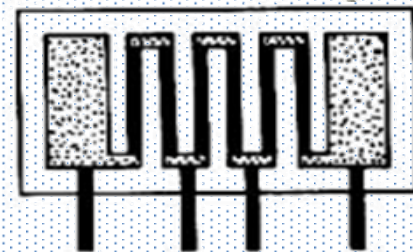
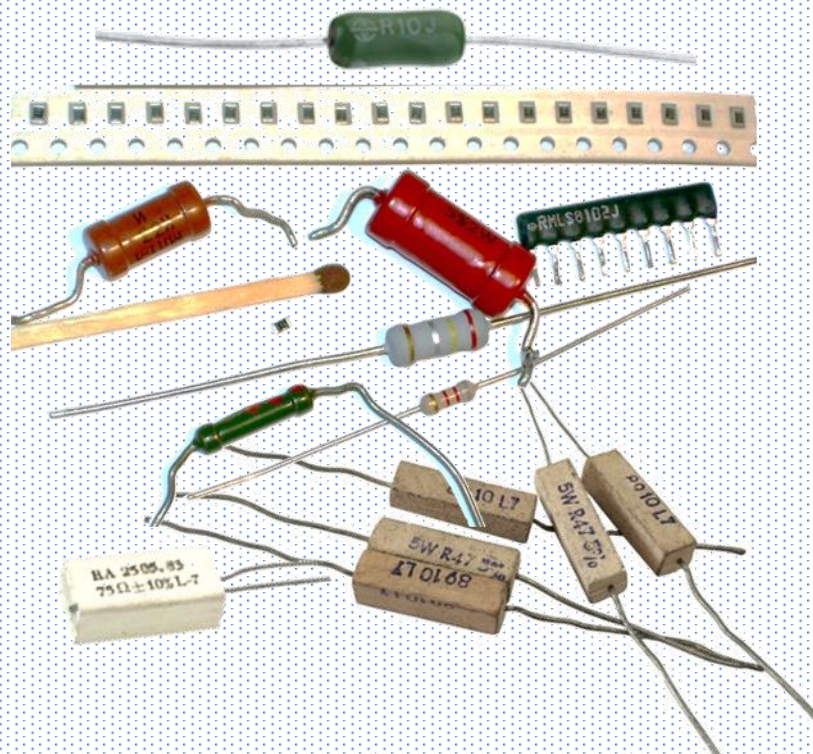
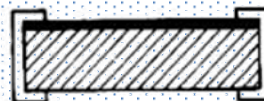
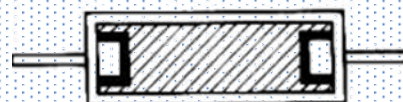
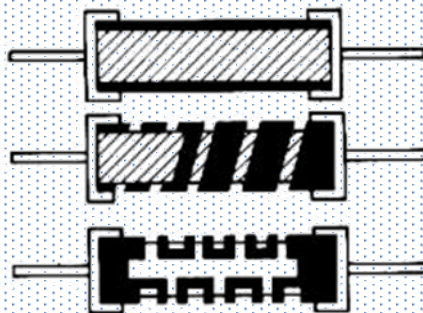
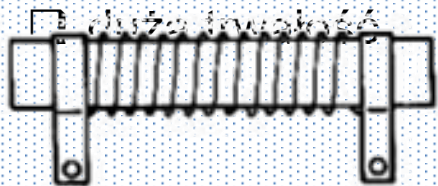


metalowe - dodatni TWR

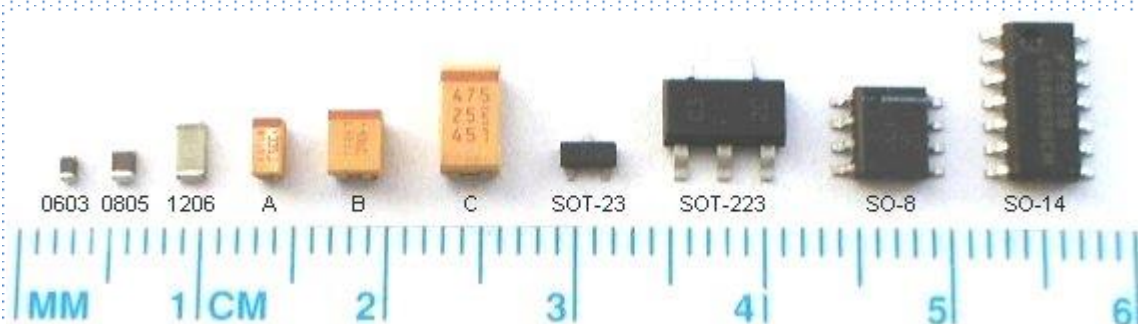
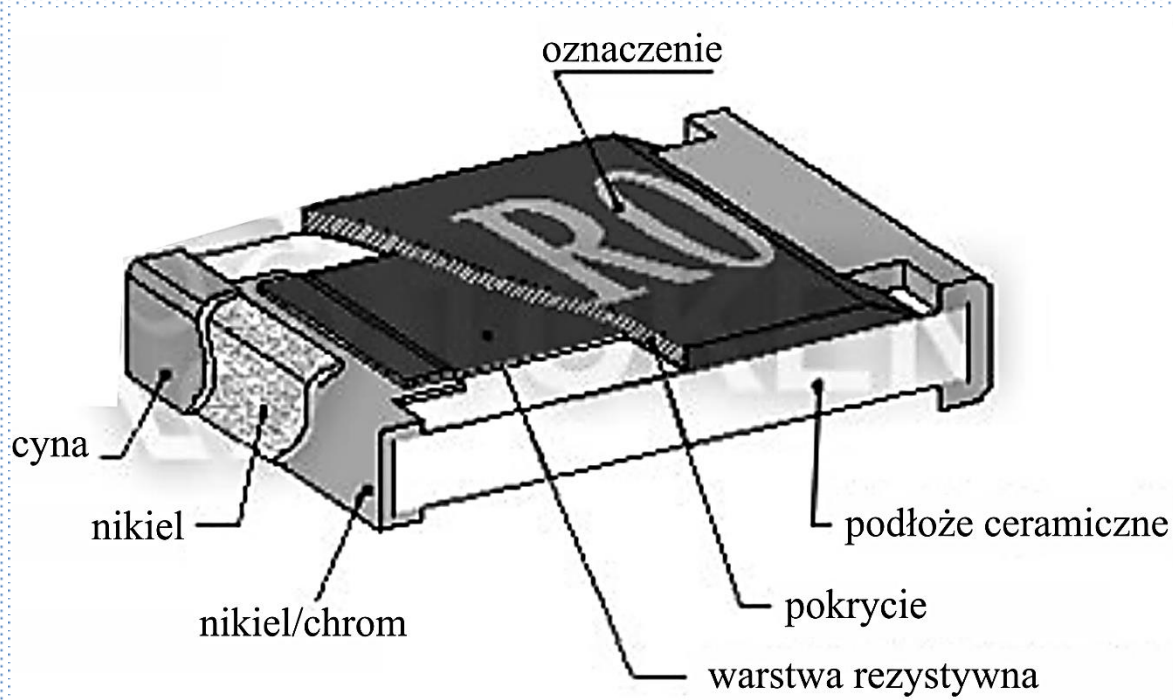
niemetalowe - ujemny TWR

Najważniejsze własności materiałów oporowych:

- ☐ wysoka rezystywność
- ☐ niski TWR
- ☐ odporność na utlenianie
- ☐ odporność na działanie czynników chemicznych
- ☐ wysoka temperatura topnienia
- ☐ duża trwałość



Budowa typowego rezystora SMD



1 mm $\approx$ 39,370 mils 1 mils $\approx$ 0,0254 mm

0603 = 0,06" $\times$ 0,03"
lub 60 $\times$ 30 mils lub 1,6 $\times$ 0,8mm

0805 = 0,08" $\times$ 0,05"
lub 80 $\times$ 50 mils lub 2,0 $\times$ 1,25mm

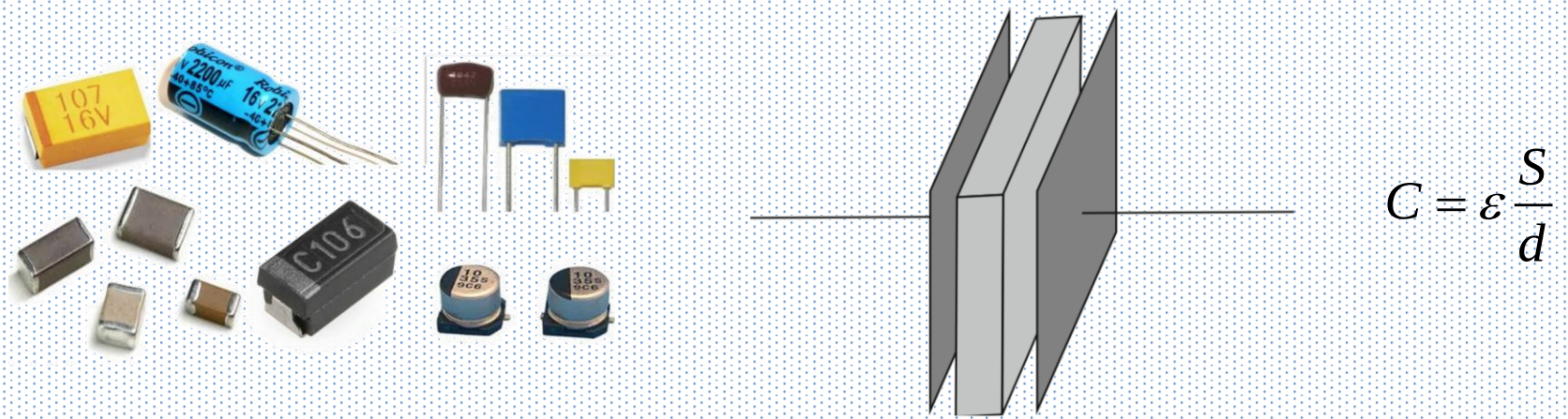
1206 = 0,12" $\times$ 0,06"
lub 120 $\times$ 60 mils lub 3,2 $\times$ 1,6mm

A = 3,2 $\times$ 1,6 $\times$ 1,6 dł/szer/wys

B = 3,5 $\times$ 2,8 $\times$ 1,9

C = 6,0 $\times$ 3,2 $\times$ 2,5

Obok elementów rezystancyjnych mogą w obwodzie występować elementy reaktancyjne: kondensator i cewka, które spełniają prawo Ohma dla prądu zmiennego.



Dla elementu reaktancyjnego zwanego kondensatorem o pojemności C wyrażanej w faradach [F] prąd chwilowy określony jest zależnością:

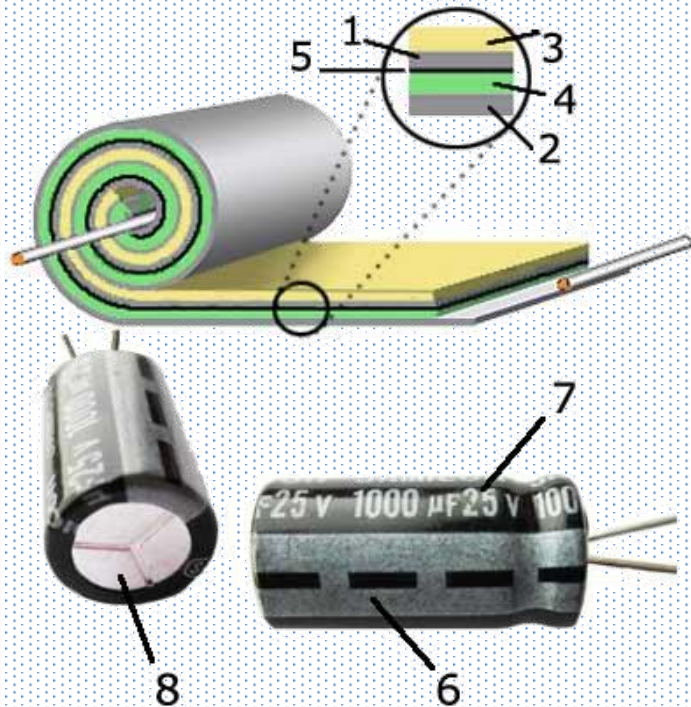
$$i_c = C \frac{du}{dt}$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

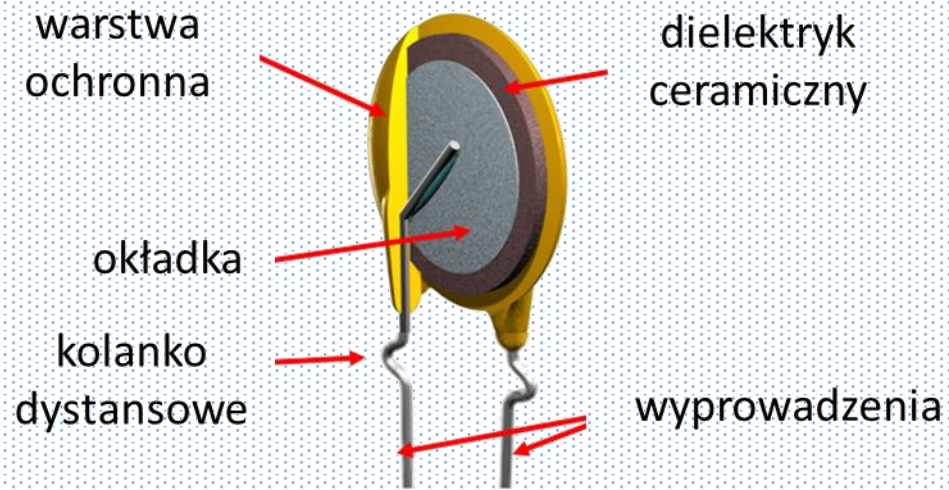
Jeśli napięcie nie zmienia się w czasie to prąd nie płynie – reaktancja jest nieskończenie wielka (rozwarcie)

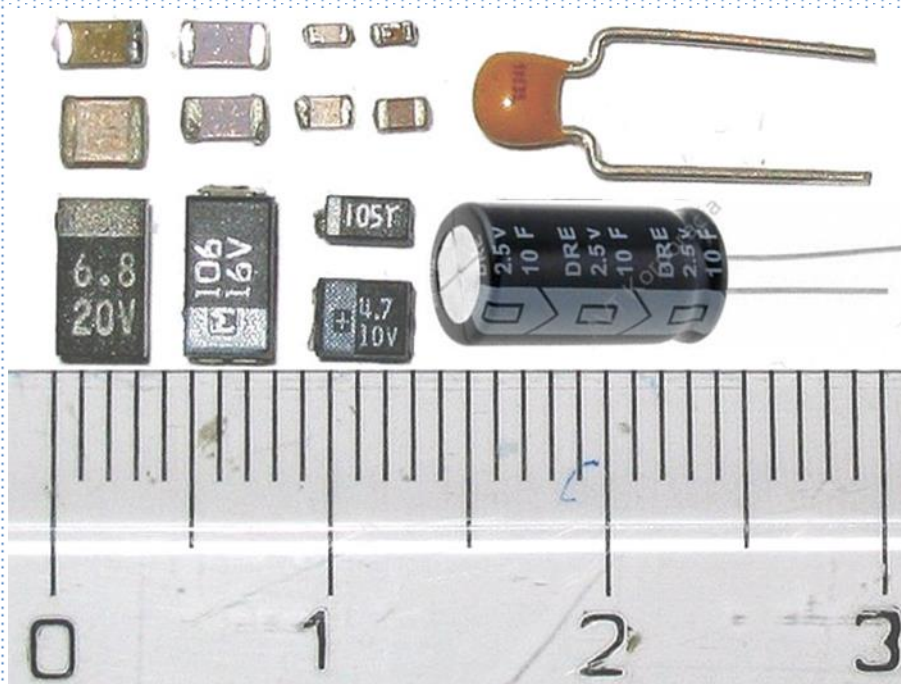
Jako materiały izolujące stosuje się:

- powietrze
- papier
- papier nasączony elektrolitem
- ceramikę ferroelektryczną

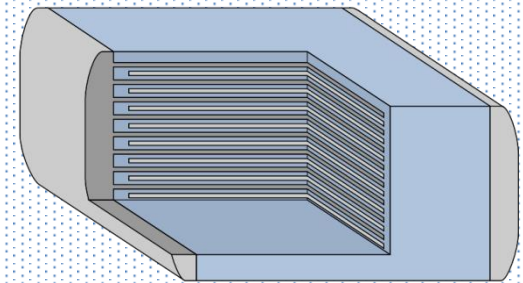


- 1,2 folia Al.
- 3 izolator (zwykle papier)
- 4 elektrolit
- 5 tlenek Al.
- 6 oznaczenie minusa (elektrolit!)
- 7 oznaczenie pojemności - napięcia znamionowe
- 8 obudowa z zabezpieczeniem





obudowa	dł x szer x wys (mm)
A	$3,2 \times 1,6 \times 1,6$
B	$3,5 \times 2,8 \times 1,9$
C	$6,0 \times 3,2 \times 2,5$
D	$7,3 \times 4,3 \times 2,8$
E	$7,3 \times 6,0 \times 3,6$

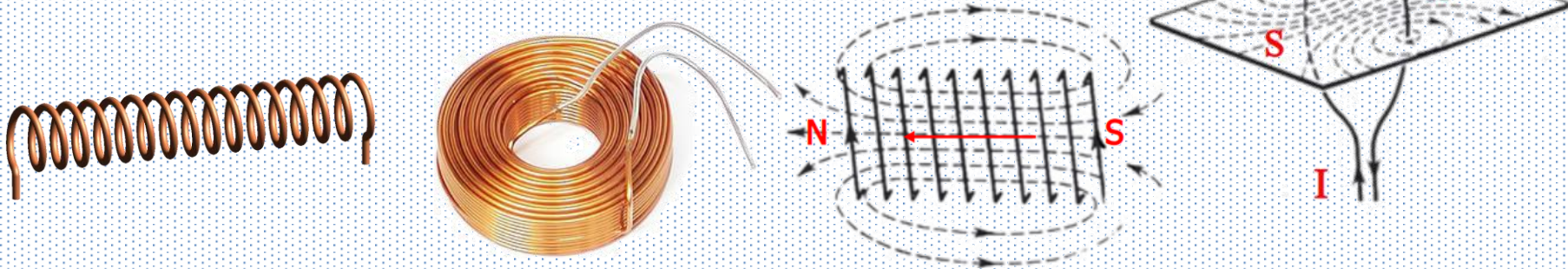


1, 2 – tantalowe; 3, 4 – elektrolityczne;
 5, 6, 7 - ceramiczne (rozm. Jak dla rezystorów);
 8 - porcelanowy RF (wysokie Q) RF;
 9 – trymer;
 (rezystor 0,125 W dla porównania rozmiarów)

Cewka generuje pole magnetyczne – zachowuje się jak magnes

Jeśli przez dwa równoległe przewody płyną prądy w tym samym kierunku, to przewody te przyciągają się. Jeśli kierunki prądów są przeciwne - odpychają.

Cewką nazywa się szereg pętli z prądem.



Podstawowym parametrem cewki jest indukcyjność L czyli zdolność do wytwarzania strumienia magnetycznego Φ

$$\Phi = L \cdot i$$

Indukcyjność prostego przewodu: $L_{pp} \approx 0,0046 \cdot l \cdot \log \frac{1,47 \cdot l}{d}$

Indukcyjność pojedynczej pętli: $L_{pętli} \approx 0,0145 \cdot D \cdot \log \frac{1,08 \cdot D}{d}$

Indukcyjność cewki powietrznej o stałym D : $L_{cewki} \approx 0,01 \frac{Dn^2}{\frac{l_c}{d} + 0,45}$

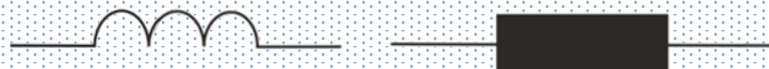
Indukcyjność wyraża się w Henrach [H]

$$[H] = \left[\frac{\text{Wb}}{\text{A}} \right] = \left[\frac{\text{Vs}}{\text{A}} \right] = \left[\frac{\text{s}^2}{\text{F}} \right] = [\Omega \text{s}]$$

Chwilowe napięcie elektryczne u_L występujące na cewce o indukcyjności własnej L jest zależne od chwilowego prądu i płynącego przez tę cewkę:

$$u_L = L \frac{di}{dt}$$

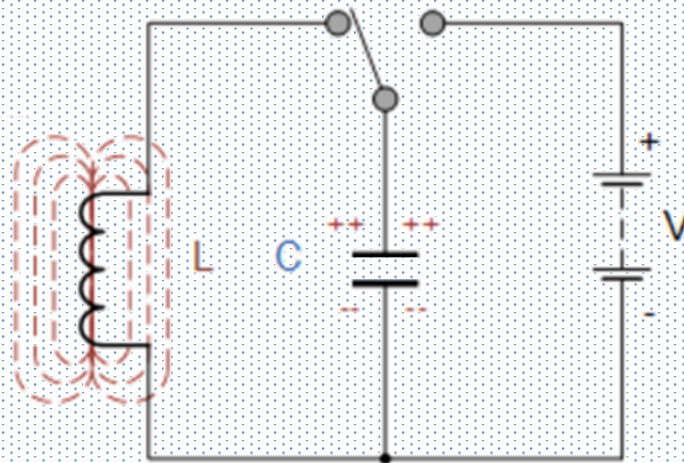
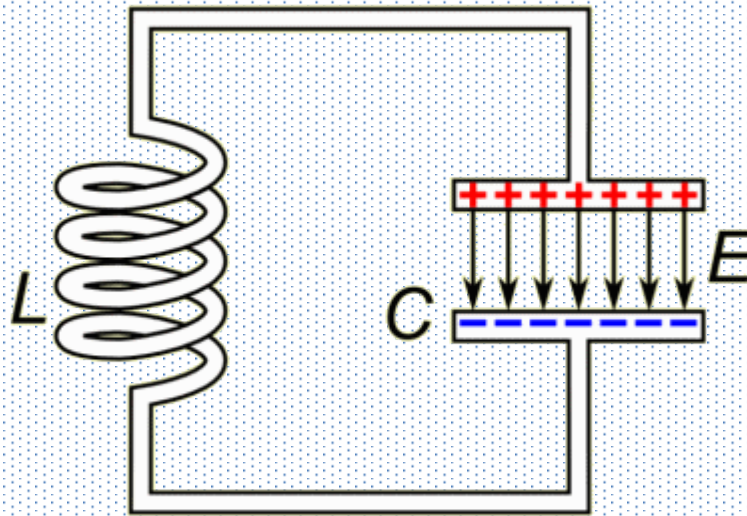
Reaktancja $X_L = \omega L = 2\pi f L$

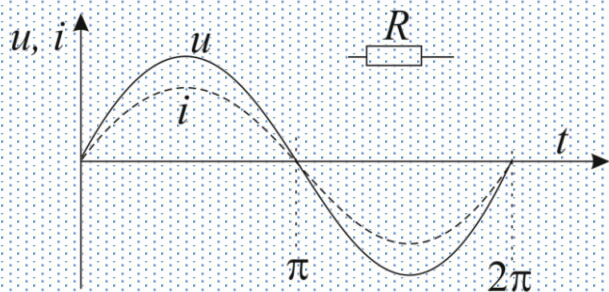


Jeśli prąd nie zmienia się w czasie to napięcie wynosi 0 (zwarcie).

Elementy pasywne, których parametry R , L , C są stałe nazywa się elementami liniowymi. Spełniają one prawo Ohma.

Połączenie cewki z kondensatorem ma własności rezonansowe

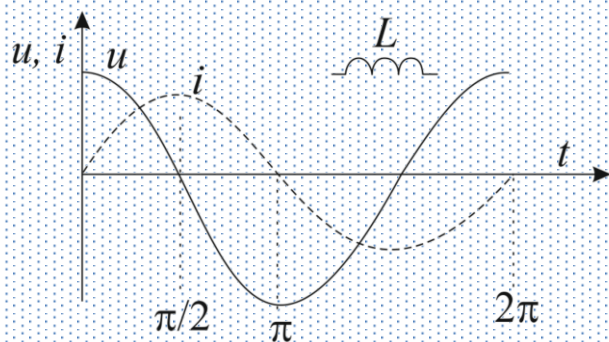




$$i = I_{\max} \sin(\omega t)$$

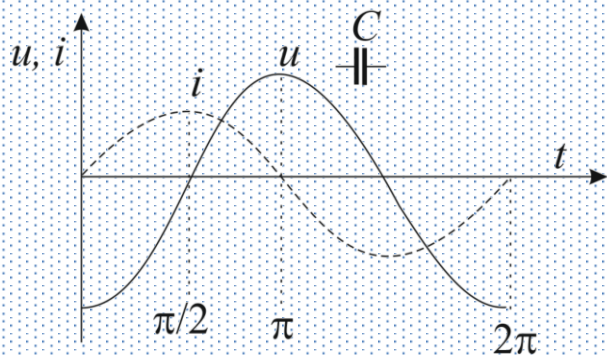
$$u = Ri$$

$$R = \frac{u}{i}$$



$$u = L \frac{di}{dt} = LI_{\max} \omega \cos(\omega t) = LI_{\max} \omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

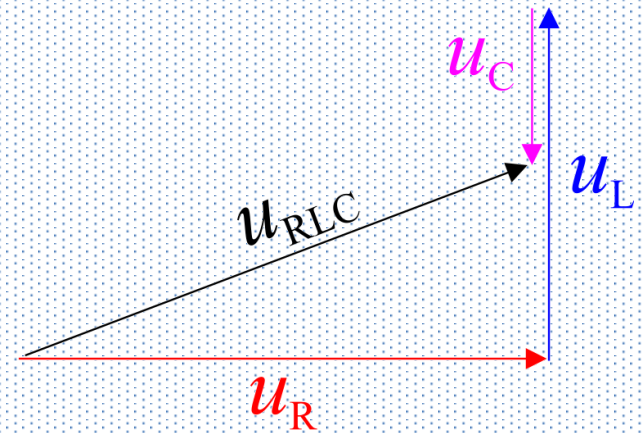
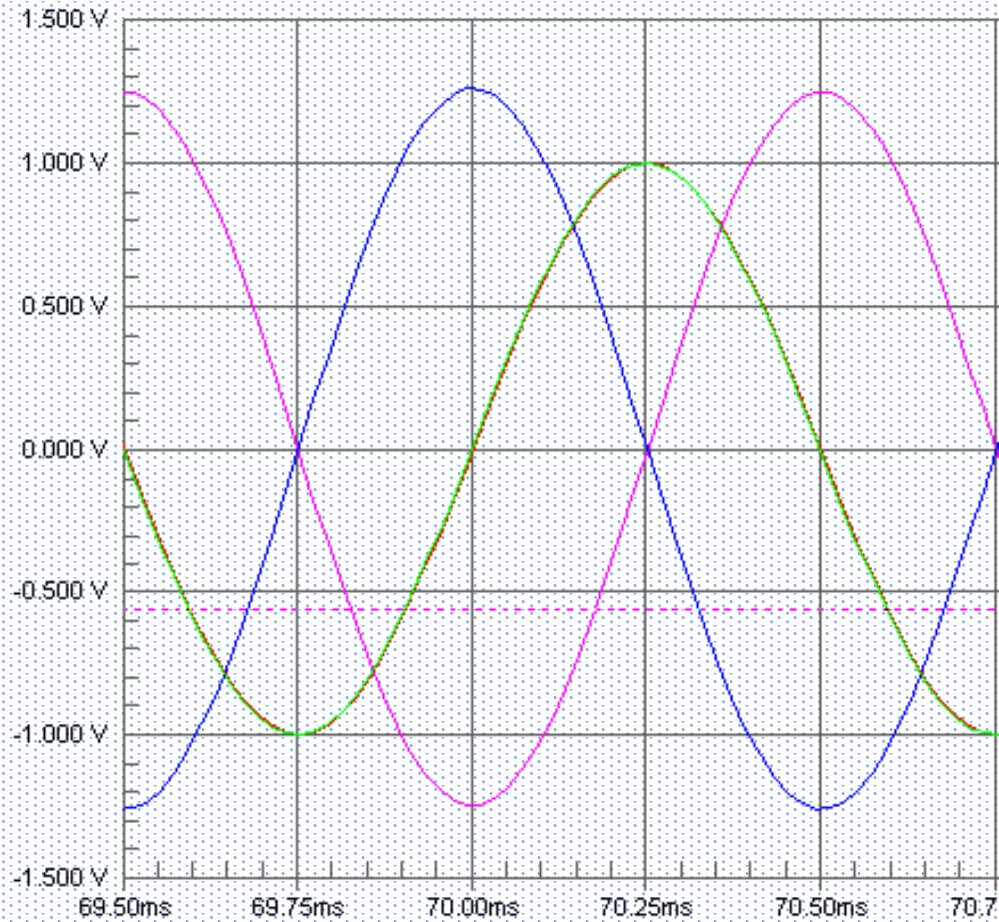
$$X_L = \frac{u}{i} = j\omega L$$



$$i = C \frac{du}{dt} \rightarrow u = \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{I_{\max}}{\omega C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

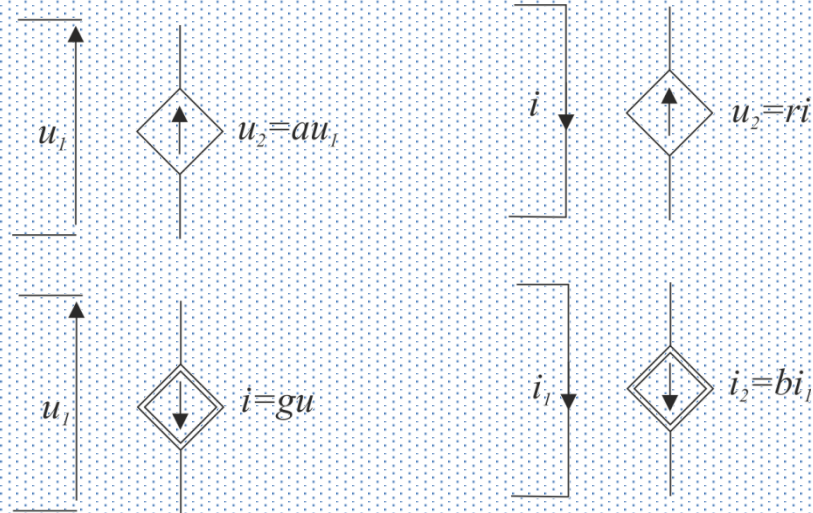
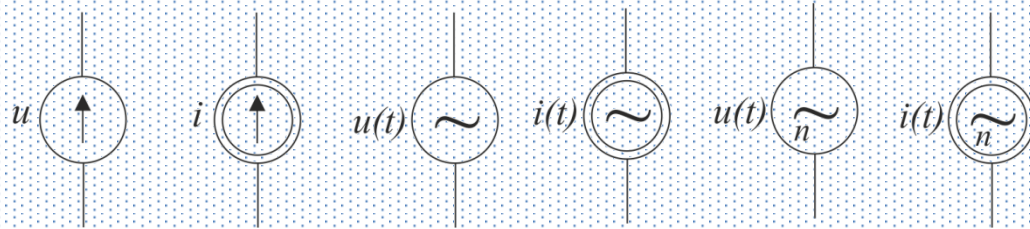
$$X_C = \frac{u}{i} = -j \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{j\omega C}$$

A: u_C
 B: u_L
 C: u_R
 D: $v1_1$

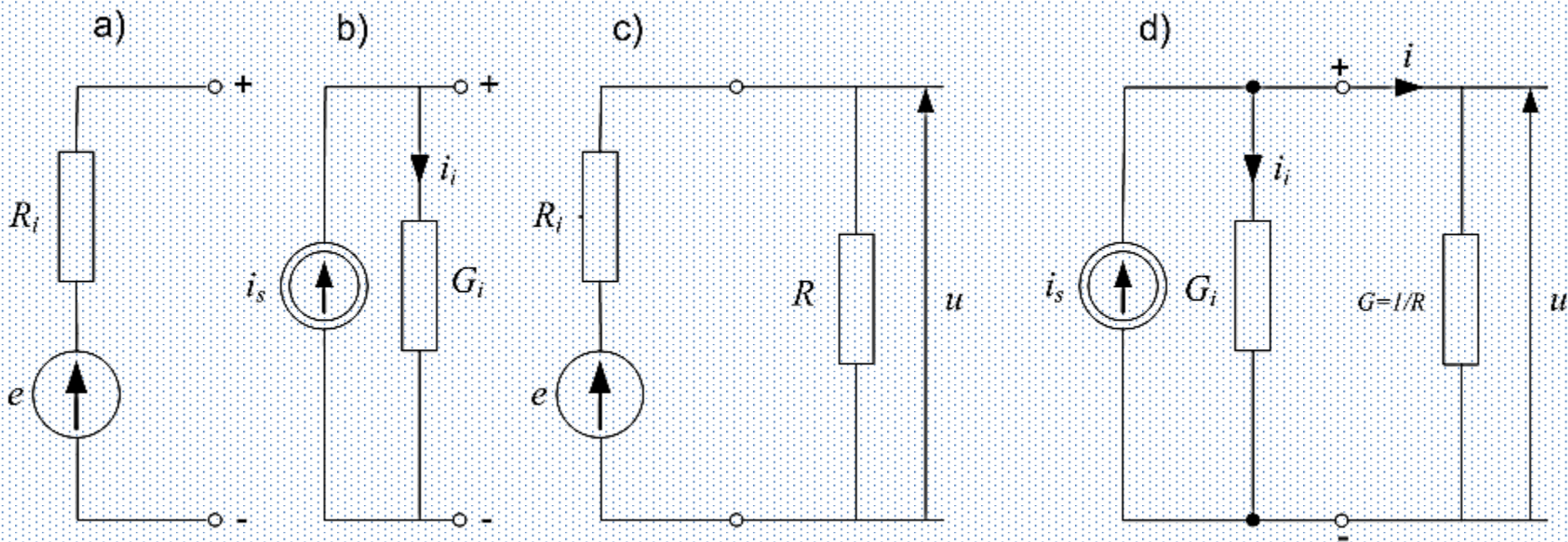


$$u_{RLC} = u_R + u_L + u_C = iR + iX_L + iX_C = i(R + X_L + X_C) = i\left(R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\right)$$

Obok rezystancji i reaktancji występują także elementy dostarczające energię do obwodu
- idealne źródła napięciowe i prądowe



Elementy te nie mają żadnych wewnętrznych rezystancji ani reaktancji



Źródło napięcia

Źródło prądu

Obwód ze źródłem napięcia

Obwód ze źródłem prądu

Stosując pojęcie KONDUKTANCJI (odwrotności rezystancji) $G = 1/R$ prawo Ohma można wyrazić następująco:

$$i = G \cdot u \quad \left[A = \frac{V}{\Omega} \right]$$

dla obwodu ze
źródłem napięcia

$$\left. \begin{aligned} e &= (R_i + R)i = R_i \cdot i + u \\ i &= \frac{e}{R + R_i} \\ u &= e - R_i \cdot i \end{aligned} \right\}$$

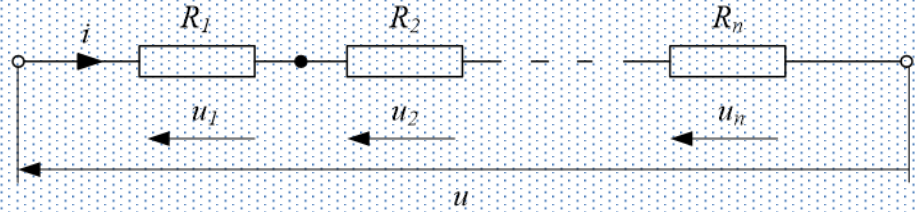
dla obwodu ze
źródłem prądu

$$\left. \begin{aligned} i_s &= i_i + i \\ i &= i_s \frac{G}{G + G_i} \\ i_s &= G_i \cdot u \end{aligned} \right\}$$

Szeregowe i równoległe łączenie rezystancyjnych elementów obwodu

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

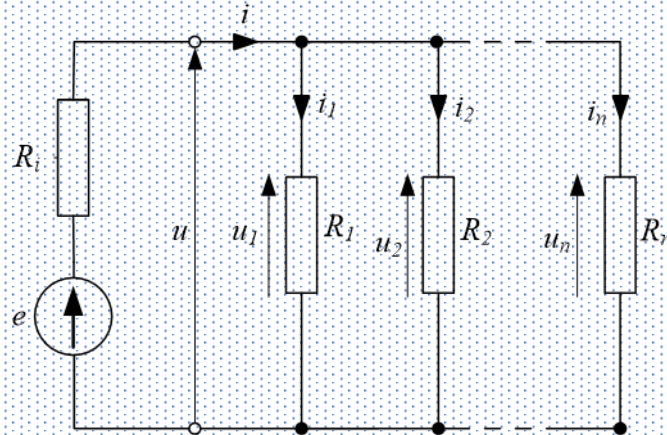
$$\text{albo } R = \sum_{i=1}^n R_i$$



$$u = u_1 + u_2 + \dots + u_n, \quad i = i_1 = i_2 = \dots = i_n$$

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

$$\text{albo } G = \sum_{i=1}^n G_i$$



$$u = u_1 = u_2 = \dots = u_n, \quad i = i_1 + i_2 + \dots + i_n$$

Analogicznie dla cewek (jeśli są magnetycznie odizolowane).

W przypadku kondensatorów jest odwrotnie - sumuje się pojemności przy połączeniu równoległym zaś ich odwrotności przy połączeniu szeregowym ponieważ:

$$u_c \sim \frac{1}{C}$$

Zaprezentowany sposób sumowania prądów i napięć ujęty jest w tzw. prawa Kirchhoffa

GAŁĄŹ – zbiór dowolnej liczby szeregowo połączonych elementów mających dwa zaciski

OCZKO – zbiór gałęzi tworzących obwód zamknięty

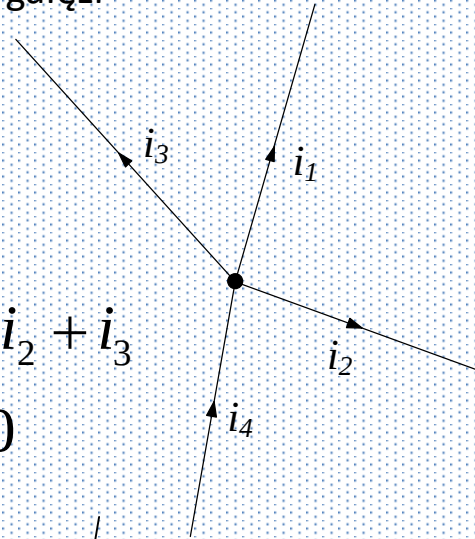
WĘZEŁ – punkt obwodu, w którym są połączone co najmniej trzy zaciski różnych gałęzi

I PRAWO KIRCHHOFFA – bilans prądów w węźle

Suma algebraiczna wartości prądów w węźle obwodu elektrycznego jest równa zero, czyli suma prądów wpływających do węzła równa się sumie prądów wypływających z węzła

$$i_4 = i_1 + i_2 + i_3$$

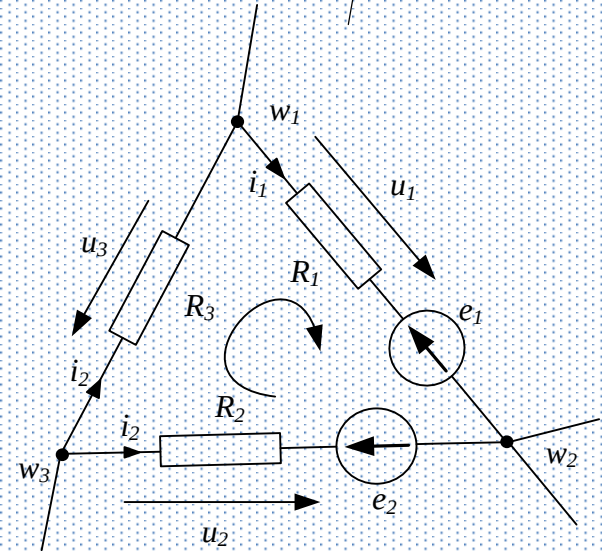
$$\sum_k i_k = 0$$



II PRAWO KIRCHHOFFA – bilans napięć w oczku

Suma algebraiczna wartości napięć występujących w oczku wynosi zero

$$\sum_k e_k - \sum_l u_l = 0$$



Przewodnictwo elektryczne materiałów – rezystywność i konduktywność

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

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

Materiał przy 20 °C	Rezystywność ρ [Ωm]	Konduktywność γ [1/ Ωm]	Temperaturowy wsp. rezystancji α_{20} [1/°C]
Aluminium	$0,0285 \cdot 10^{-6}$	$35 \cdot 10^6$	0,0041
Cyna	$0,115 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^6$	0,0044
Miedź	$0,0178 \cdot 10^{-6}$	$56 \cdot 10^6$	0,0039
Srebro	$0,016 \cdot 10^{-6}$	$62,5 \cdot 10^6$	0,0036
Chromonikielina	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^6$	0,00014
Konstantan	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^6$	0,00003

Rezystancja przewodników zmienia się wraz z temperaturą: $R_t = R_{20} [1 + \alpha_{20} (t - 20^\circ)]$

1. Metale nieferromagnetyczne np. aluminium, miedź, cyna, srebro zmieniają swoją rezystywność w sposób liniowy $\alpha_{20} = 0,0004 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
2. Metale ferromagnetyczne w temperaturze poniżej punktu Curie (temperatura utraty właściwości magnetycznych, żelazo ok. 760 °C) zmieniają współczynnik w znacznym stopniu w zależności od temperatury $\alpha_{20} = 0,0006 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, jednak w temperaturze pokojowej można go przyjąć jako stały,
3. Materiały oporowe: chromonikielina, konstantan wykazują niezależność rezystancji od temperatury,
4. Półprzewodniki np. tlenki miedzi i tlenki manganu mają współczynnik α_{20} ujemny, stosowane jako termistory, ograniczają wartość prądu po włączeniu.

Energia i moc - prawo Joule'a

Przemianę energii elektrycznej w odbiornikach na energię cieplną, mechaniczną lub chemiczną nazywa się PRACĄ

$$dW = u(t) \cdot i(t) \cdot dt$$

Wartość chwilową mocy wyraża się następująco:

$$p(t) = \frac{dA}{dt} = u(t) \cdot i(t)$$

W przypadku prądu stałego:

$$W = U \cdot I \cdot t$$

$$P = U \cdot I$$

Jednostką pracy i energii jest dżul [J] a jednostką mocy wat [W].

Prawo Joule'a. Podczas przepływu prądu elektrycznego przez rezystancję R energia elektryczna zamienia się w ciepło:

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

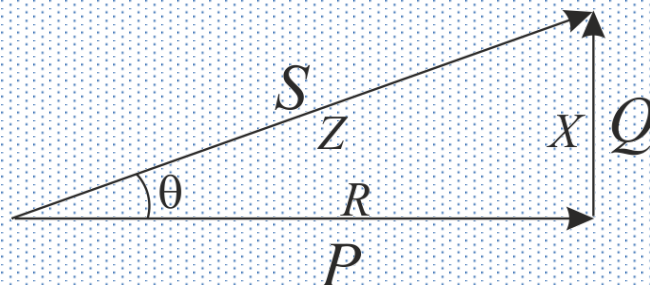
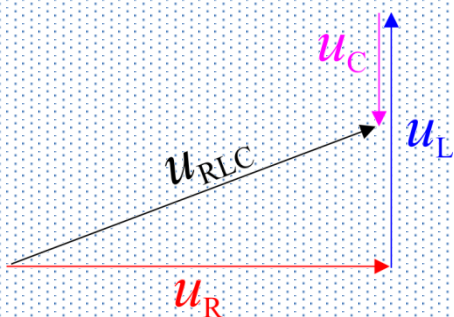
$$P = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$$

W przypadku prądu przemiennego operować można wartościami skutecznymi:

$$W = u \cdot i \cdot t \quad P = u \cdot i$$

W szeregowym układzie RLC rozróżnia się trzy rodzaje mocy:

- moc czynną – wydzielającą się na rezystancji P [W] (waty)
- moc pozorną – wydzielającą się na impedancji S [VA] (woltoampery)
- moc bierną – wydzielającą się na reaktancji Q [VAr], [VOr] (woltoamper reakcyjny)



$$\cos \theta = \frac{R}{Z} = \frac{P}{S}$$

moc czynna

$$P = UI \cos \theta = I^2 R$$

moc bierna

$$Q = ui \sin \theta = i^2 X$$

moc pozorna

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = i^2 Z$$

Moc skuteczna (RMS) - moc wydzielana przez ekwiwalentny prąd stały wywołujący na obciążeniu takie same skutki co dany prąd zmienny

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt}$$

$$P_{sk} = I_{sk}^2 R = \frac{U_{sk}^2}{R}$$

Dla prądu sinusoidalnego

$$I_{sk} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$$

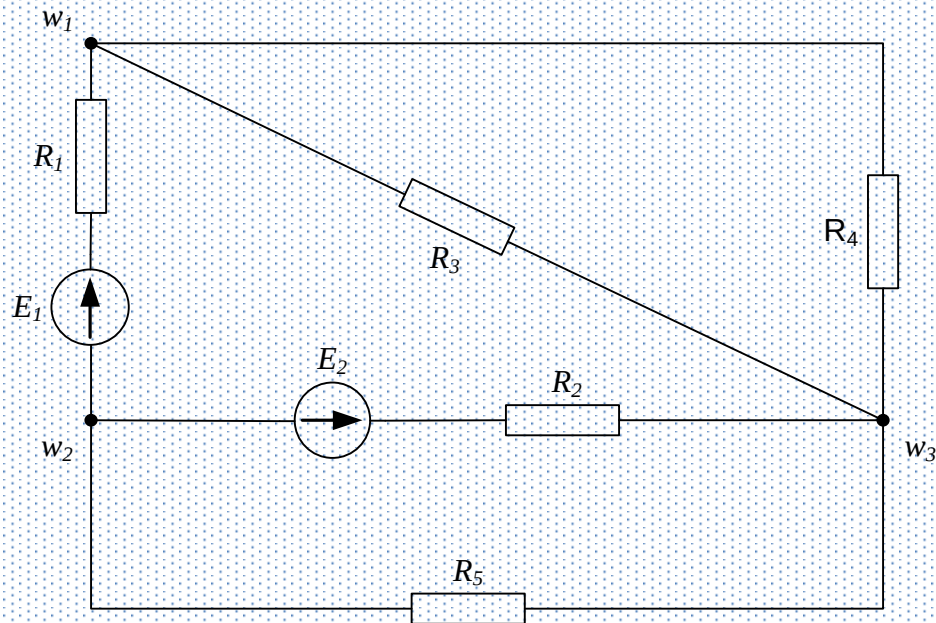
$$P_{sk} = \frac{I_{\max}^2}{2} R = \frac{U_{\max}^2}{2R} = \frac{1}{2} P_{\max}$$

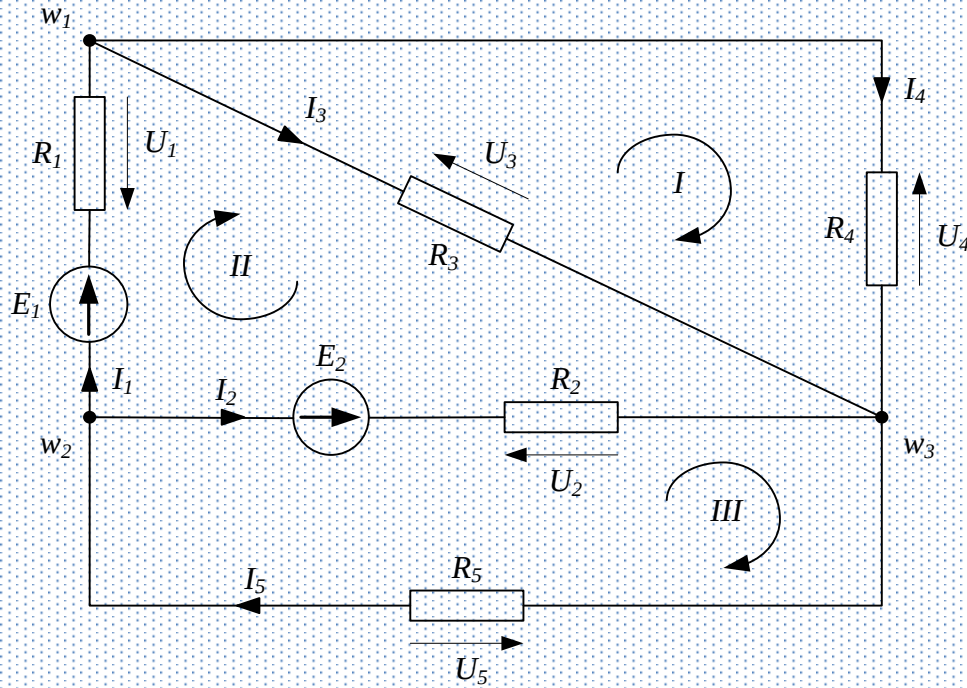
METODY ROZWIĄZYWANIA OBWODÓW LINIOWYCH

Rozwiązywaniem obwodów elektrycznych = znajdowanie prądów i napięć w poszczególnych gałęziach obwodów przy zadanych parametrach źródeł oraz elementów obwodu

Metoda klasyczna:

Zastosowanie praw Kirchhoffa i Ohma. Dla węzłów uzyskuje się $w-1$ równań, i po jednym równaniu dla każdego z oczek





$$w_1 : I_1 - I_2 - I_4 = 0$$

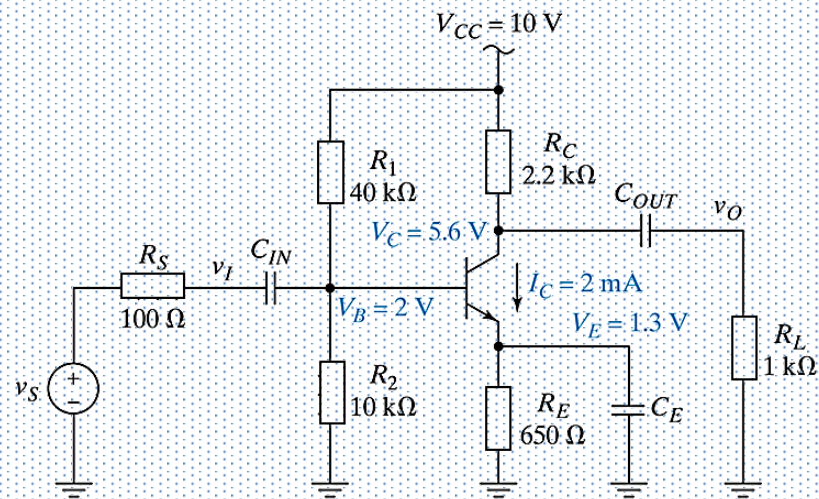
$$w_2 : -I_1 - I_2 + I_5 = 0$$

$$I : U_3 - U_4 = 0 \Rightarrow R_3 I_3 - R_4 I_4 = 0$$

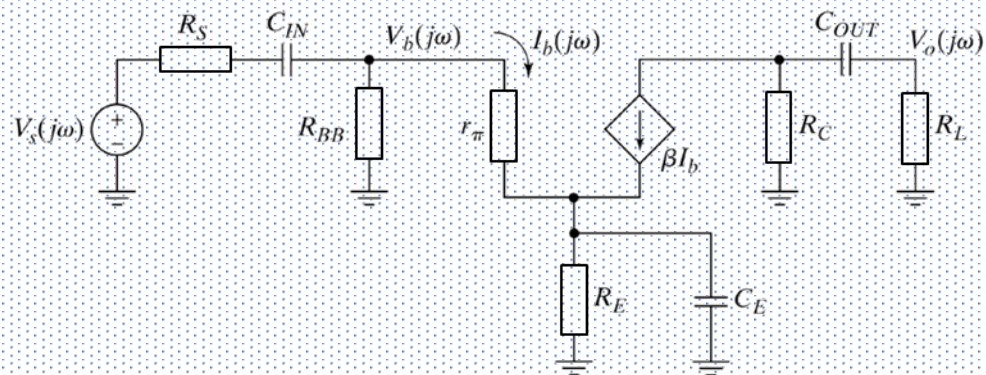
$$II : E_1 - E_2 - U_1 + U_2 - U_3 \Rightarrow E_1 - E_2 - I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 = 0$$

$$III : E_2 - U_2 - U_5 = 0 \Rightarrow E_2 - I_2 R_2 - I_5 R_5 = 0$$

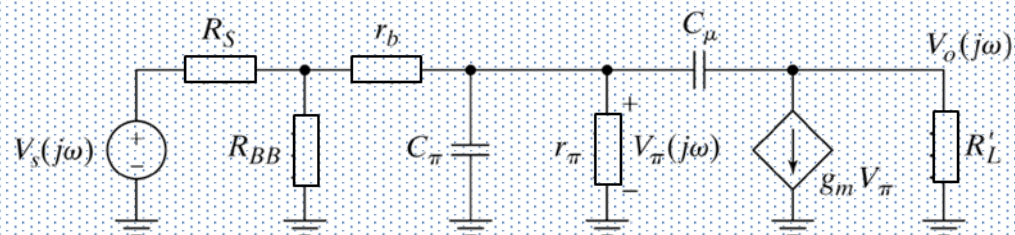
Przykład – schemat wzmacniacza



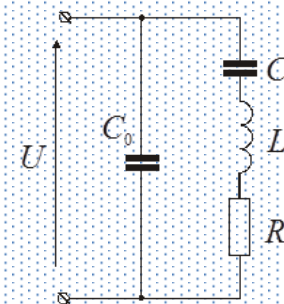
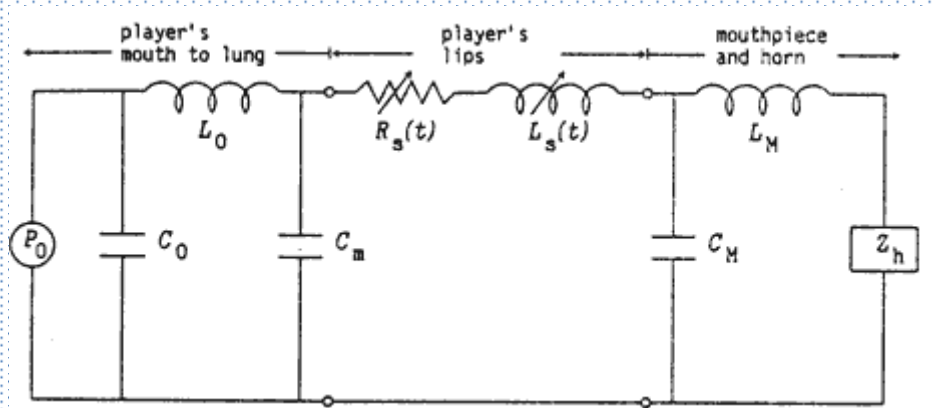
małosygnałowy
schemat zastępczy
dla niskich częstotliwości



małosygnałowy
schemat zastępczy
dla wysokich częstotliwości

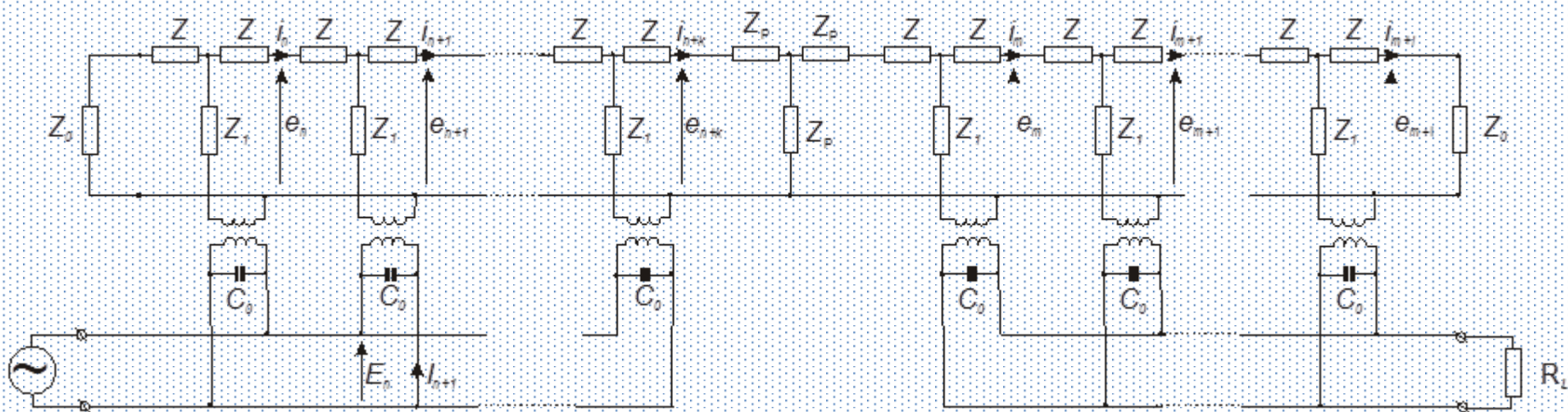


Schematy zastępcze przydają się także do rozwiązywania układów zawierających elementy nieelektryczne



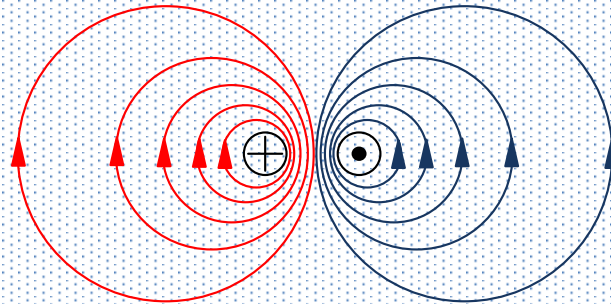
Schemat zastępczy rezonatora kwarcowego

Schemat zastępczy filtru z AFP



Magnetyzm

Bieguny jednoimienne magnesów się odpychają a różnoimienne przyciągają.



Obraz linii pola
magnetycznego dwóch
długich prostoliniowych
przewodów z prądem

Indukcja magnetyczna

wielkość wektorowa opisująca pole magnetyczne. Jest ona określana przez tzw. siłę Lorentza, czyli siłę działającą na ładunek elektryczny poruszający się w polu magnetycznym:

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad \text{lub skalarnie } F = qvB \sin \alpha$$

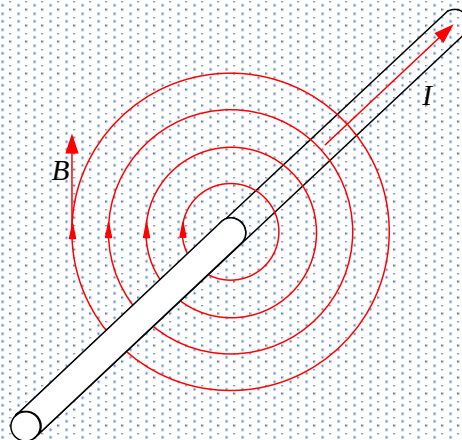
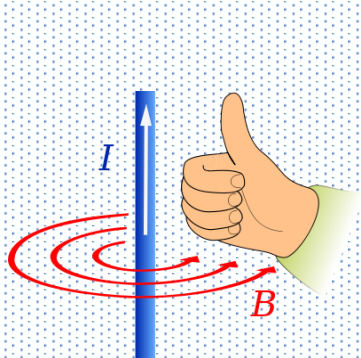
gdzie $\mathbf{F}$ jest siłą działającą na ładunek q , poruszający się z prędkością $\mathbf{v}$ w polu o indukcji magnetycznej $\mathbf{B}$, α - kąt pomiędzy wektorem prędkości a wektorem indukcji.

Jednostką indukcji magnetycznej jest jedna tesla (T).

Wartość indukcji magnetycznej jest równa sile działającej na ładunek jednego kulomba poruszający się w polu magnetycznym z prędkością 1 m/s, prostopadle do jego linii sił:

$$B = \frac{F}{qv}$$

Pole magnetyczne długiego przewodu prostoliniowego z prądem elektrycznym



$$B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi \cdot r}$$

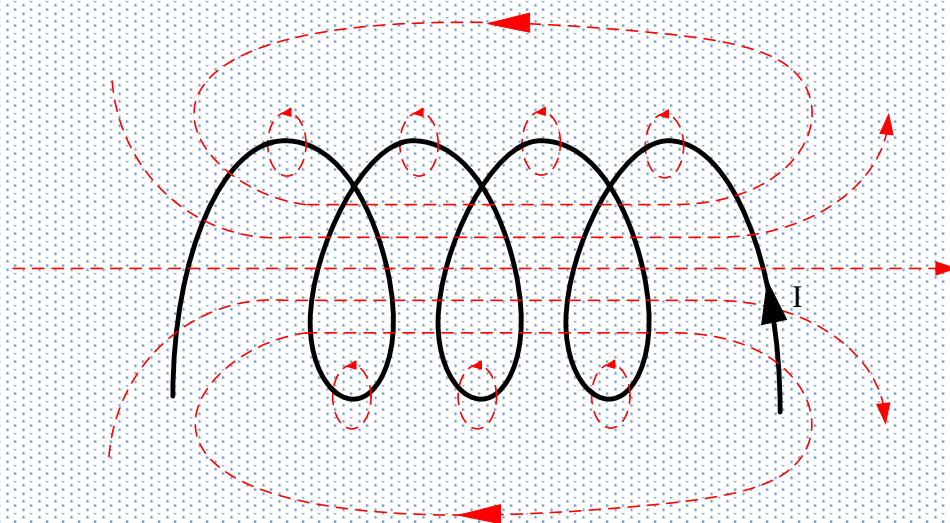
Przenikalność magnetyczna bezwzględna ośrodka: $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

μ_r – przenikalność magnetyczna względna danego środowiska odniesiona do przenikalności magnetycznej próżni

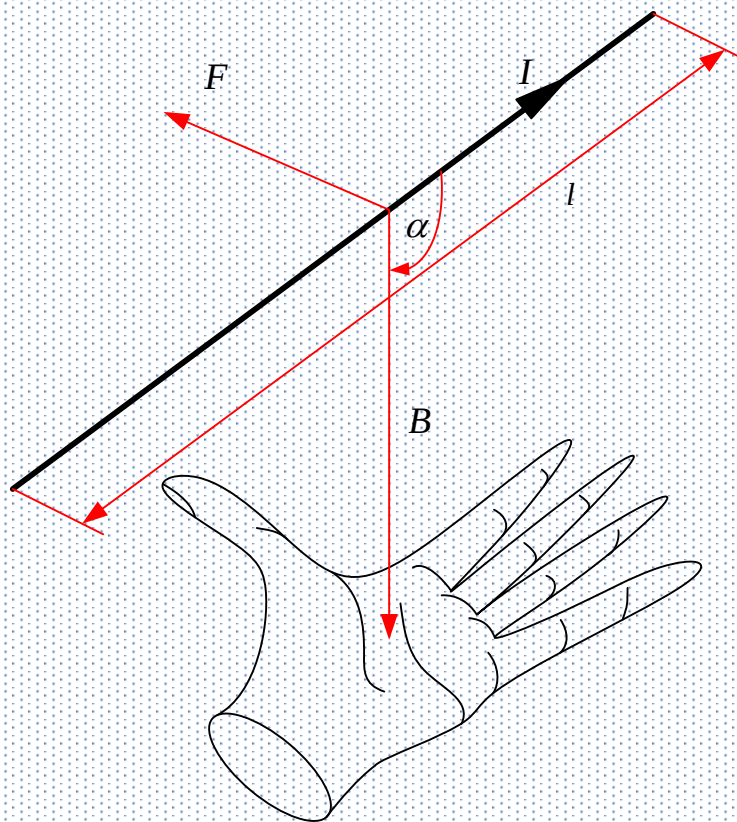
Wypadkowe pole magnetyczne cewki (solenoidu) z prądem elektrycznym



Prawo Ampere'a - siła działająca na przewód z prądem w polu magnetycznym

$$\vec{F} = \vec{B} \times \vec{I} \cdot l \quad \text{lub skalarnie} \quad F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$$

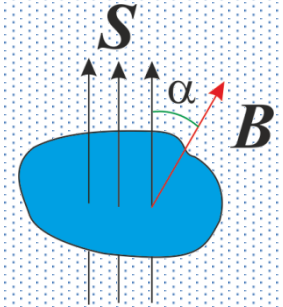
reguła lewej dłoni



Jeżeli przewód jest równoległy do linii pola nie działa na niego żadna siła.

Strumień indukcji magnetycznej

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



Dla powierzchni płaskiej i jednorodnego pola magnetycznego strumień wyraża się poprzez:

$$\Phi = \mathbf{B} \times \mathbf{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Dla powierzchni o dowolnym kształcie:

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int_S B \cdot dS \cdot \cos \alpha$$

$d\mathbf{S}$ - jest wektorem normalnym do powierzchni nieskończenie małego fragmentu S .

Jednostką strumienia indukcji magnetycznej jest weber (Wb).

Strumień indukcji magnetycznej przyjmuje wartość maksymalną, gdy wektor indukcji magnetycznej jest prostopadły do powierzchni, zaś równą 0, gdy jest do niej równoległy.

Strumień pola magnetycznego przechodzący przez dowolną powierzchnię zamkniętą jest równy zero.

Nie znaleziono w przyrodzie monopoli magnetycznych

Natężenie pola magnetycznego

Natężenie pola magnetycznego to wielkość wektorowa charakteryzująca pole magnetyczne, w ogólnym przypadku określana za pomocą prawa Ampera

$$I = \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

gdzie:

I - prąd przepływający przez powierzchnię ograniczoną krzywą C .

H - natężenie pola magnetycznego,

Jednostką w układzie SI jest A/m.

Natężenie pola magnetycznego jest wielkością charakteryzującą pole magnetyczne niezależną od własności materiału - wartością zależną jest natomiast indukcja magnetyczna.

Zachodzi między nimi związek:

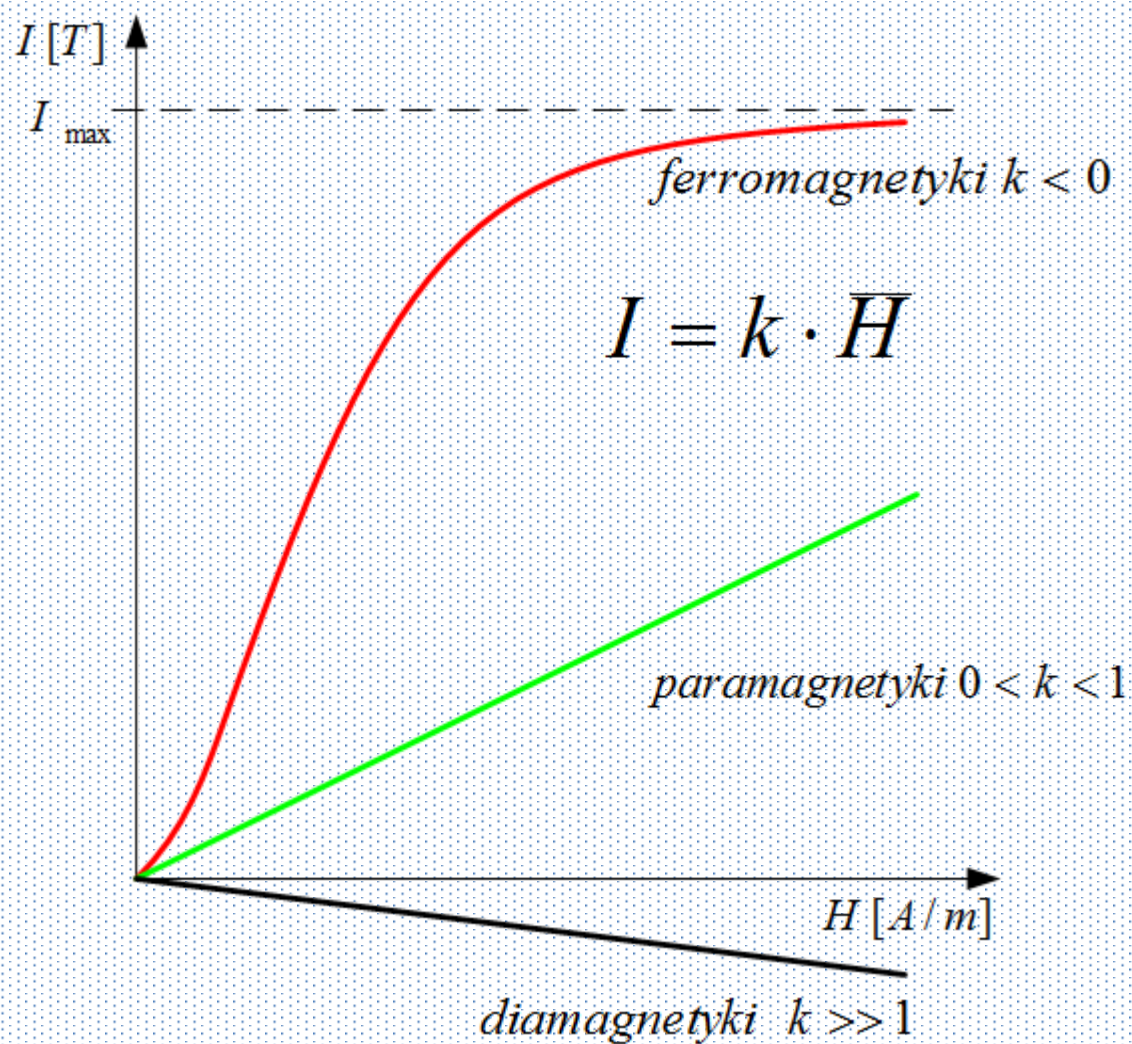
$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

W ogólnym przypadku przenikalność magnetyczna jest tensorem, a w przypadku materiałów liniowych liczbą (skalarem). Dla ośrodków nieliniowych przenikalność magnetyczna nie jest stałą lecz funkcją.

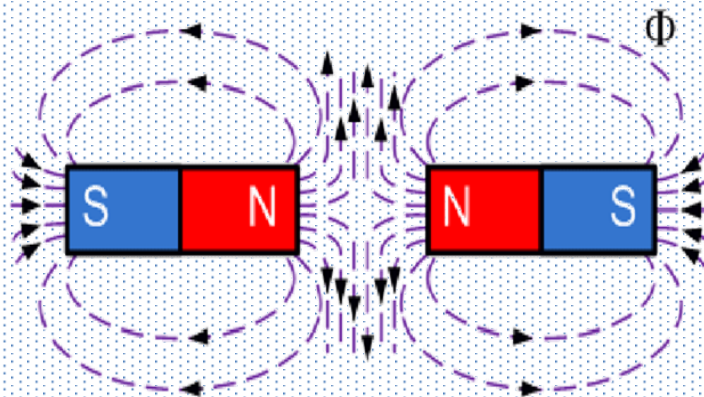
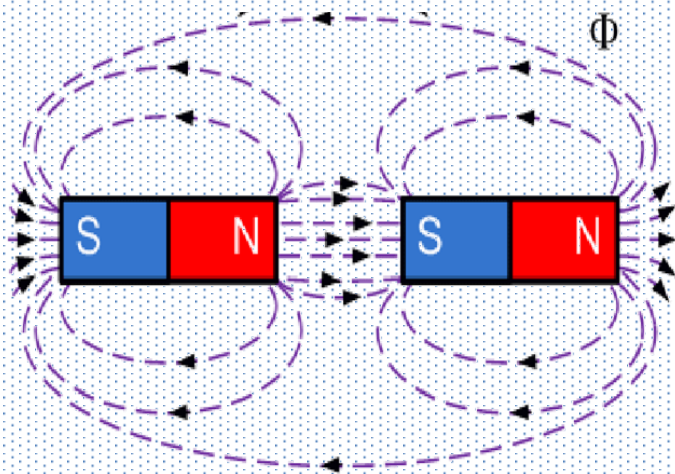
Dla N – zwojowej cewki bez rdzenia (powietrznej), dla której długość l jest dużo większa niż jej średnica, natężenie pola magnetycznego w jej środku geometrycznym wynosi:

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

Podział materiałów ze względu na ich własności magnetyczne



Istnieją ferromagnetyki, które po usunięciu zewnętrznego pola magnetycznego wykazują stałe namagnesowanie i stają się źródłami pola magnetostatycznego. W najprostszym przypadku są to dipole magnetyczne (monopoli nie zauważono) zwane potocznie magnesami.



Cd. na wykładzie poświęconym
elementom ferrytowym

