

Podstawy fizyki – sezon 2

3. Prąd elektryczny

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Prąd elektryczny

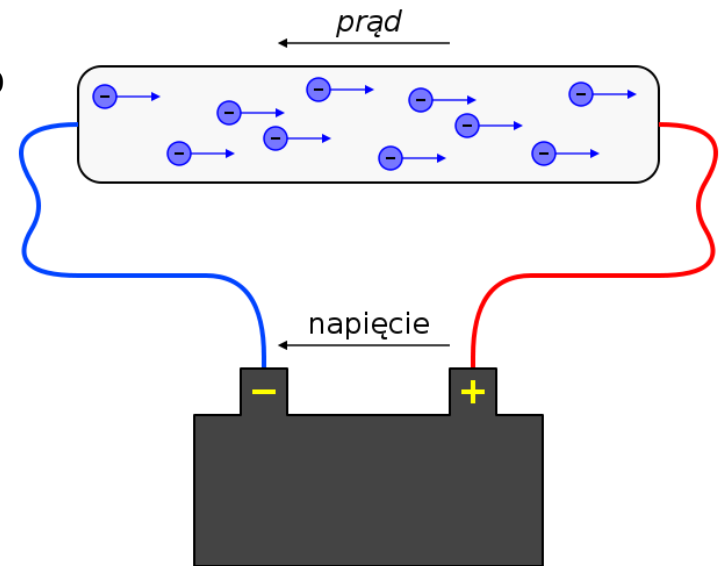
- ▶ **Prąd elektryczny** – uporządkowany (skierowany) ruch ładunków elektrycznych.
- ▶ Kierunek przepływu prądu wyznacza ruch ładunku dodatniego (kierunek przeciwny do ruchu elektronów).
- ▶ **Natężenie prądu** – szybkość, z jaką ładunki przepływają przez przekrój poprzeczny przewodnika (pochodna przepływającego ładunku po czasie).

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$[i] = \frac{C}{s} = A$$

$$I = \frac{Q}{t}$$

średni prąd?



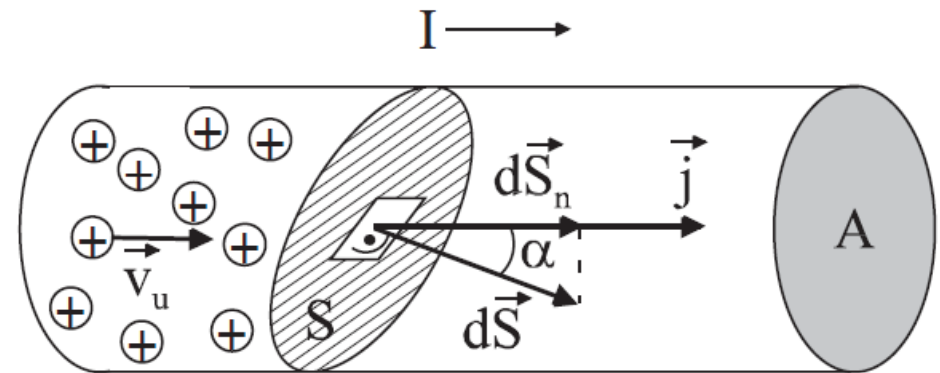
- ▶ Na razie omawiać będziemy prąd stały swobodnych elektronów w metalach.

Gęstość prądu

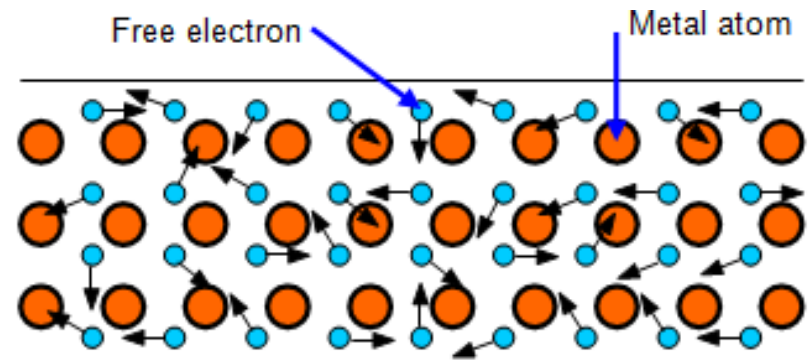
- ▶ Patrząc na przekrój przewodnika, określić można gęstość prądu (wektor) – przepływ prądu przez jednostkową powierzchnię

$$\vec{j} = \frac{d\vec{I}}{dS}$$

$$I = \int \vec{j} \cdot d\vec{S}$$



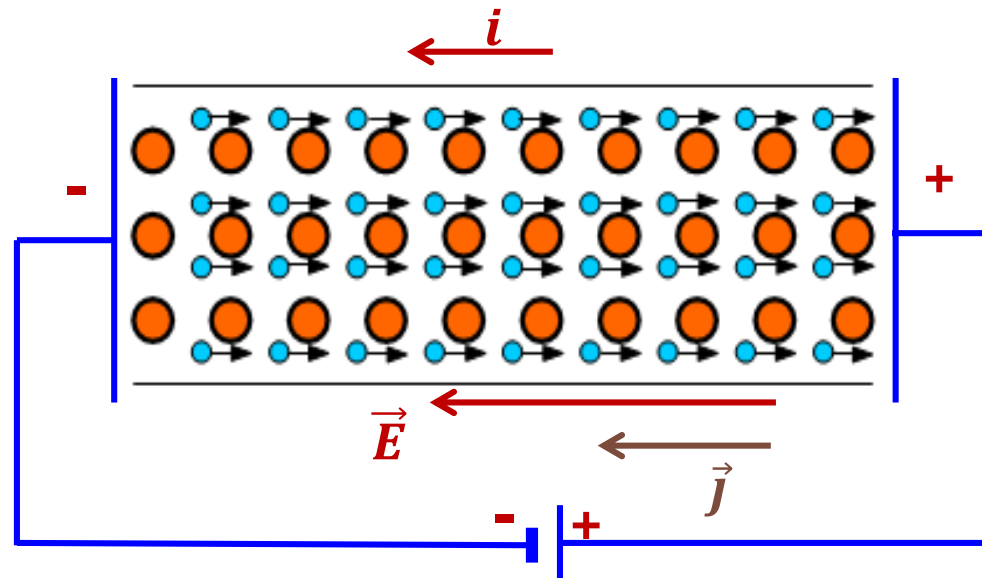
- ▶ Elektrony przewodnictwa poruszają się chaotycznie w całej objętości metalu pod wpływem energii cieplnej, zderzają się – brak jest uporządkowanego ruchu, brak przepływu prądu.



Gęstość prądu

- ▶ Pod wpływem przyłożonego napięcia ruch elektronów zaczyna być uporządkowany – płynie prąd.

- ▶ Prąd wywołany ruchem cząstek naładowanych dodatnio uważamy za równoważny z prądem wywołanym ruchem cząstek naładowanych ujemnie; za kierunek prądu przyjmujemy umownie kierunek poruszania się ładunków dodatnich.



- ▶ Prędkość dryfu elektronów w metalu jest rzędu $10^{-5} \frac{m}{s}$ (b.mała- p. RHW).

Dlaczego zatem światło zapala się bezpośrednio po naciśnięciu, nawet jak przełącznik jest kilkanaście metrów od żarówki?

Opór elektryczny

- ▶ Jeżeli do przewodnika przyłożymy napięcie U , to przez przewodnik płynie prąd, którego natężenie I jest proporcjonalne do przyłożonego napięcia.

Stosunek **napięcia** przyłożonego do przewodnika do **natężenia** prądu przepływającego przez ten przewodnik jest **stały** i nie zależy ani od napięcia ani od natężenia prądu.

- ▶ Prawo Ohma jest słuszne pod warunkiem, że przewodnik znajduje się w stałej temperaturze.
- ▶ Opór elektryczny zależy od rodzaju przewodnika i jego wymiarów geometrycznych

$$\rho = \frac{E}{J} \quad R = \rho \frac{l}{S}$$

Prawo Ohma

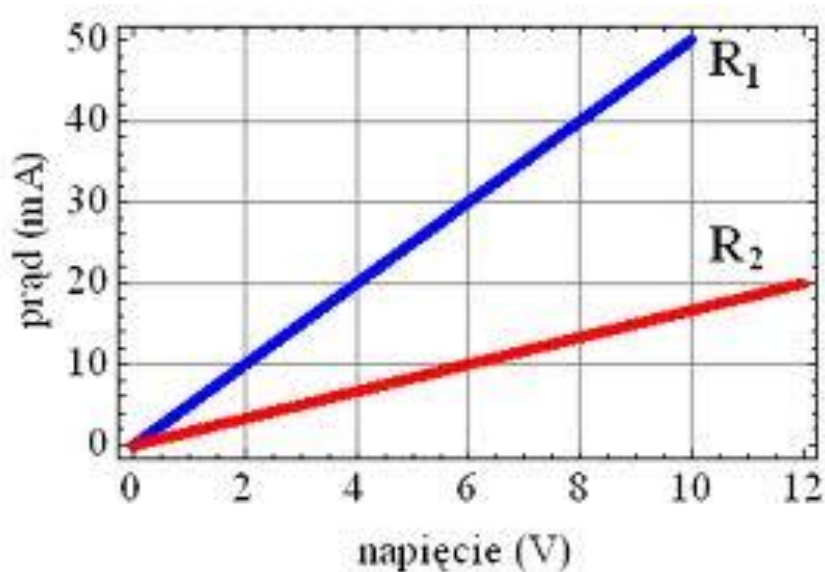
$$\frac{U}{I} = \text{const}$$

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

Stosunek U/I nazywamy oporem elektrycznym.

pyt: jak zmieni się opór, jak zwiększymy napięcie dwa razy?

Oporniki



- ▶ Prawo Ohma to charakterystyka prądowo-napięciowa metali w stałej temperaturze.
- ▶ Prawo Ohma jest definicją oporu

- ▶ Kolor pasków oznacza wartość oporu (kod dla wtajemniczonych)

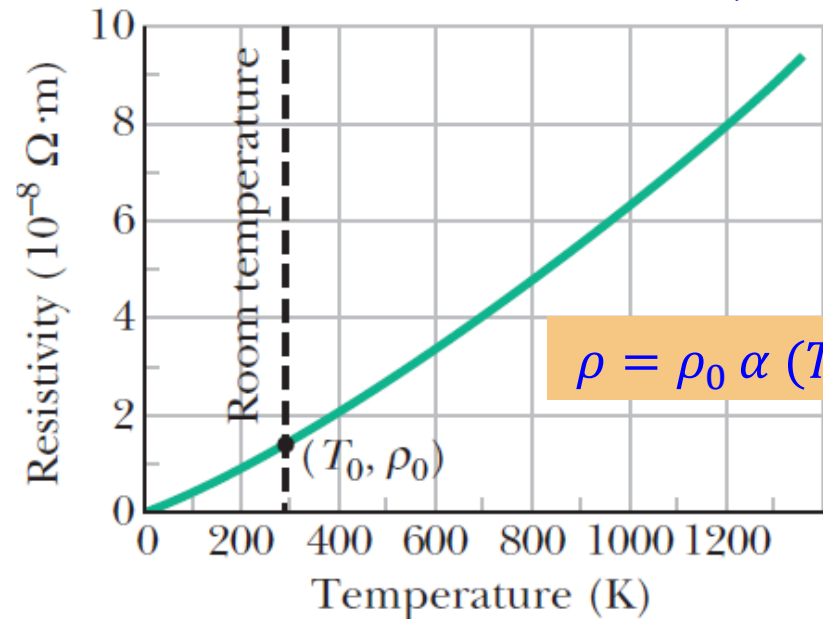


Opór właściwy

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

- Opór właściwy ρ (rezystywność) zależy od prędkości dryfu nośników, czyli od temperatury.
- Odwrotnością oporu właściwego jest **przewodność** właściwa $\sigma = \frac{1}{\rho}$

Material	Opór właściwy $\Omega \cdot m$
srebro	$1.6 \cdot 10^{-8}$
miedź	$1.7 \cdot 10^{-8}$
glin	$2.8 \cdot 10^{-8}$
wolfram	$5.3 \cdot 10^{-8}$
platyna	$1.1 \cdot 10^{-7}$
krzem	$2.5 \cdot 10^3$
szkło	$10^{10} - 10^{14}$

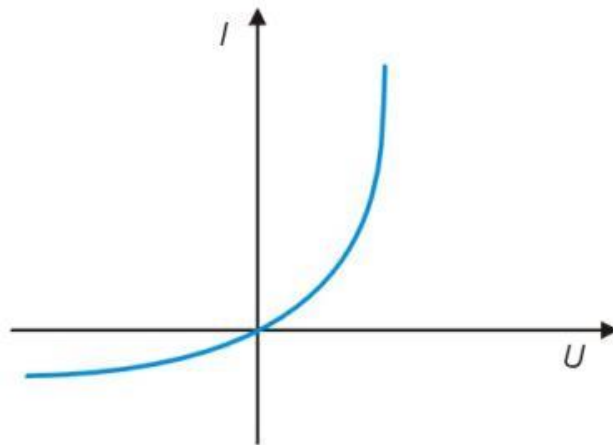


$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

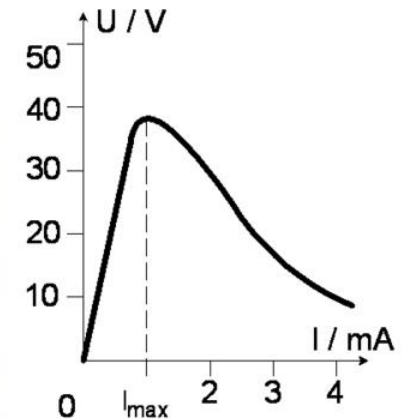
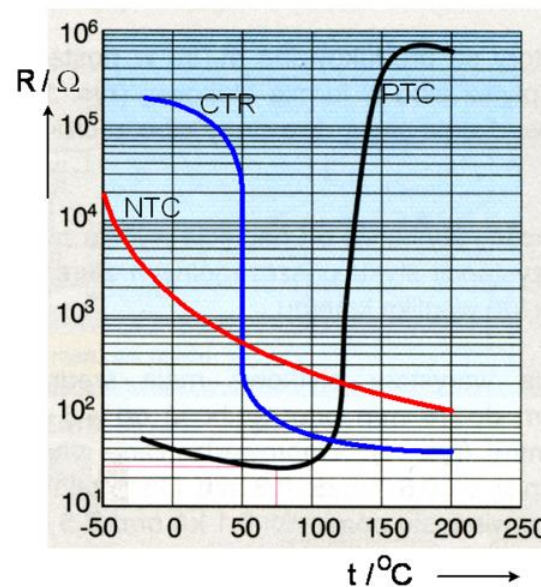
temp. wsp. oporu własc. (względna zmiana oporu na jedn. temp)

Charakterystyki I(U)

- ▶ Warto zauważyć, że liniowa zależność (prawo Ohma) napięcia od natężenia prądu oporników dotyczy tylko niewielkiej części przyrządów i to jedynie w stałej temperaturze.
- ▶ Ciekawe charakterystyki U(I):



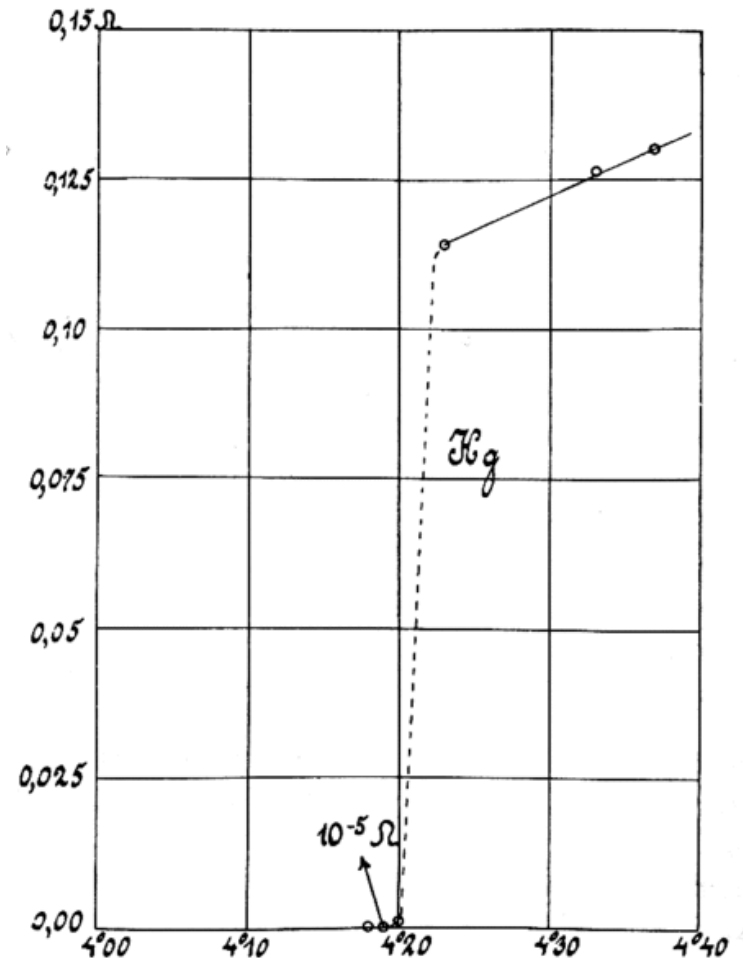
dioda próżniowa



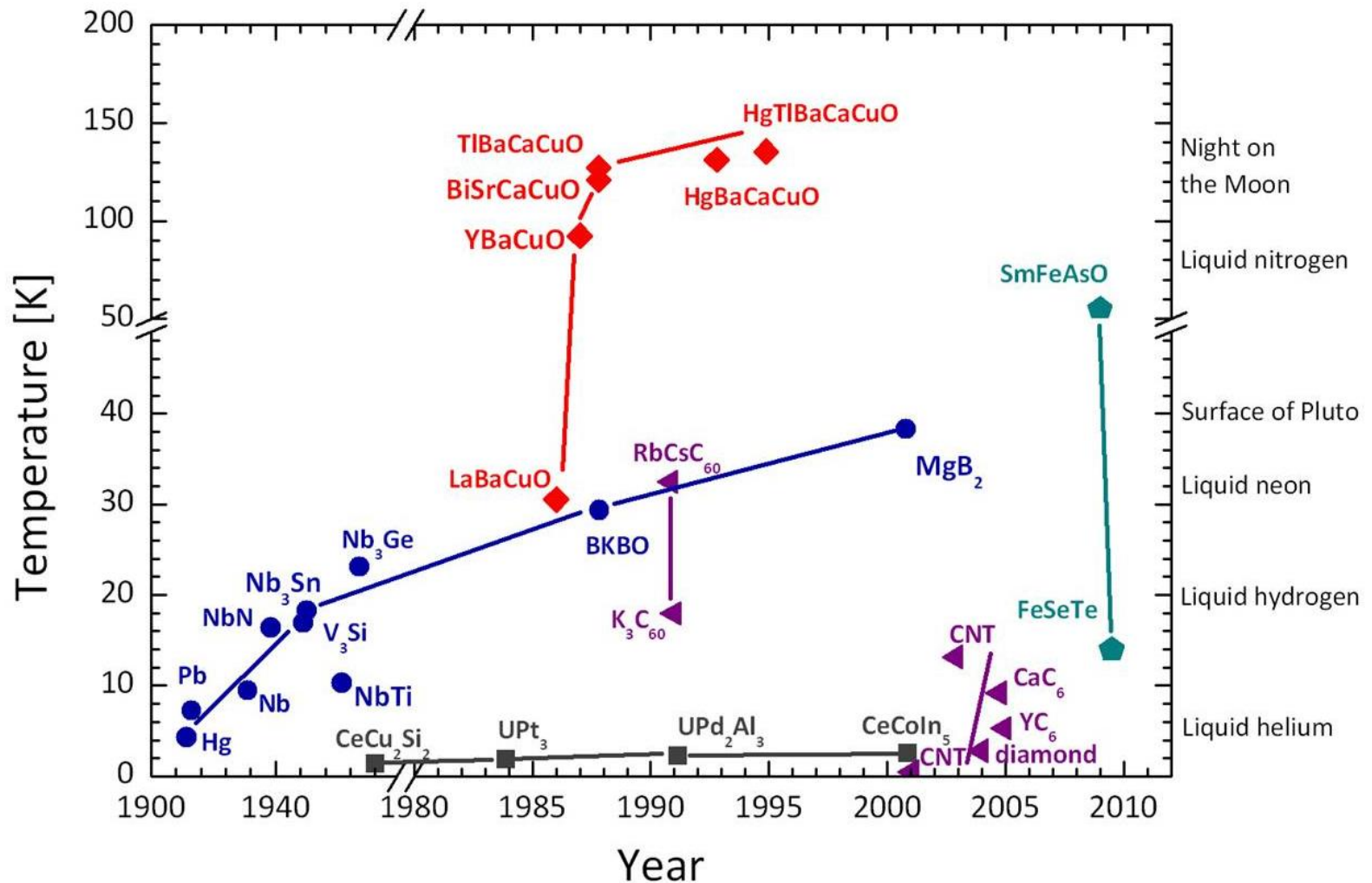
termistor – opór silnie zależy od temperatury

Nadprzewodnictwo

- ▶ W 1911 roku wykryto zjawisko **nadprzewodnictwa**, polegające na tym, że w pobliżu zera bezwzględnego niektóre substancje wykazują nagły zanik oporu. Prądy wzbudzone w stanie nadprzewodzącym utrzymują się w obwodzie bez zasilania zewnętrznego przez wiele lat.
- ▶ 1986 – nagroda Nobla za odkrycie materiałów o właściwościach nadprzewodzących w temp 100 K (bardzo wysokiej)
- ▶ Obecnie nadprzewodniki mają już szerokie zastosowanie techniczne – od eksperymentów fizyki po badanie medyczne – rezonans magnetyczny

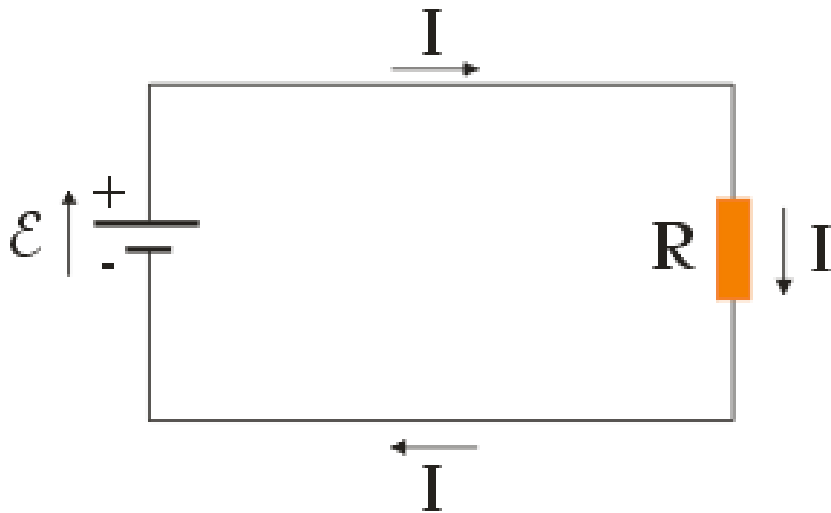


Temperatury krytyczne



Jak wytworzyć prąd?

- ▶ Prąd – przepływ ładunku – może być spowodowany:
 - rozładowaniem kondensatora (chwilowy, malejący prąd),
 - podłączeniem źródła utrzymującego stałą różnicę potencjałów na końcach przewodnika (źródło siły elektromotorycznej SEM) – ogniwa (baterii), również słonecznej, prądnicy elektrycznej
 - zmiennym polem magnetycznym (jeszcze nie dzisiaj....)



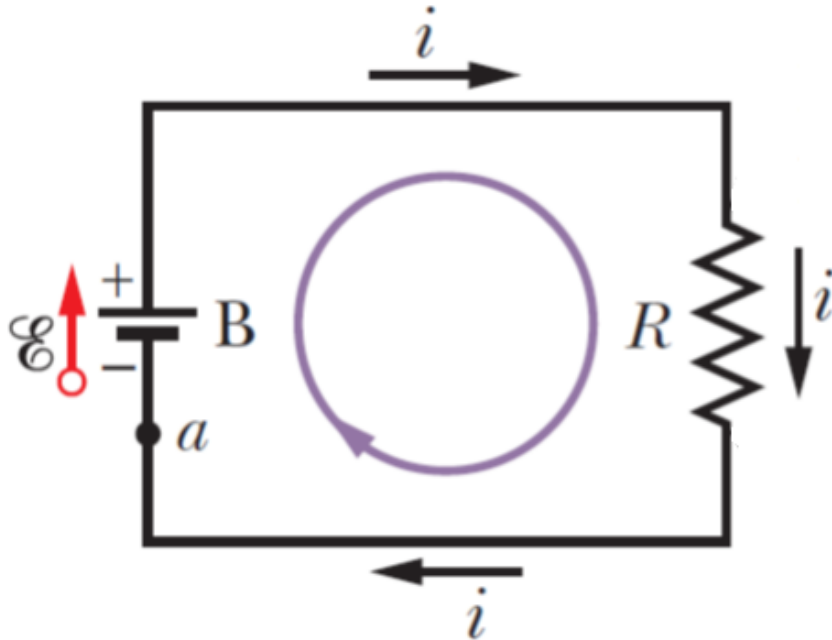
- źródło SEM – źródło energii przesuwałcej ładunki,
- dodatnie nośniki płyną od ujemnego do dodatniego (w kier. strzałki),
- ruchowi ładunku przez opór R towarzyszy spadek potencjału V ,
- zmiana energii ładunku na ciepło wynosi:

$$dE = dq U = I dt U$$

- moc: $P = I U \quad \left[\frac{J}{C} \frac{C}{s} = \frac{J}{s} = W \right]$

Prąd w oczku

- ▶ Oczko – zamknięty obwód elektryczny



- ▶ Analiza potencjałów:

- przesuwamy się po obwodzie i liczymy spadki napięć, zaczynając od dowolnego punktu, np. **a**,

$$V_a + \varepsilon - IR = V_a$$

$$\varepsilon - IR = 0$$

- wracając do **a**, powinno się dostać ten sam potencjał

Drugie prawo Kirchhoffa:

Algebraiczna suma zmian potencjałów napotykanym przy przejściu dowolnego oczka musi być równa zero.

Energia w oczku

- Praca wykonana przez baterię nad ładunkiem wynosi:

$$dW = \mathcal{E} dq = \mathcal{E} I dt$$

- Zostaje ona zamieniona na energię cieplną wydzieloną na oporniku (ciepło Joule'a):

$$\mathcal{E} I dt = I^2 R dt$$

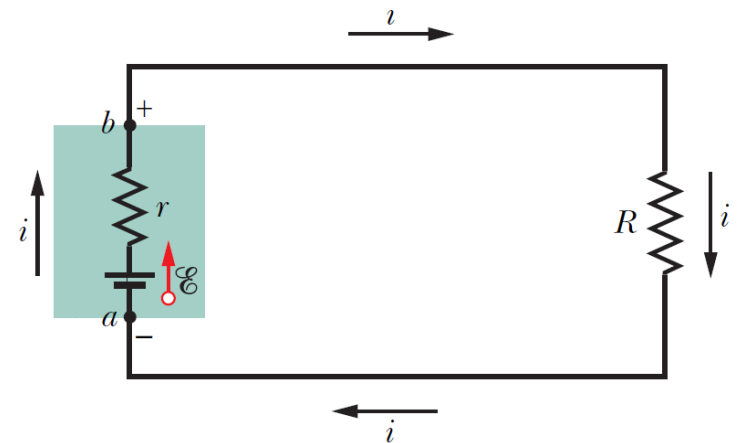
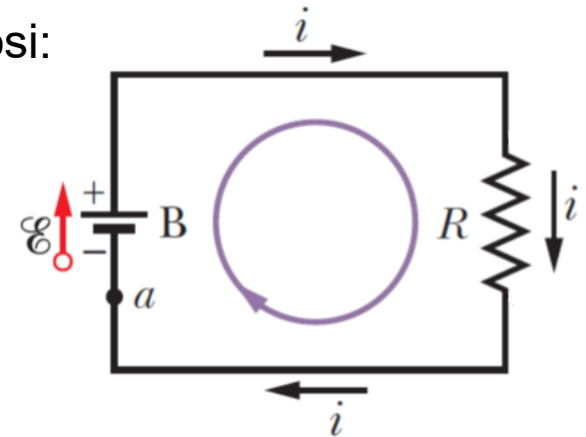
stąd:

$$\mathcal{E} = I R$$

- Rzeczywista bateria ma swój opór (wewnętrzny)

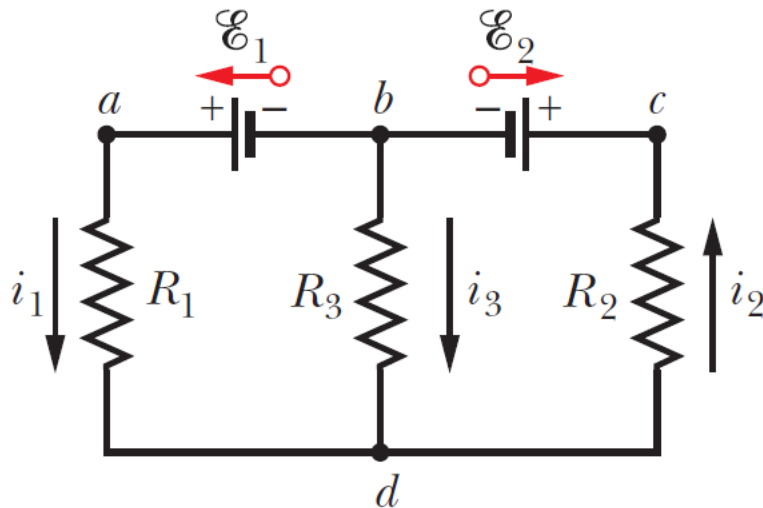
II p. Kirch: $\mathcal{E} - Ir - IR = 0$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$



Wiele oczek

- Układ o trzech oczkach i trzech gałęziach:



- Jakie prądy płyną w każdej gałęzi?

$$I_1 + I_3 = I_2$$

Pierwsze prawo Kirchhoffa:

Suma natężeń prądów wpływających do dowolnego węzła jest równa sumie natężeń prądów wypływających z tego węzła.

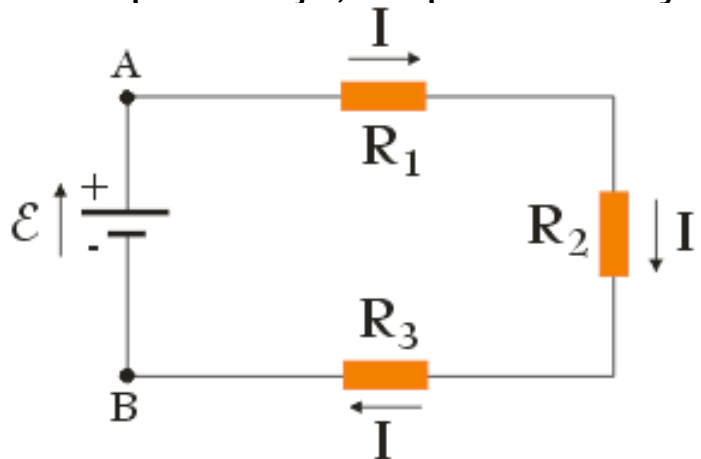
- Rozwiązujemy obwód stosując napięciowe prawo Kirchhoffa dla dowolnych dwóch oczek, licząc spadki napięć:

$$\mathcal{E}_1 - I_1 R_1 + I_3 R_3 = 0$$

$$-I_3 R_3 - I_2 R_2 - \mathcal{E}_2 = 0$$

Szeregowe połączenie oporników

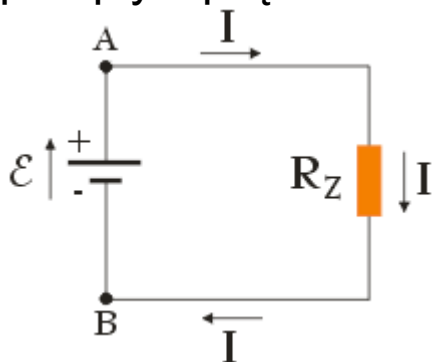
- ▶ Różnica potencjałów przyłożona do oporników połączonych szeregowo powoduje, że przez każdy z nich płynie taki sam prąd



$$\varepsilon - IR_1 - IR_2 - IR_3 = 0$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_2 + R_3}$$

- ▶ Obwód można zastąpić obwodem równoważnym, w którym źródło powoduje przepływ prądu o natężeniu I przez równoważny (zastępczy) opór R_Z



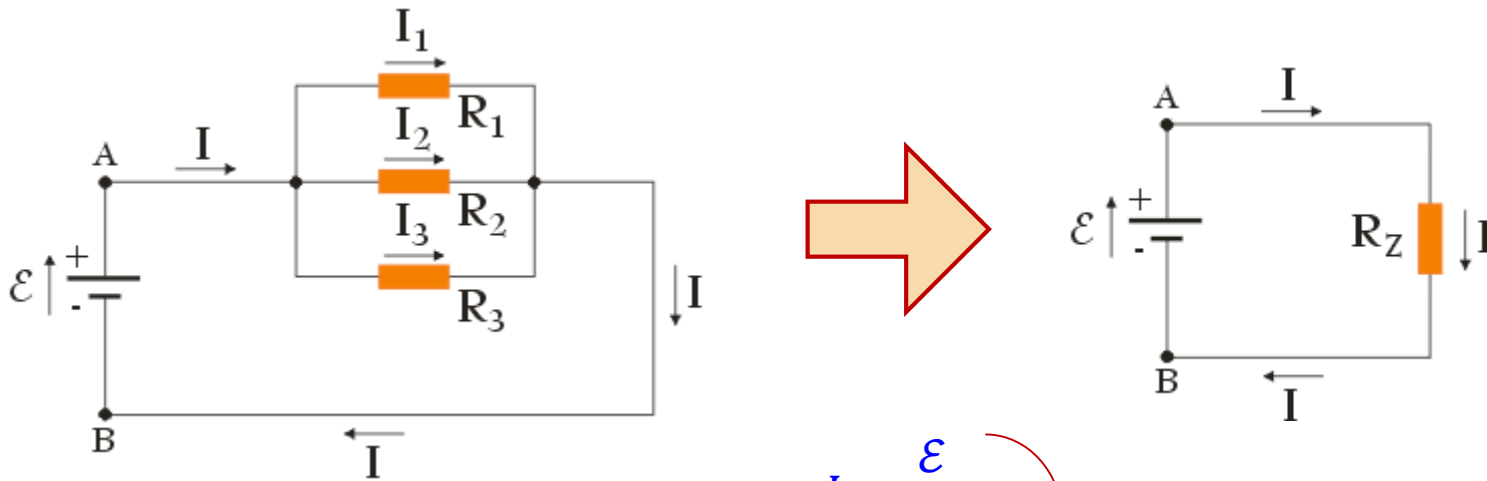
$$\varepsilon - I R_Z = 0$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R_Z}$$

$$R_Z = \sum R_i$$

Równoległe połączenie oporników

- Na wszystkich opornikach przyłożona jest taka sama różnica potencjałów



$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R_Z}$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R_1} + \frac{\varepsilon}{R_2} + \frac{\varepsilon}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_Z} = \sum \frac{1}{R_i}$$

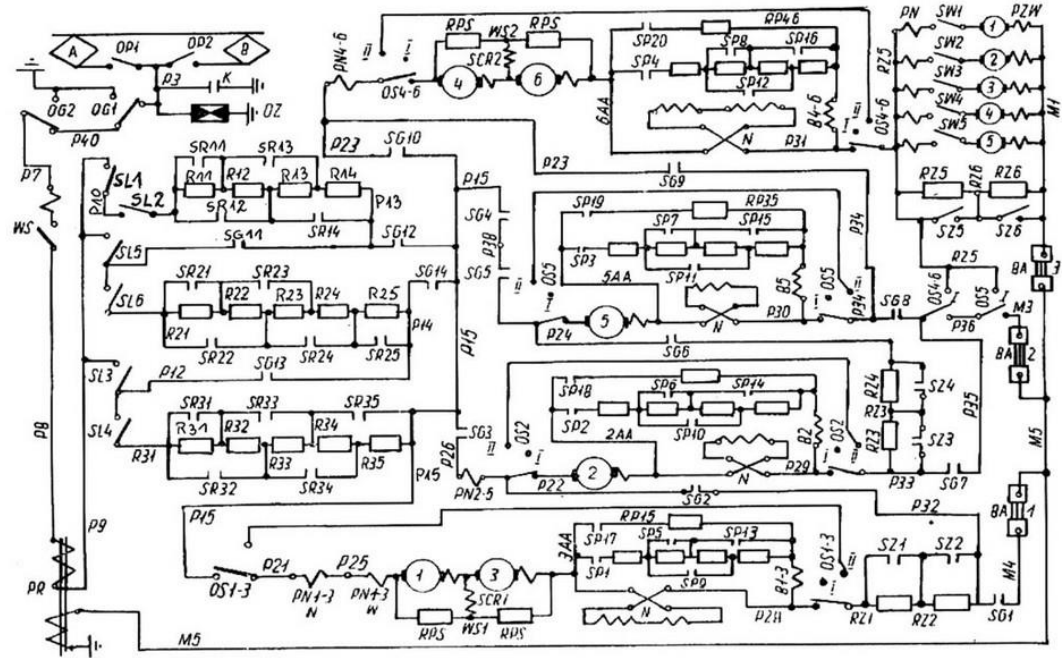
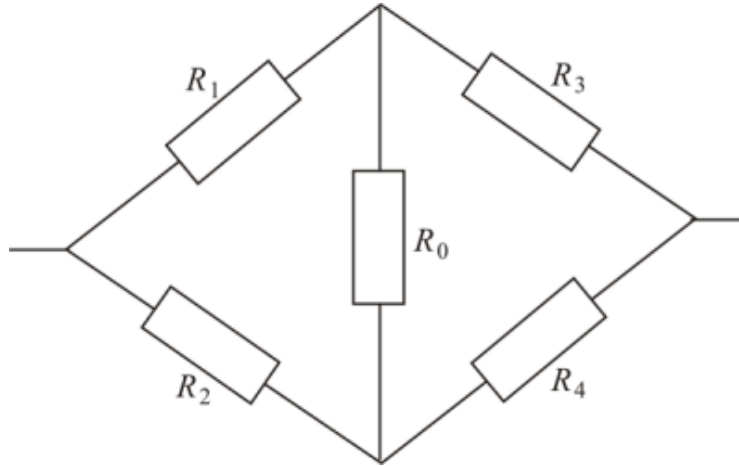
$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{\varepsilon}{R_3}$$

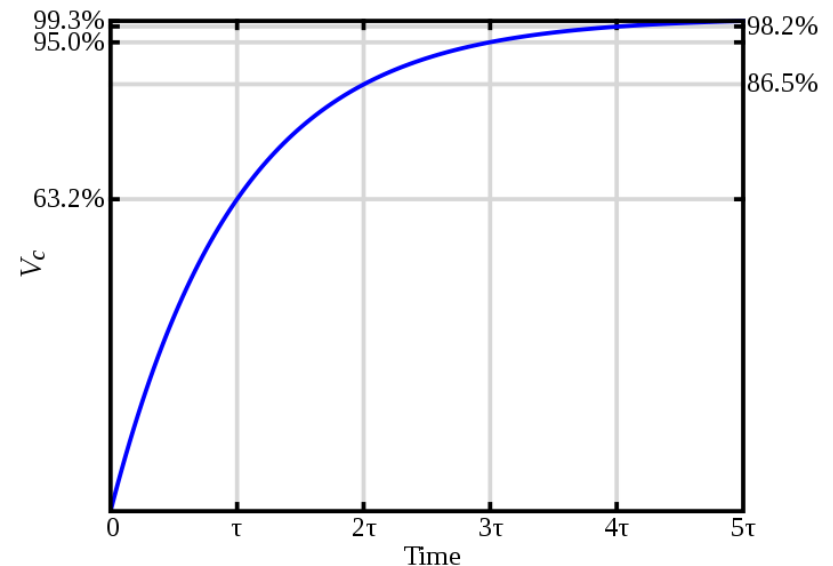
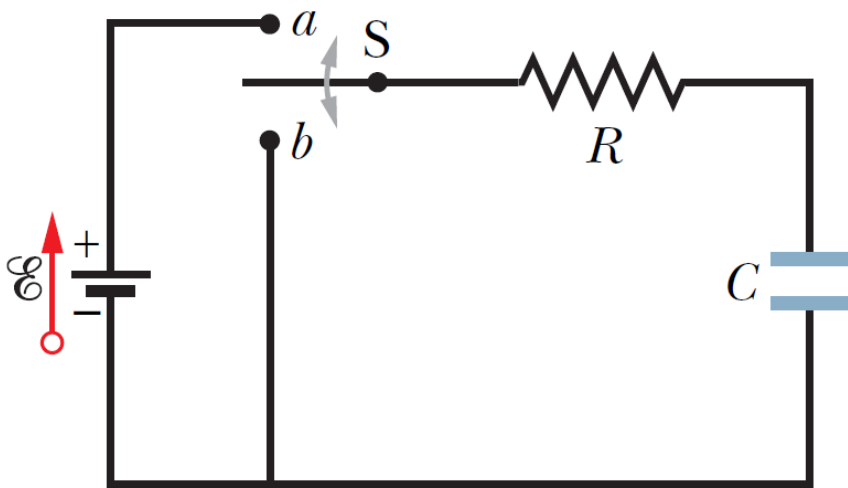
Życie nie jest jednak tak proste...

- Czasem jednak oporniki nie są połączone, ani szeregowo, ani równolegle...



Układy RC

- ▶ W celu naładowania kondensatora C podłączamy go do źródła SEM i opornika R .
- ▶ Na początku ($t=0$), kondensator jest całkowicie rozładowany,
- ▶ Z chwilą zamknięcia obwodu (poz. a), kondensator się ładuje – zwiększa się ładunek i napięcie na okładkach kondensatora, aż zostanie całkowicie naładowany



Układ RC

- ▶ Podczas ładowania kondensatora zmienia się również natężenie prądu w obwodzie i napięcie na oporze.
- ▶ Napięciowe prawo Kirchhoffa:

$$\mathcal{E} - U_R - U_C = 0$$

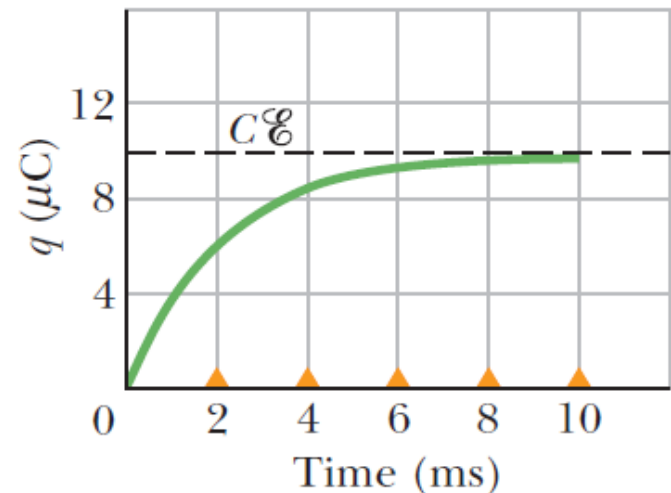
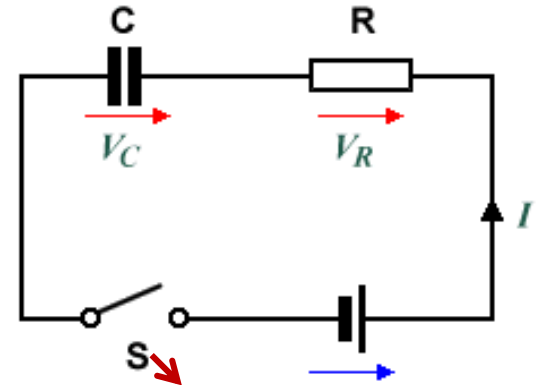
$$\mathcal{E} - IR - \frac{q}{C} = 0$$

$$I = \frac{dq}{dt}$$

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = \mathcal{E}$$

Rozwiązaniem (sprawdzić!) tego równania jest funkcja:

$$q(t) = C\mathcal{E}(1 - e^{-t/(RC)})$$



Stała czasowa RC

- ▶ Prąd w obwodzie RC:

$$I = \frac{dq}{dt} = \left(\frac{\mathcal{E}}{R}\right) e^{-t/(RC)}$$

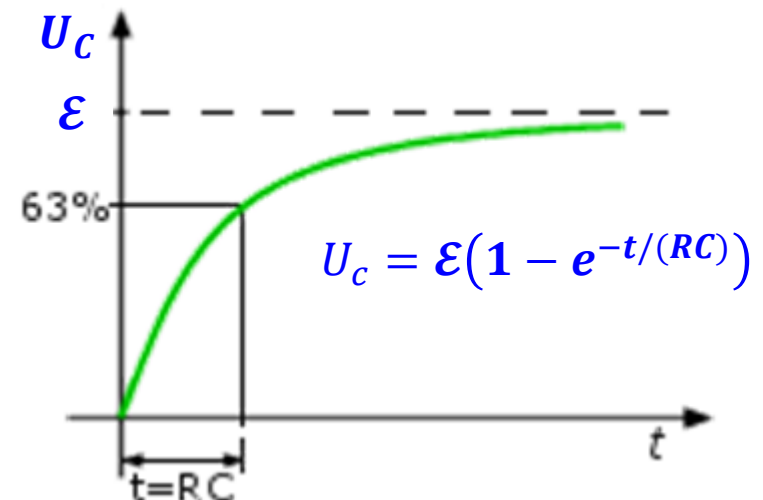
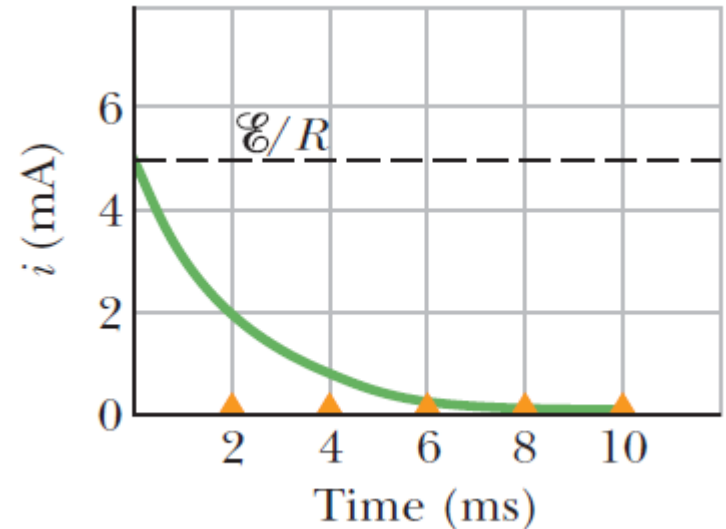
- ▶ Kondensator po naładowaniu jest po prostu **przerwą** w obwodzie, przepływ prądu jest w istocie rozładowaniem kondensatora.

- ▶ Napięcie na kondensatorze:

$$U_c = \frac{q}{C} = \mathcal{E}(1 - e^{-t/(RC)})$$

- ▶ Iloczyn oporu i pojemności – **stała czasowa** układu - $\tau = RC$

Im większa stała czasowa, tym dłużej kondensator się rozładowuje



Rozładowanie kondensatora

- ▶ Jeżeli teraz kondensator zacznie się rozładowywać – przełącznik w pozycji „b”

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0$$

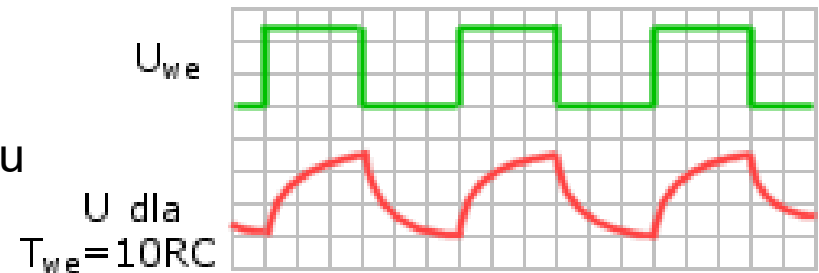
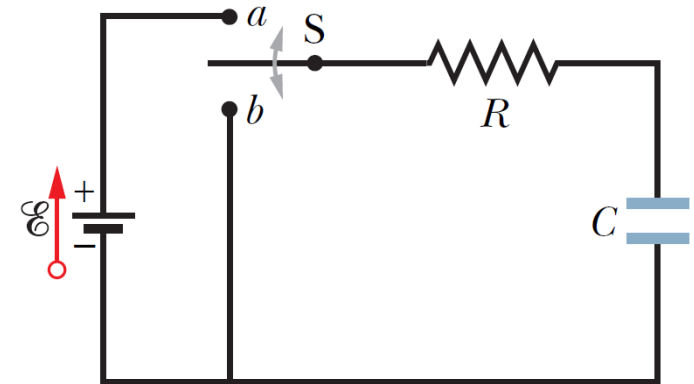
- ▶ Rozwiązanie – zależność ładunku od czasu:

$$q(t) = q_0 e^{-t/(RC)}$$

- ▶ A natężenie prądu:

$$I = \frac{dq}{dt} = - \left(\frac{q_0}{RC} \right) e^{-t/(RC)}$$

- ▶ Jeżeli ładowanie i rozładowanie nastąpią wielokrotnie, to otrzymamy oscylacje prądu (ładunku, napięcia)



Podsumowanie

- ▶ Prąd elektryczny – ruch elektronów.
- ▶ Natężenie prądu.
- ▶ Opór, opór właściwy, prawo Ohma.
- ▶ Moc i ciepło w obwodach.
- ▶ Prawa Kirchhoffa.
- ▶ Układy RC

* rysunki pochodzą z:

HALLIDAY & RESNICK
**FUNDAMENTALS
OF PHYSICS**

Jearl Walker

John Wiley & Sons, Inc.