

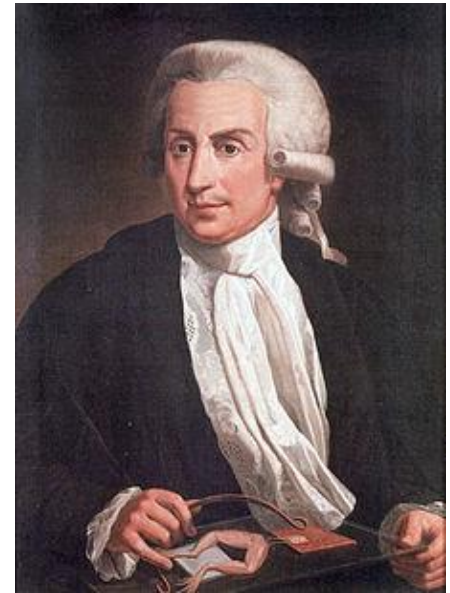
# Elektrický proud v kovech



# 13. Vznik elektrického proudu

## Historické poznámky

- 1. polovina 19. století: žeň objevů v oblasti elektromagnetismu
- **Luigi Galvani (1737 – 1798)**: italský lékař a fyzik; průkopník moderního porodnictví; objevil, že svaly žáby se po zásahu jiskry statické elektřiny stahují – nesprávně vyvodil „živočišnou elektřinu“
- **Alessandro Volta (1745 – 1827)**: 1799-1800 první elektrický článek – tzv. Voltův sloup; opravil Galvaniho a správně vyvodil, že zdrojem a příčinou je elektrochemická reakce dvou kovů; je po něm pojmenovaná jednotka el. napětí



# 13. Vznik elektrického proudu

## Historické poznámky

### ➤ **André Marie Ampère (1775 – 1836):**

- ⇒ francouzský matematika a fyzik;
- ⇒ nikdy nechodil do školy ;-)
- ⇒ vzděláván otcem, který skončil pod gilotinou;
- ⇒ 1820 – cívka s proudem vyvolává magnetické pole
- ⇒ 1827 – **pravidlo pravé ruky** (prsty ve směru proudu, palec ukazuje severní pól cívky);
- ⇒ objevil vztah pro magnetickou sílu působící na vodič s proudem;
- ⇒ vynalezl galvanometr (měřič malých el. napětí a proudů) a komutátor (součást elektrických motorů);
- ⇒ zavedl pojem „kybernetika“;
- ⇒ je po něm pojmenovaná **jednotka el. proudu**



# 13. Vznik elektrického proudu

## Historické poznámky

- **Georg Simon Ohm (1789 – 1854)**: německý fyzik; místo studia na univerzitě se věnoval večírkům; 1827 odvodil vztah mezi napětím a proudem v obvodu (Ohmův zákon); 1843 položil základy fyziologické akustiky; je po něm pojmenovaná jednotka elektrického odporu
- **Hans Christian Ørsted (1777 – 1851)**: dánský fyzik, chemik, filozof; výzkum elektromagnetických jevů: el. proud působí na střelku kompasu; 1825 izoloval hliník; je po něm pojmenovaná jednotka intenzity magnetického pole



# 13. Vznik elektrického proudu

## Historické poznámky

- **Michael Faraday (1791 – 1867)**: anglický chemik a fyzik; 1831 objevil elektromagnetickou indukci, magnetické a elektrické siločáry; je po něm pojmenovaná jednotka el. kapacity (kondenzátory)
- **James Clerk Maxwell (1831 – 1879)**: skotský fyzik, potomek starého šlechtického rodu; první vědeckou práci publikoval ve 14 letech; 1865 objevil matematický popis (4 rovnice) elektromagnetického pole; vysvětlil, proč Měsíc nemůže mít atmosféru (Maxwellovo rozdělení rychlostí plynů); 1861 jako první publikoval základy barevné fotografie;



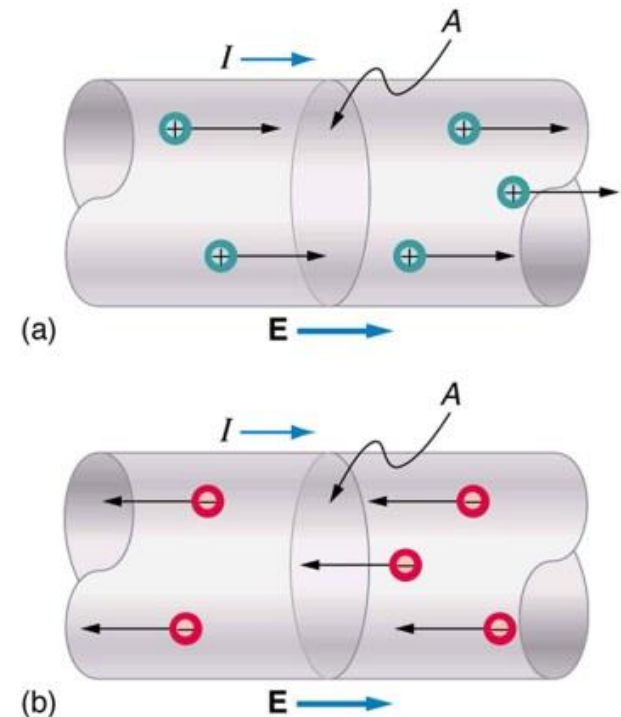
# 13. Vznik elektrického proudu

## Elektrický proud jako děj

- el. proud je **uspořádaný pohyb volných částic s elektrickým nábojem**
- směr proudu je dán **dohodou jako směr pohybu kladně nabitých částic**  $\Rightarrow$  pohyb ve směru intenzity od + k –
- pohyb elektronů v kovech je od – k + (proti směru intenzity)

**a) směr elektrického proudu** daného  
dohodou od + k –

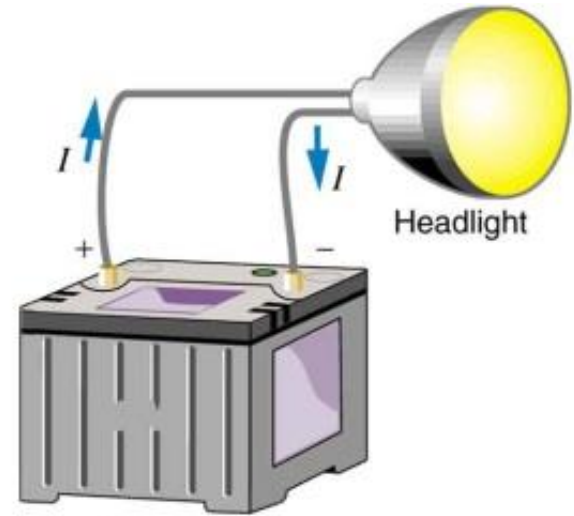
**b) směr elektronů** ve vodiči  
(proti směru intenzity el. pole  $E$ )



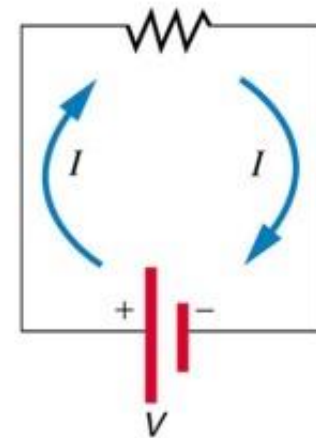
# 13. Vznik elektrického proudu

## Jednoduchý elektrický obvod

- zdroj, vodič, spotřebič (žárovka)
- pohyb elektronů je ve skutečnosti od záporného pólu baterie ke kladnému
- v okamžiku stanovení směru proudu dohadou nebyl elektron jako částice znám



(a) V battery



(b)

# 13. Vznik elektrického proudu

## Elektrický proud jako veličina

**elektrický proud –  $I$**

jednotka:  $[I] = 1 \text{ A}$  (ampér)

**1 ampér je proud, při kterém prochází kolmým průřezem vodiče náboj 1 C za 1 s**

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

➤ rovnoměrný průchod náboje  $Q$  průřezem vodiče za čas  $t$

**okamžitá hodnota elektrického proudu –  $i$**

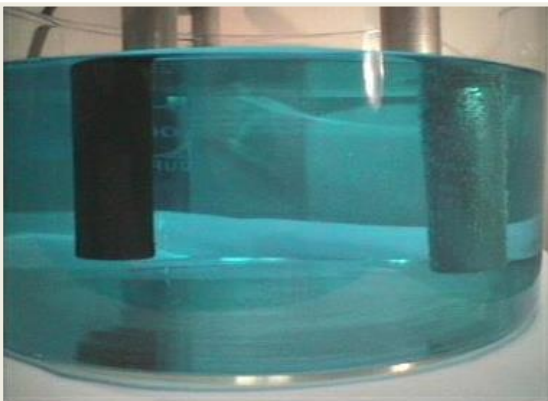
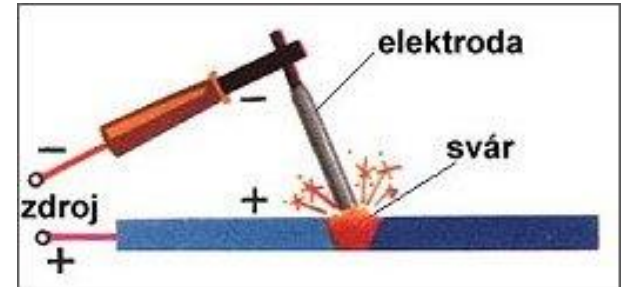
$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

➤ nerovnoměrný průchod náboje  $Q$  průřezem vodiče za čas  $t$ , obecný vztah

# 13. Vznik elektrického proudu

## Účinky elektrického proudu:

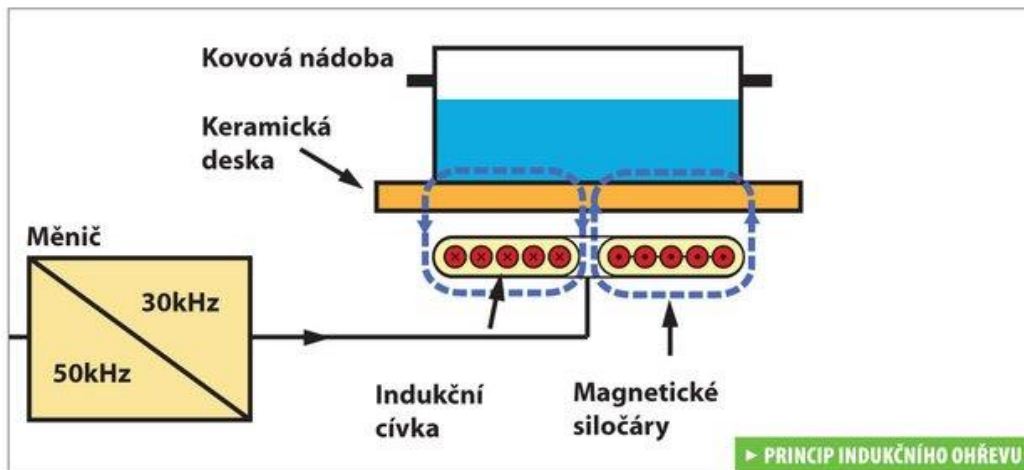
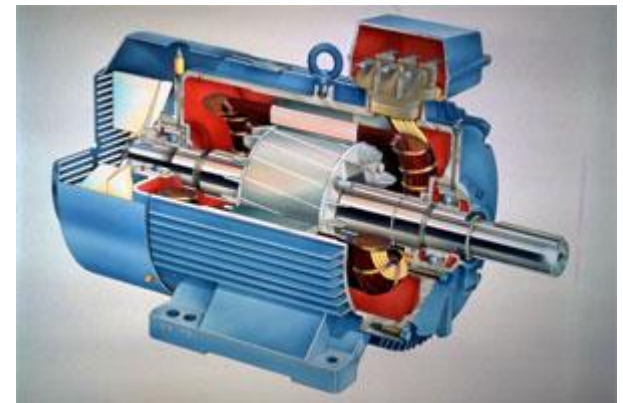
- tepelné – vařič, elektrické podlahové topení, sváření elektrickým obloukem
- chemické – elektrolýza (změna složení kapalin)
- magnetické – elektromagnet



# 13. Vznik elektrického proudu

## Účinky elektrického proudu:

- světelné – žárovka, dioda LED, elektrický oblouk (oblouková lampa)
- elektrodynamické – elektromotory, dynamo (kolo)
- indukční – indukční vařiče, elektroměry, LED svítidla bez baterie

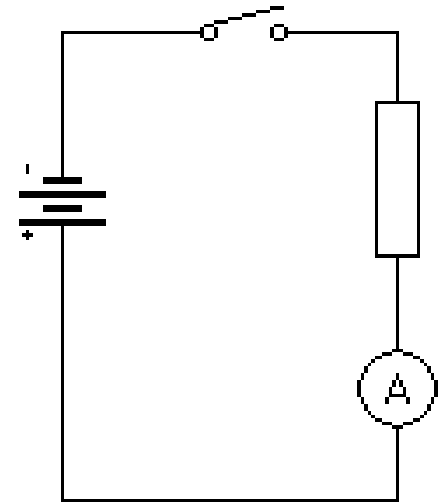


# 13. Vznik elektrického proudu

## Měření el. proudu

1) ampérmetr – zapojuje se **SÉRIOVĚ** k měřenému spotřebiči; mechanický nebo digitální;

2) multimetr – digitální; rozsah se už většinou nastavuje automaticky



# 14. Zdroje elektrického proudu

## svorkové napětí $U$

- napětí na svorkách zdroje dané rozdílem potenciálů
- potřebné k udržení stálého el. proudu
- značíme šipkou ve směru od + pólu zdroje k – pólu zdroje



## vnitřní a vnější obvod

- vnitřní – uvnitř zdroje se částice pohybují PROTI elektrostatickým silám  $\Rightarrow$  existují tam neelektrostatické síly (např. chemické povahy), které vykonáním práce při přenesení náboje  $Q$  definují tzv.

**elektromotorické napětí zdroje  $U_e$**  – maximální napětí, které je zdroj schopen vyvinout; směr od záporného pólu ke kladnému; vzniká jako **rozdíl**

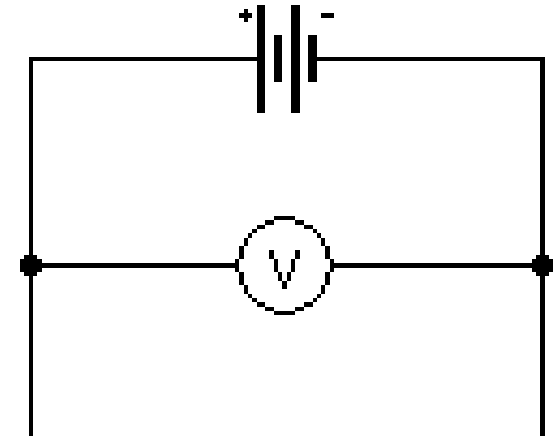
**elektrochemických potenciálů uvnitř zdroje**

- vnější – tvořen vodiči a **spotřebičem** (např. žárovka, rezistor)  $\Rightarrow$  spotřebovává elektrickou energii a mění ji na jiný typ energie (tepelnou, světelnou, apod.); elektrostatické síly konají práci  **$W = U \cdot Q$**

# 14. Zdroje elektrického proudu

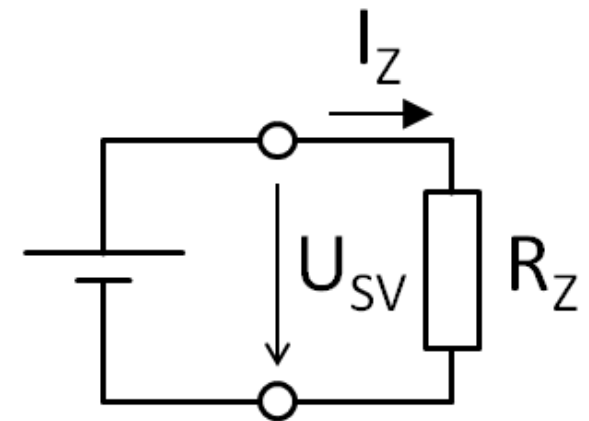
## nezatížený zdroj

- na vnější svorky zdroje není připojen žádný spotřebič; bez vnějšího obvodu;
- svorkové napětí  $U$  je rovno elektromotorickému, tj.  
 $U = U_e = U_0$
- na svorkách zdroje **měříme voltmetrem** tzv. **napětí naprázdno**  $U_0$



## zatížený zdroj

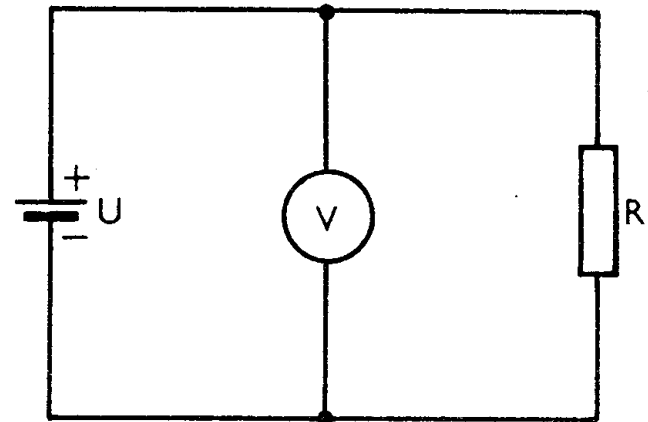
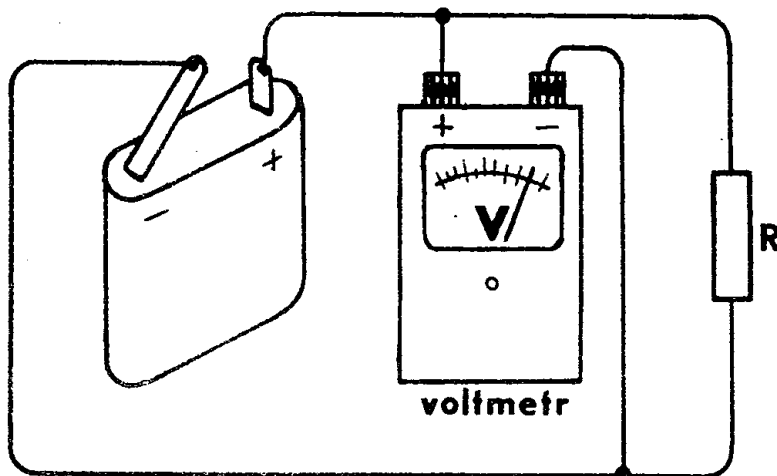
- na vnější svorky zdroje připojen spotřebič (na obr. realizovaný rezistorem  $R_Z$ )
- vnějším obvodem prochází el. proud  $I_Z$
- svorkové napětí  $U$  (na obr.  $U_{SV}$ ) je vždy menší než elektromotorické, tj.  $U < U_e$
- $U = U_e - U_i$ ;  $U_i$  – je úbytek napětí vznikající uvnitř zdroje průchodem proudu (viz kap. 19)



# 14. Zdroje elektrického proudu

## Měření el. napětí

- 1) voltmetr – zapojuje se **PARALELNĚ** k měřenému spotřebiči; mechanický nebo digitální;
- 2) multimetr – digitální; rozsah se už většinou nastavuje automaticky

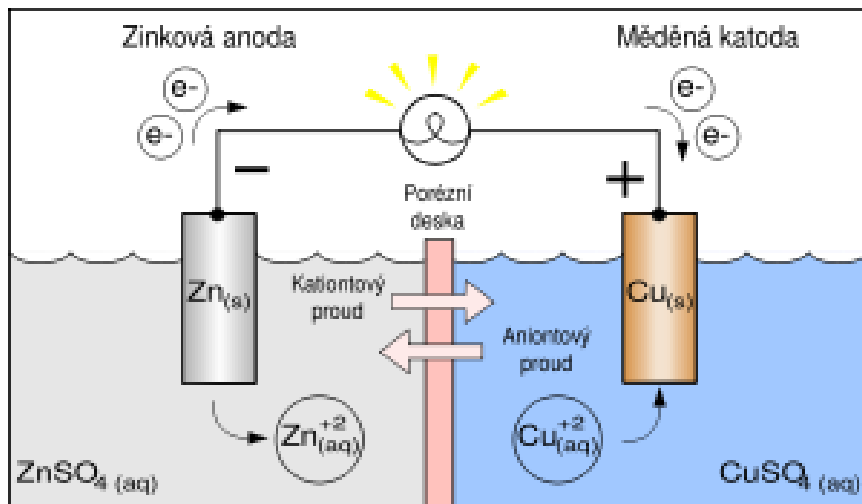


# 14. Zdroje elektrického proudu

## Zdroje stejnosměrného napětí (značíme = $U$ )

a) **galvanický člunek** – napětí člunku je dáno rozdílem elektrochemických potenciálů kovů (resp. materiálů), které člunek vytváří  $\Rightarrow$  elektrochemická řada kovů  $\Rightarrow$  např. Cu-Zn cca 0,92 V (viz foto na začátku článku)

**Neelektrostatické síly vznikají chemickou reakcí kovových elektrod s elektrolytem.**



# 14. Zdroje elektrického proudu

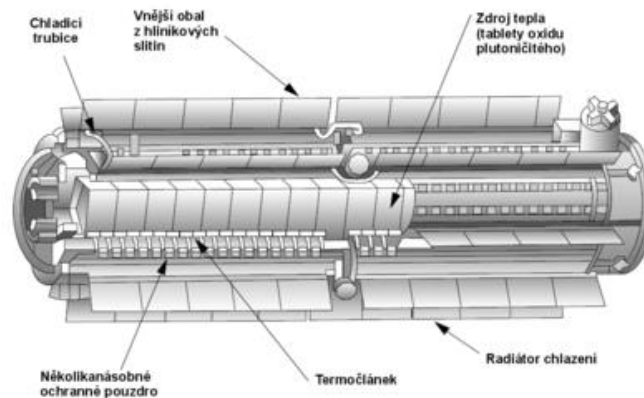
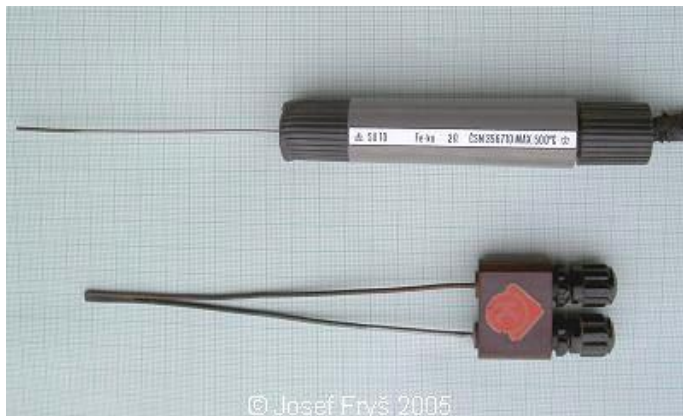
**b) termoelektrický článek** – každý kov má tzv. termoelektrický potenciál; zahříváním dvou spojených kovů (bimetalového pásku) vzniká rozdíl potenciálů, tj. napětí

⇒ termoelektrická řada kovů

⇒ např. měď-konstantan: 4,25 mV

⇒ opačný jev znám jako **Peltiérův jev** (průchodem proudu dvěma různými kovy se jeden ochlazuje a druhý ohřívá

⇒ využití termočlánků, **Peltiérová článku**: teplotní čidlo pro digitální teploměry, radioizotopový termoelektrický generátor (zdroj napětí) kosmických sond daleko od Slunce (nelze využít fotovoltaiku); teoreticky neomezená životnost; okamžitý efekt; až  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; chlazení PC (ne příliš efektivní)

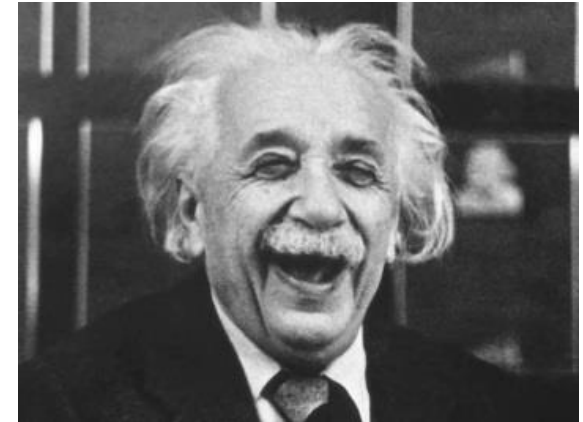


# 14. Zdroje elektrického proudu

## c) fotovoltaický článek

využívá tzv. fotoelektrického jevu

⇒ **Albert Einstein (1879 – 1955)** – objev 1905, NC 1921; energie záření (světla) dopadajícího na polovodičový PN přechod nebo tenkou vrstvu kovu vyvolá uvolnění elektronů ⇒ el. proud  
⇒ využití: fotodiody, fotovoltaika, kalkulačky, hodinky, družice

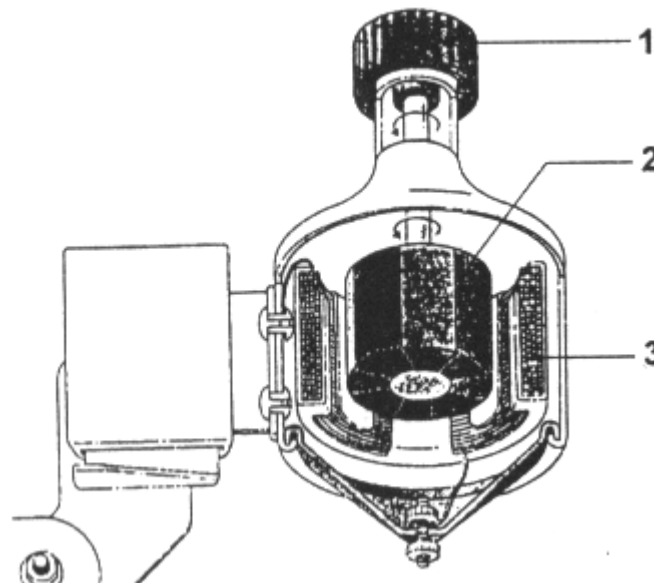
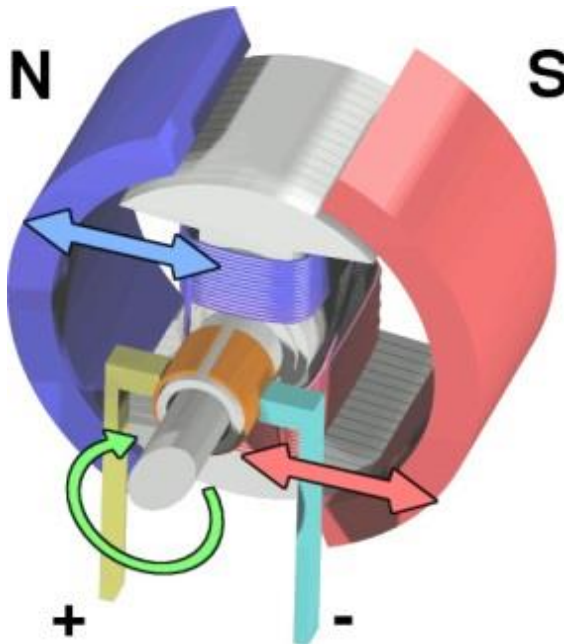


# 14. Zdroje elektrického proudu

## d) dynamo

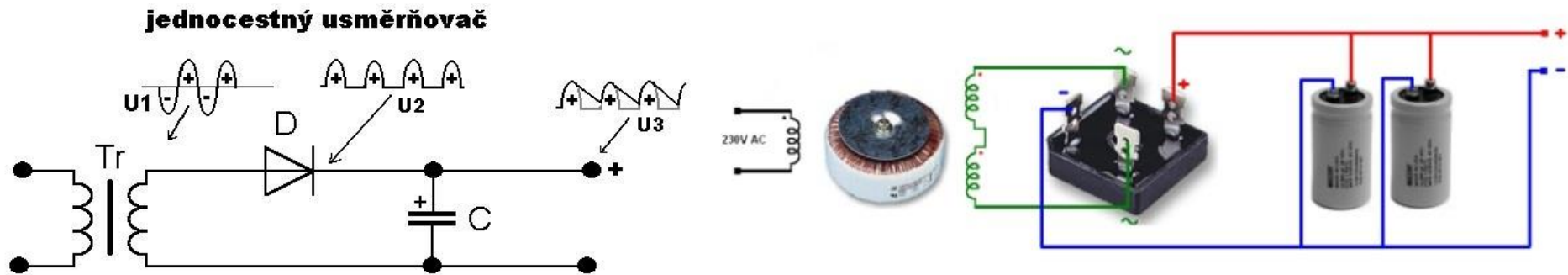
je točivý elektrický stroj, přeměňující mechanickou energii z rotoru hnacího stroje na elektrickou energii ve formě **stejnosměrného elektrického proudu**

**Neelektrostatické síly vznikají pohybem vodiče v magnetickém poli.**



# 14. Zdroje elektrického proudu

**e) usměrňovače** – usměrněním střídavého proudu za použití polovodičové diody



**f) mechanické zdroje**

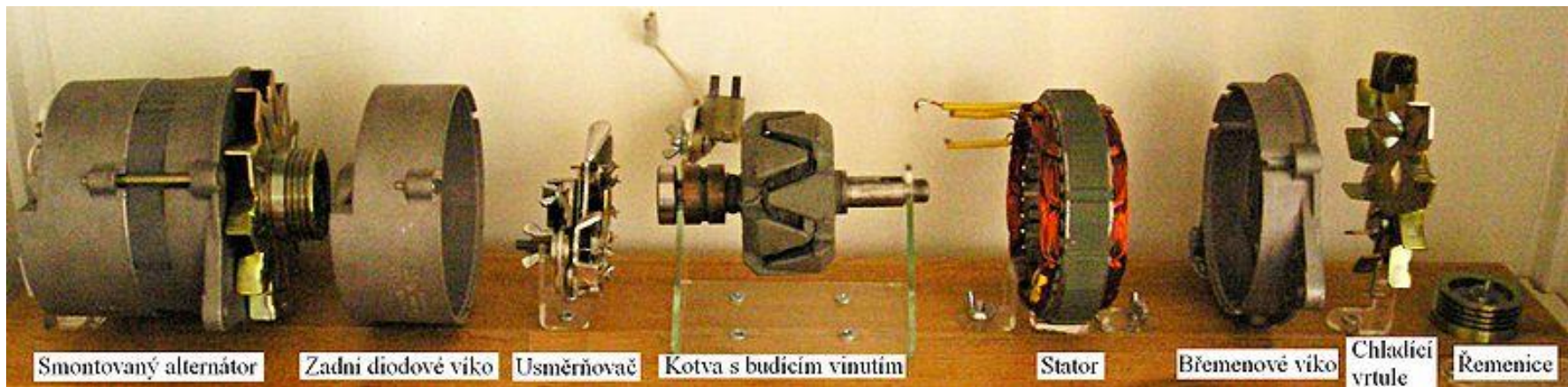
- ⇒ náboje se tvoří třením dvou dielektrik (pás - cívký, kotouče)
- ⇒ dnes se používají pouze k demonstračním fyzikálním experimentům



# 14. Zdroje elektrického proudu

## Zdroje střídavého napětí (značíme $\sim U$ )

- a) alternátor** – je točivý elektrický stroj pracující jako elektrický generátor; přeměňuje kinetickou energii (pohybovou energii) rotačního pohybu na energii elektrickou ve formě střídavého proudu
- ⇒ jednofázový nebo vícefázový
  - ⇒ princip elektromagnetické indukce ⇒ viz kapitola XY
  - ⇒ využití: výroba elektrické energie v elektrárnách; automobily; součást různých strojů

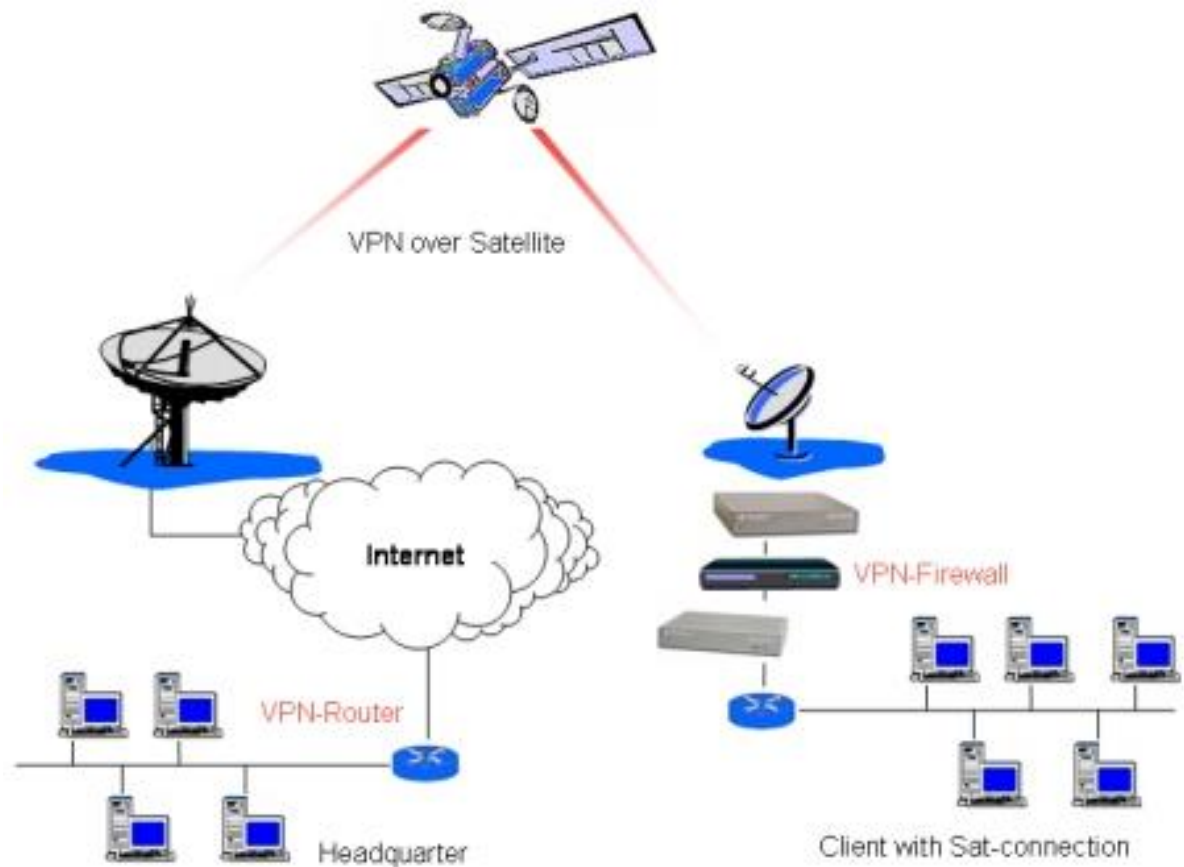


# 14. Zdroje elektrického proudu

**b) oscilátory** – elektronické zdroje;

⇒ generátory sinusového signálu různých frekvencí

⇒ TV, rádio, satelity, mobily, PC, Wi-fi, aj.



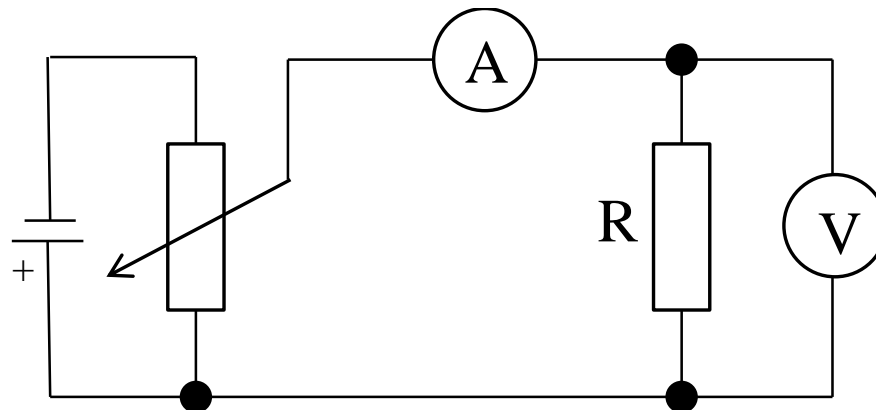
# 15. Elektrický odpor. Ohmův zákon pro část obvodu.



Ke zdroji napětí připojíme rezistor. Pomocí multimetrů zapojených jako voltmetr a ampérmetr měříme proud procházející rezistorem a napětí na rezistoru. Naměřené hodnoty zapíšeme do tabulky:

$U$ (V)									
$I$ (A)									
$\frac{U}{I}$									

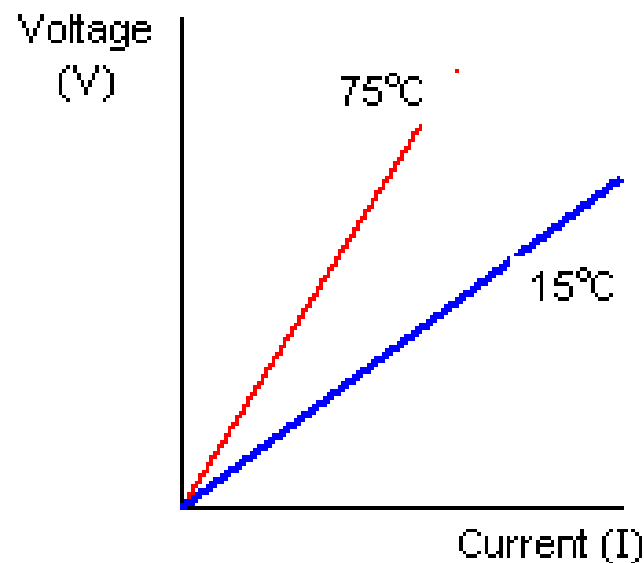
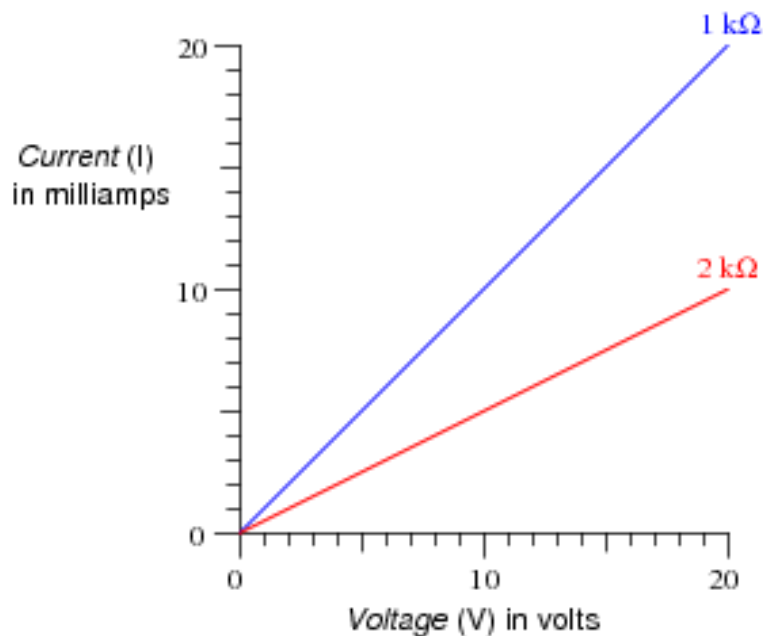
Schéma zapojení:



# 15. Elektrický odpor. Ohmův zákon pro část obvodu.

**Voltampérová charakteristika vodiče** – graf závislosti proudu (osa  $y$ ) na napětí (osa  $x$ )

- mezi proudem  $I$  a napětím  $U$  je přímá úměra
- stejný kov má pro různé teploty různé přímky
- různé kovy mají různé charakteristiky (např. ocel a konstantan)
- lineární závislost mezi napětím a proudem byla po svém objeviteli nazvaná Ohmův zákon



# 15. Elektrický odpor. Ohmův zákon pro část obvodu.

## Ohmův zákon pro část obvodu

$$I = G \cdot U$$

Proud procházející vodičem je přímo úměrný napětí mezi konci vodiče.

Konstanta úměrnosti  $G$  představuje tzv. elektrickou vodivost.

### elektrická vodivost – $G$

jednotka:  $[G] = A \cdot V^{-1} = S$  (siemens)

➤ konstanta úměrnosti pro daný materiál vodiče

### elektrický odpor (rezistance) – $R$

jednotka:  $[R] = A^{-1} \cdot V = \Omega$  (ohm)

$$R = \frac{1}{G}$$

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

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

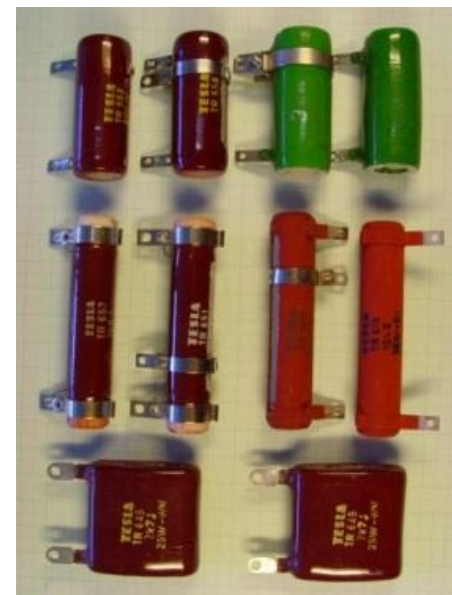
# 15. Elektrický odpor. Ohmův zákon pro část obvodu.

## odpor

- vlastnost vodiče

## rezistor

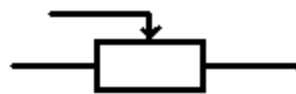
- elektronická součástka používaná v elektronických obvodech k nastavení nebo omezení proudu
- využití: elektronika, ochrana proti zkratu, topná tělesa
- slangově se nazývá též odpor
- značení:



# 15. Elektrický odpor. Ohmův zákon pro část obvodu.

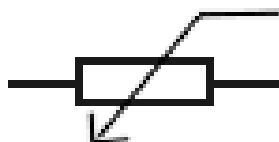
## reostat

- rezistor s proměnným odporem
- využití: dříve – ovládání starých tramvají; dnes – laboratorní pomůcka



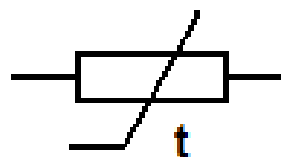
## potenciometr

- rezistor s proměnným odporem
- využití: např. ovládání hlasitosti v audio nebo video zařízeních



## termistor

- elektrický odpor je závislý na teplotě (negastor – s  $\uparrow$  teplotou  $R \downarrow$ , pozistor – s  $\uparrow$  teplotou  $R \uparrow$ )
- využití: teplotní čidla digitálních teploměrů v rozsahu od  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$



# 15. Elektrický odpor. Ohmův zákon pro část obvodu.

## Závislost elektrického odporu na vlastnostech vodiče

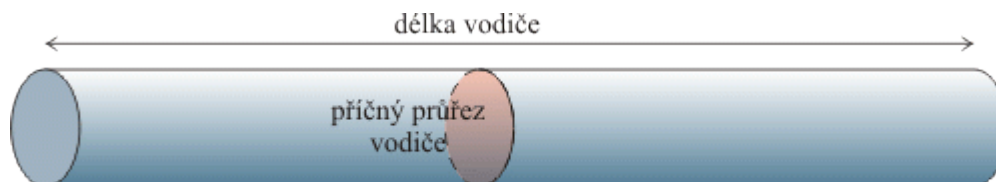


1. Změříme odpor stejného vodiče při různé délce a stejném průřezu.
2. Změříme odpor stejného vodiče při různém průřezu a stejné délce.
3. Změříme odpor dvou různých vodičů stejné délky a průřezu.

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

$l$  – délka vodiče (m)

$S$  – průřez vodiče (m<sup>2</sup>)



<http://fyzikalniulohy.cz>

**měrný elektrický odpor (rezistivita) –  $\rho$**

jednotka:  $[\rho] = \Omega \cdot \text{m}$  (ohmmetr)

➤ materiálová konstanta (MFChT)

➤ závisí na teplotě vodiče

## 15. Elektrický odpor. Ohmův zákon pro část obvodu.

$$\rho_{\text{Cu}} = 1,78 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho_{\text{Au}} = 2,04 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho_{\text{Al}} = 2,45 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

dobré vodiče

$$\rho_{\text{nikelín}} = 40 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho_{\text{konstantan}} = 49 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho_{\text{chrómníkl}} = 112 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

odporové materiály

# 16. Závislost odporu kovového vodiče na teplotě.

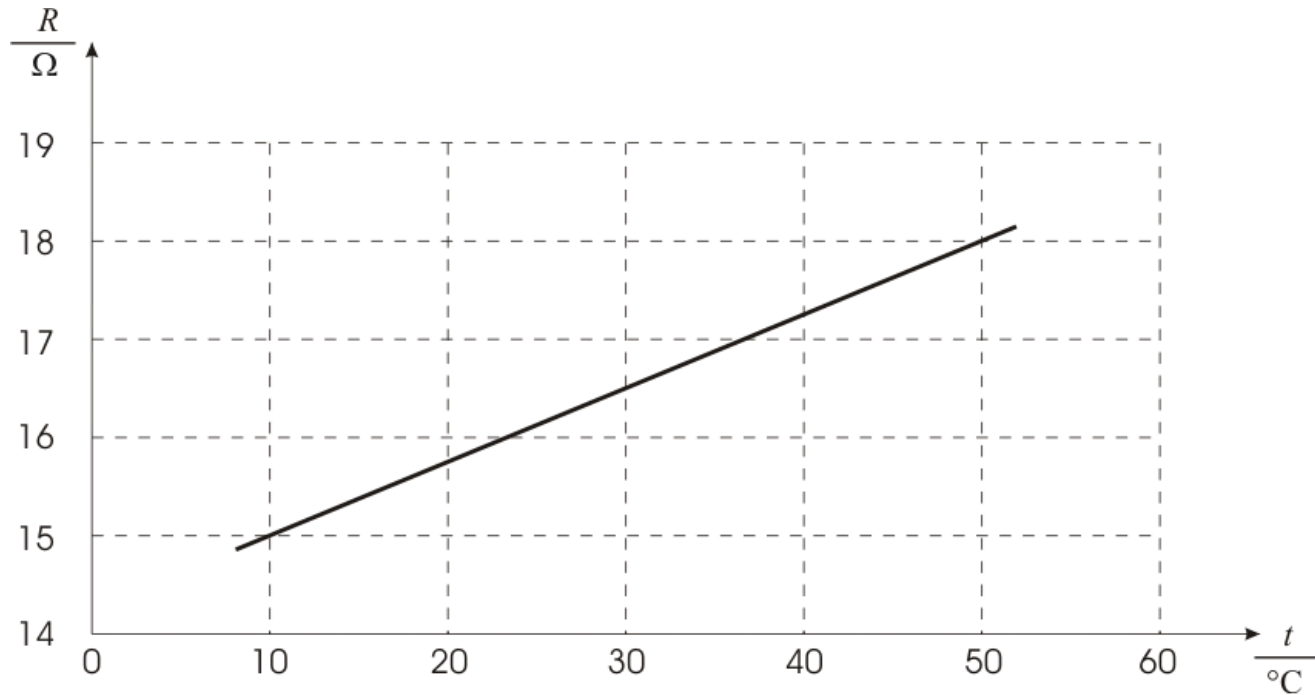


➤ změříme velikost odporu vlákna žárovky pro různé proudy

$U$ (V)									
$I$ (A)									
$R$ ( $\Omega$ )									

➤ hodnoty vyneseme do grafu – osa x: teplota, osa y: odpor

# 16. Závislost odporu kovového vodiče na teplotě.



<http://fyzikalniulohy.cz>

**Elektrický odpor kovů se lineárně zvětšuje s rostoucí teplotou.**

# 16. Závislost odporu kovového vodiče na teplotě.

- při zvýšení teploty vodiče  $\Rightarrow$  zvýší se kmity částic v krystalové mřížce  
 $\Rightarrow$  zvýší se počet srážek s  $e^-$
- $e^-$  se v kovu bez el. pole pohybují chaoticky (elektronový plyn) tzv. Fermiho rychlostí  $v_F \sim 10^6 \text{ ms}^{-1}$  přičemž vektorový součet všech chaotických rychlostí  $= 0$  ( $\sum_{e=1}^n v_F = 0$ )
- po vložení vodiče do elektrického pole se  $e^-$  začnou pohybovat tzv. driftovou rychlostí  $v_d \sim 10^{-4}$  až  $10^{-7} \text{ ms}^{-1}$  proti směru intenzity el. pole  $E$

# 16. Závislost odporu kovového vodiče na teplotě.

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$\alpha$  – teplotní součinitel el. odporu

$\Delta T$  – změna teploty:  $\Delta T = t - t_0$

$R_0$  – el. odpor při teplotě  $t_0$

Materiál	Měrný el. odpor $\rho [\mu\Omega \text{ m}]$	Teplotní součinitel odporu $\alpha [K^{-1}]$
Zlato	0,0230	0,003700
Měď	0,0178	0,004200
Stříbro	0,0163	0,004000
Hliník	0,0285	0,004000
Rtuť	0,9580	0,000900
Železo	0,1000	0,005500
Chrom	1,1000	0,000250
Konstantan	0,5000	0,000002
Nikelin	0,4000	0,000110
Manganin	0,4300	0,000015
Chromnikl	1,1000	0,000180
Wolfram	0,0530	0,004400

# 16. Závislost odporu kovového vodiče na teplotě.

Př. Jaký odpor má wolframové vlákno rozsvícené 60 W žárovky, jestliže jeho odpor při 20 °C má hodnotu 64 Ω a teplota rozžhaveného vlákna je cca 2500 °C?

$$R_0 = 64 \Omega$$

$$t_0 = 20 \text{ °C}$$

$$t = 2500 \text{ °C}$$

$$\alpha = 0,0044 \text{ K}^{-1}$$

$$R = ? \Omega$$

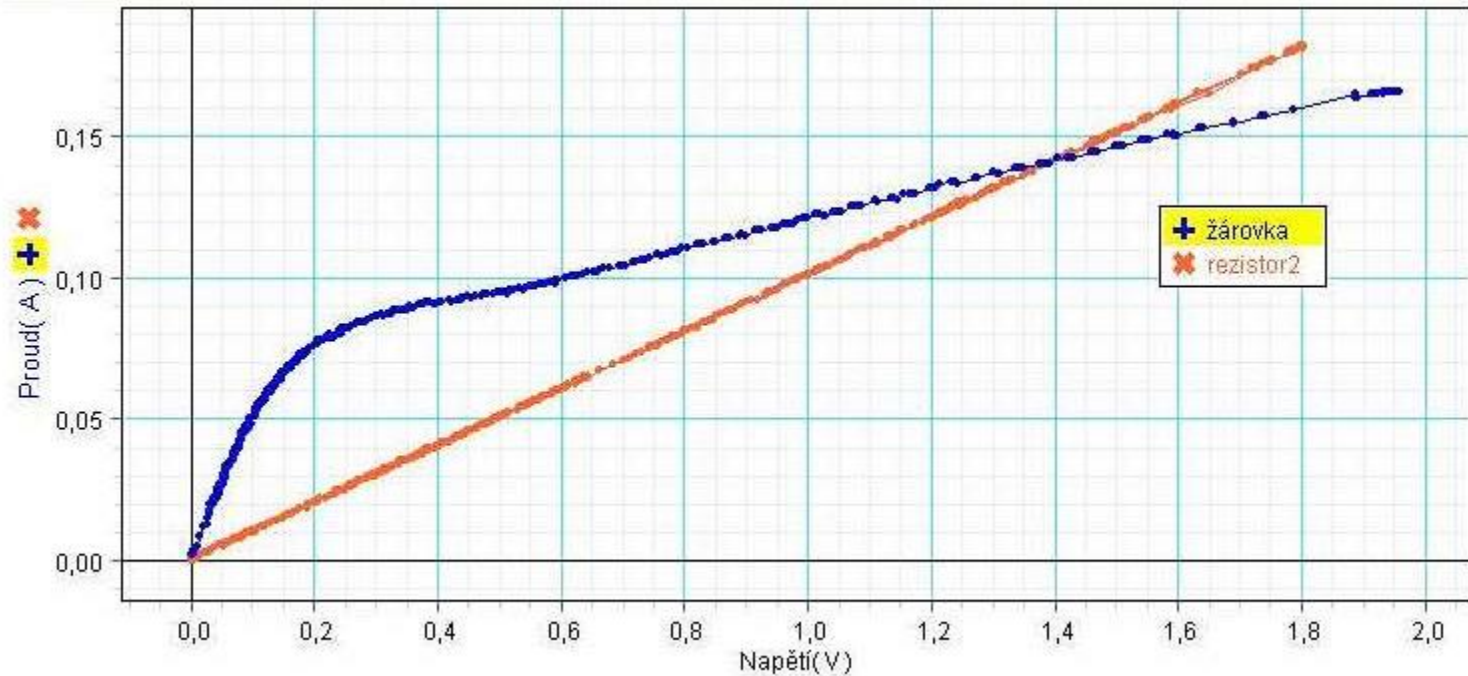
$$R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$R = 64 \cdot (1 + 0,0044 \cdot 2480) \Omega$$

$$\underline{\underline{R = 762 \Omega}}$$

# 16. Závislost odporu kovového vodiče na teplotě.

## Voltampérová charakteristika žárovky a rezistoru



- díky měnícímu se odporu vlákna žárovky vlivem rostoucí teploty je VA charakteristika žárovky nelineární
- rezistor má stálý odpor a VA charakteristika je přímka

# 16. Závislost odporu kovového vodiče na teplotě.

## Supravodivost

- při teplotě  $T \rightarrow 0 \text{ K}$  se elektrický odpor výrazně snižuje  $R \rightarrow 0 \Omega$
- při teplotách  $T < 4 \text{ K}$  je hodnota el. odporu neměřitelná
- $e^-$  se pohybují ve dvojicích (Cooperovy páry)
- materiál neklade odpor průchodu el. proudu
- materiál vypuzuje ze svého objemu magnetické siločáry (ideální diamagnetikum) a vytváří kolem sebe silné magnet. pole
- v supravodivém prstenci může teoreticky proud protékat po prvotním vybuzení až několik let
- supravodivost objevil v roce 1911 holandský fyzik H. Kamerlingh-Onnes
- **supravodiče: rtuť Hg, olovo Pb, cín Sn, niob Nb**
- **nesupravodivé kovy: zlato Au, stříbro Ag, měď Cu, železo Fe**  
(nebyla pozorována ani při  $40 \mu\text{K}$ )

využití: levitace, vlak MAGLEV, magnetická rezonance mozku, CERN – LHC, armáda

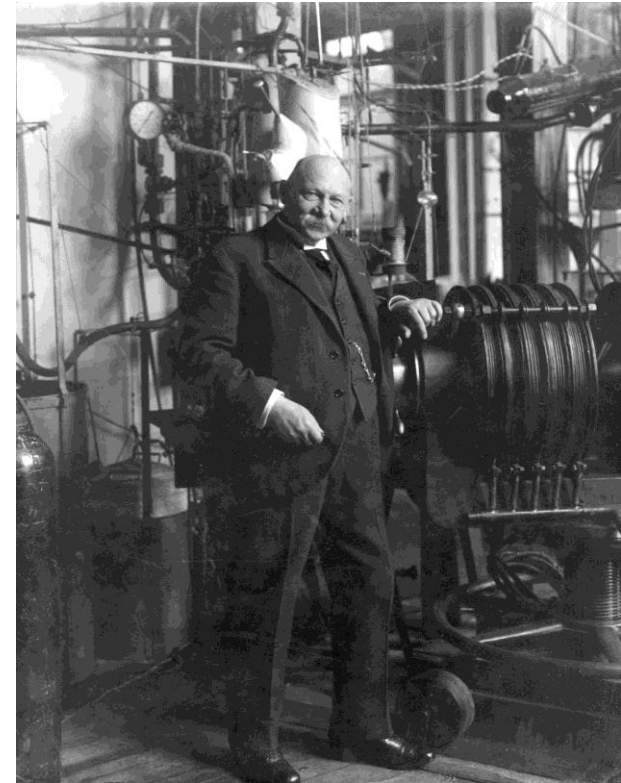
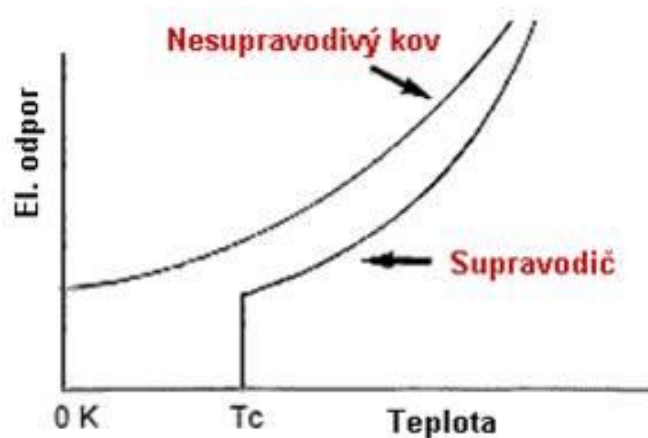
# 16. Závislost odporu kovového vodiče na teplotě.

## Supravodivost

Heike Kamerlingh Onnes (1853 – 1926)

– nizozemský fyzik; NC 1913 za výzkum v oblasti nízkých teplot

- 1908 jako první zkapalnil hélium  $\Rightarrow$  umožnil zchlazování látek na 4,2 K za normálního tlaku

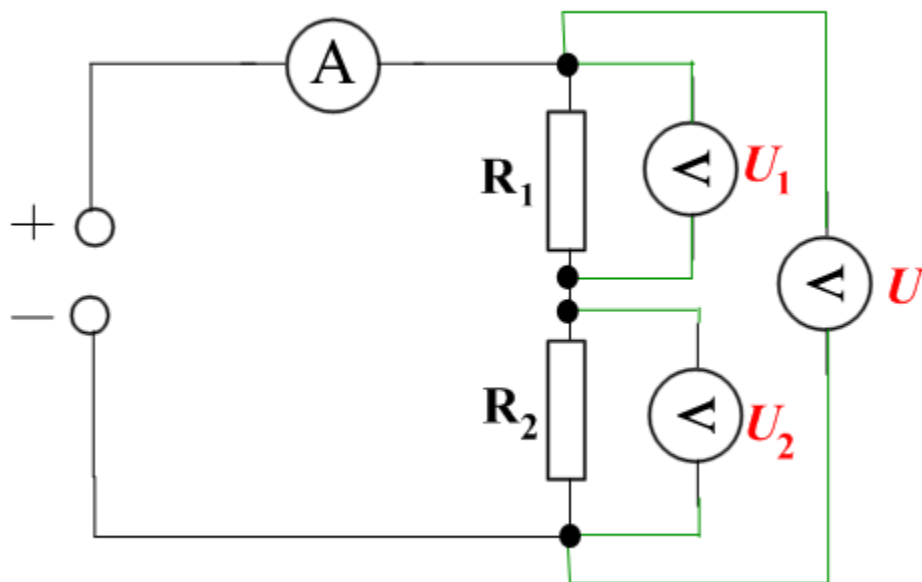


# 17. Spojování rezistorů. Regulace proudu a napětí.

## Sériové zapojení



- změříme velikost odporu 2 a více rezistorů zapojených do série



# 17. Spojování rezistorů. Regulace proudu a napětí.

## Závěr:

- součet napětí na jednotlivých rezistorech je roven celkovému napětí

$$U = U_1 + U_2$$

- nerozvětvený obvod: proud je všude stejný

$$I_1 = I_2 = I$$

- dosadíme za napětí z Ohmova zákona:

$$U_1 = R_1 \cdot I, U_2 = R_2 \cdot I, U = R \cdot I$$

$$R \cdot I = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I = I \cdot (R_1 + R_2)$$

$$R = R_1 + R_2$$

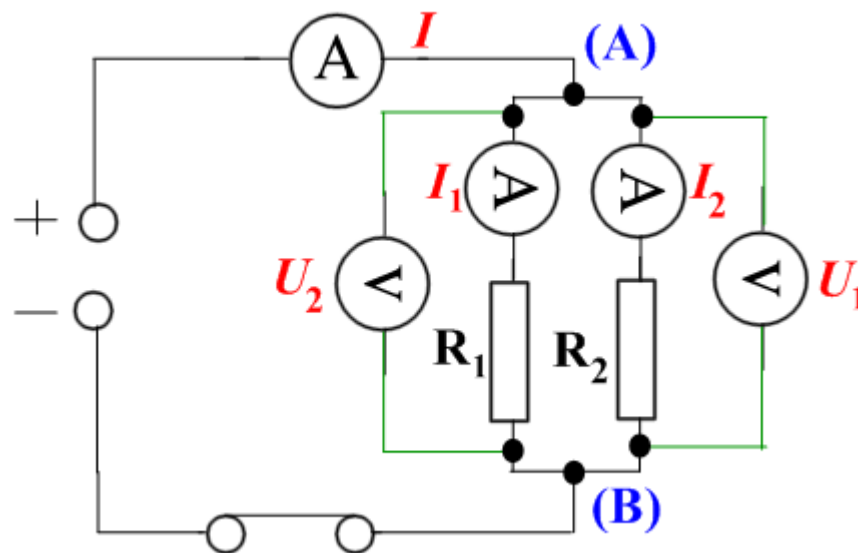
- analogicky pro větší počet rezistorů zapojených do série platí:  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$

# 17. Spojování rezistorů. Regulace proudu a napětí.

## Paralelní zapojení



- změříme velikost odporu 2 a více rezistorů zapojených paralelně



# 17. Spojování rezistorů. Regulace proudu a napětí.

- při zvýšení teploty vodiče  $\Rightarrow$  zvýší se kmity částic v krystalové mřížce  
 $\Rightarrow$  zvýší se počet srážek s  $e^-$
- $e^-$  se v kovu bez el. pole pohybují chaoticky (elektronový plyn) tzv. Fermiho rychlostí  $v_F \sim 10^6 \text{ ms}^{-1}$  přičemž vektorový součet všech chaotických rychlostí  $= 0$  ( $\sum_{e=1}^n v_F = 0$ )
- po vložení vodiče do elektrického pole se  $e^-$  začnou pohybovat tzv. driftovou rychlostí  $v_d \sim 10^{-4}$  až  $10^{-7} \text{ ms}^{-1}$  proti směru intenzity el. pole  $E$

# 17. Spojování rezistorů. Regulace proudu a napětí.

## Závěr:

- **napětí na jednotlivých rezistorech jsou stejná**

$$U = U_1 = U_2$$

- **rozvětvený obvod: celkový proud je dán součtem jednotlivých**

$$I_1 + I_2 = I$$

- dosadíme za proud z Ohmova zákona:

$$I = \frac{U}{R}, I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2}$$
$$\frac{U}{R} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

- analogicky pro větší počet rezistorů zapojených paralelně platí:  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$

# 17. Spojování rezistorů. Regulace proudu a napětí.

Př. 1 Dva rezistory  $R_1 = 10 \Omega$  a  $R_2$  o neznámé hodnotě jsou zapojené do série. Napětí zdroje je  $9 \text{ V}$ , proud protékající obvodem je  $I = 300 \text{ mA}$ .  
Určete hodnotu odporu rezistoru  $R_2$

Zápis zadání:

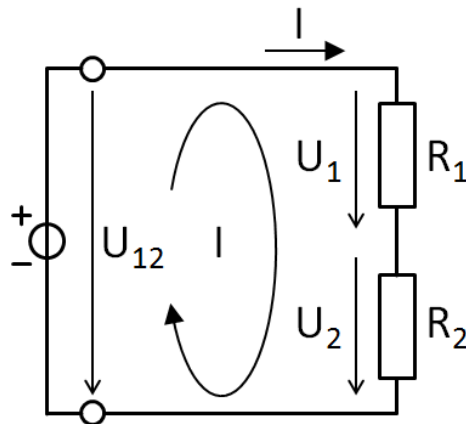
$$R_1 = 10 \Omega$$

$$U = 9 \text{ V}$$

$$I = 300 \text{ mA} = 0,3 \text{ A}$$

---

$$R_2 = ? (\Omega)$$



Řešení:

$$U_1 = R_1 \cdot I = 10 \cdot 0,3 \text{ V} = \underline{3 \text{ V}}$$

$$U = U_1 + U_2$$

$$U_2 = U - U_1 = 9 - 3 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

# 17. Spojování rezistorů. Regulace proudu a napětí.

Př. 2 Tři rezistory  $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 20 \Omega$  a  $R_3 = 50 \Omega$  jsou zapojené do série. Napětí zdroje je  $10 \text{ V}$ . Vypočítejte proud protékající obvodem a napětí na jednotlivých rezistorech.

Zápis zadání:

$$R_1 = 10 \Omega$$

$$R_2 = 20 \Omega$$

$$R_3 = 50 \Omega$$

$$U = 10 \text{ V}$$

$$I = ? \text{ (A)}$$

$$U_1 = ? \text{ (V)}$$

$$U_2 = ? \text{ (V)}$$

$$U_3 = ? \text{ (V)}$$

Řešení:

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R = 10 + 20 + 50 \Omega = \underline{\underline{80 \Omega}}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{80} \text{ A} = \underline{\underline{0,125 \text{ A}}}$$

$$U_1 = R_1 \cdot I = 10 \cdot 0,125 = \underline{\underline{1,25 \text{ V}}}$$

$$U_2 = R_2 \cdot I = 20 \cdot 0,125 = \underline{\underline{2,5 \text{ V}}}$$

$$U_3 = R_3 \cdot I = 50 \cdot 0,125 = \underline{\underline{6,25 \text{ V}}}$$

# 17. Spojování rezistorů. Regulace proudu a napětí.

Př. 3 Dva rezistory  $R_1 = 30 \Omega$  a  $R_2$  o neznámé hodnotě jsou zapojené paralelně. Napětí zdroje je  $42 \text{ V}$ , proud protékající obvodem je  $I = 2 \text{ A}$ . Určete hodnotu odporu rezistoru  $R_2$

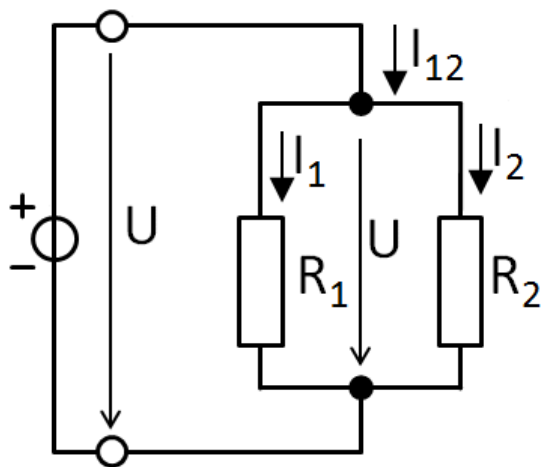
Zápis zadání:

$$R_1 = 30 \Omega$$

$$U = 42 \text{ V}$$

$$I = 2 \text{ A}$$

$$R_2 = ? (\Omega)$$



Řešení:

$$I = I_1 + I_2$$

$$U_1 = U_2 = U$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{42}{30} = 1,4 \text{ A}$$

$$R_2 = \frac{U}{I_2} = \frac{42}{0,6} \Omega = \underline{\underline{70 \Omega}}$$

$$I_2 = I - I_1 = 2 - 1,4 \text{ A} = 0,6 \text{ A}$$

# 17. Spojování rezistorů. Regulace proudu a napětí.

Př. 4 Dva rezistory  $R_1 = 10 \Omega$  a  $R_2 = 15 \Omega$  jsou zapojené paralelně. Napětí zdroje je 3 V. Vypočítejte proud protékající obvodem a proudy jednotlivými rezistory. Výsledek uveďte v miliampérech.

Zápis zadání:

$$R_1 = 10 \Omega$$

$$R_2 = 15 \Omega$$

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

$$I = ? \text{ (A)}$$

$$I_1 = ? \text{ (A)}$$

$$I_2 = ? \text{ (V)}$$

Řešení:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R = \frac{10 \cdot 15}{25} = \underline{6 \Omega}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{3}{6} \text{ A} = \underline{\underline{0,5 \text{ A} = 500 \text{ mA}}}$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{3}{10} \text{ A} = \underline{\underline{0,3 \text{ A} = 300 \text{ mA}}}$$

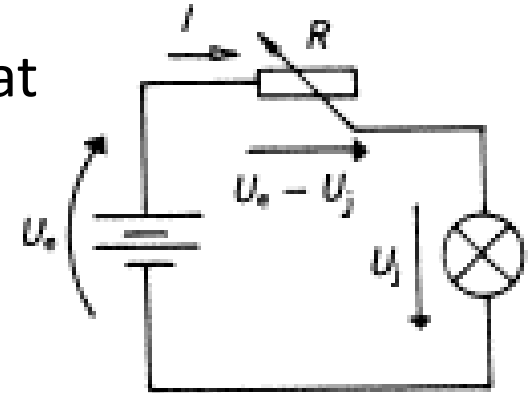
$$R_1 < R_2 \rightarrow I_1 > I_2$$

$$I_2 = I - I_1 = 500 - 300 \text{ mA} = \underline{\underline{200 \text{ mA}}}$$

# 17. Spojování rezistorů. Regulace proudu a napětí.

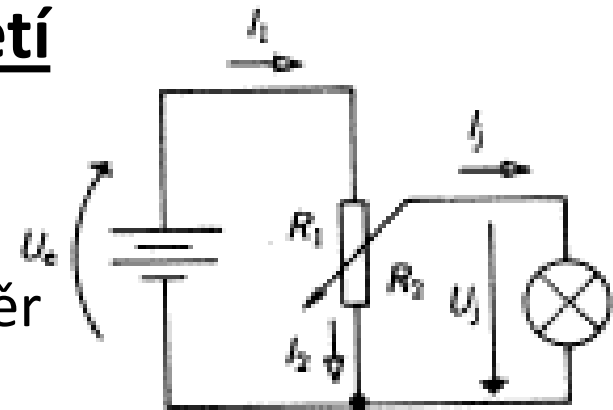
## Regulace proudu $I$ v obvodu

- **DO SÉRIE** se spotřebičem zapojíme např. reostat nebo potenciometr
- změnou odporu reostatu měníme proud  $I$  procházející obvodem
- $I_{\min} \Rightarrow R_{\max}$



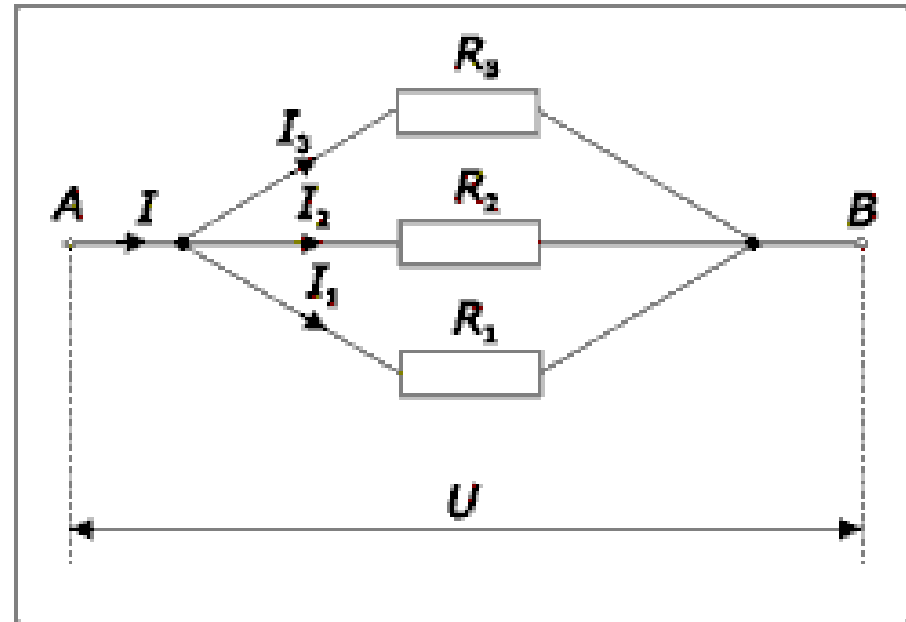
## Regulace napětí $U$ v obvodu – dělič napětí

- **PARALELNĚ** se spotřebičem zapojíme reostat nebo potenciometr
- změnou polohy potenciometru měníme poměr mezi  $R_1$  a  $R_2$  a tím i  $U_1$  a  $U_2$



# 18. Kirchhoffovy zákony

- několik jednoduchých elektrických obvodů spojených vzájemně mezi sebou vytváří tzv. **elektrické sítě**
- **uzel** – místo vodivého spojení minimálně 3 vodičů  $\Rightarrow$  v el. schématech vyznačen plným černým kolečkem



## Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887)

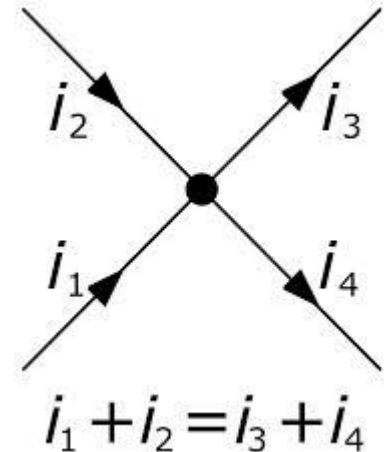
- německý fyzik;
- $\Rightarrow$  1847 formuloval zákony rozvětvení el. proudu;
- $\Rightarrow$  rozvinul (společně s R. Bunsenem) metodu spektrální analýzy  $\Rightarrow$  metoda se používá pro určování složení hvězd;
- $\Rightarrow$  spoluobjevil cesium a rubidium



# 18. Kirchhoffovy zákony

## 1. Kirchhoffův zákon (1. KIZ)

- součet proudů v uzlu je roven nule  $\Leftrightarrow$  velikost proudů do uzlu vstupujících = velikosti proudů z uzlu vystupujících
- proud **VSTUPUJÍCÍ DO UZLU** značíme +  
proud **VYSTUPUJÍCÍ Z UZLU** značíme –

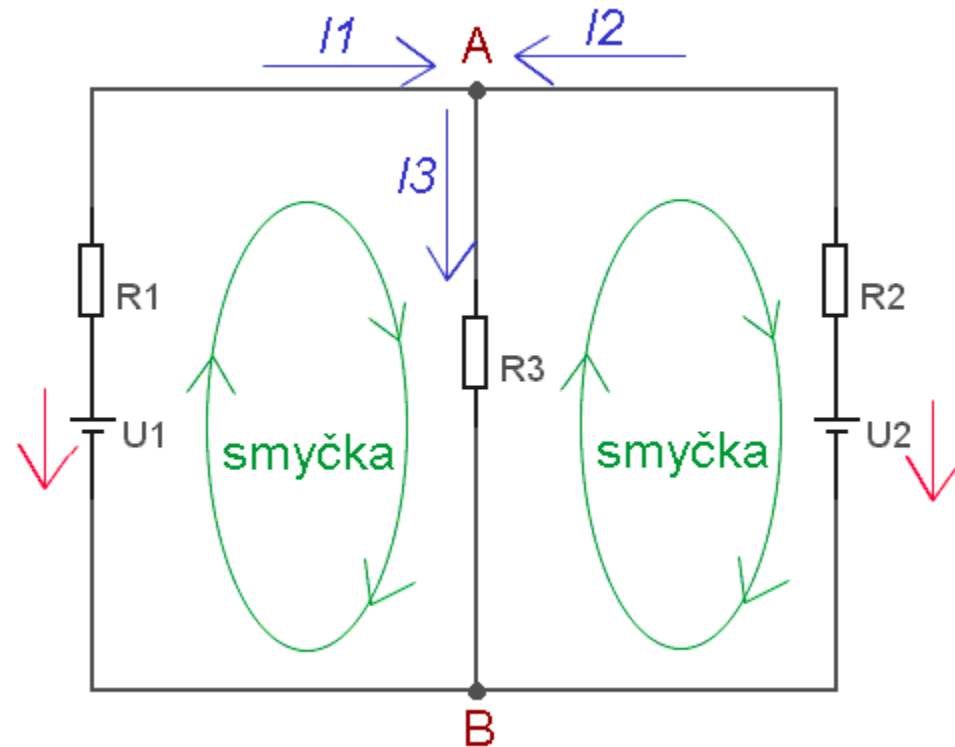


$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

# 18. Kirchhoffovy zákony

## 2. Kirchhoffův zákon (2. KIZ)

- součet úbytků napětí na jednotlivých rezistorech je v uzavřené smyčce stejný jako součet elektromotorických napětí všech zdrojů
- rozvětvený el. obvod rozdělíme na jednotlivé **smyčky** (viz obr.) a pro každý uzel a smyčku rozepíšeme dílčí rovnice (viz př.)
- směr oběhu smyčky volíme libovolně ⇒ **napětí jdoucí proti směru oběhu má zápornou hodnotu** (na obr. je to  $U_1$ )

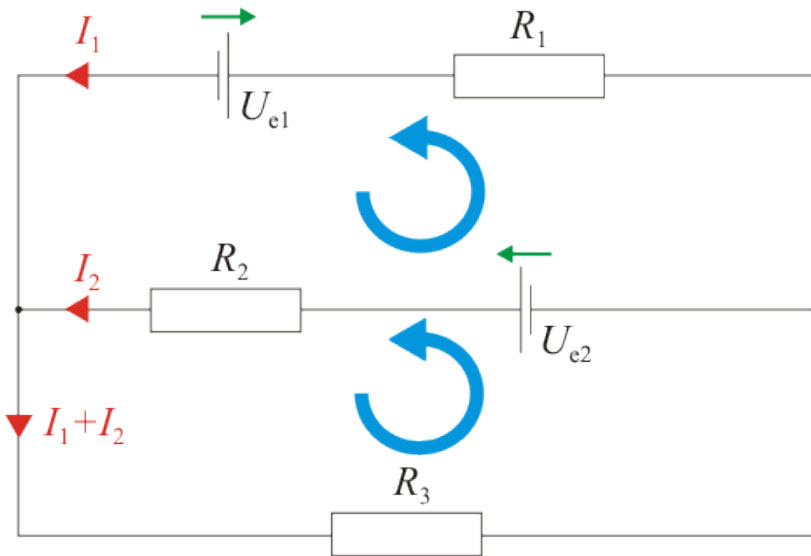


$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{j=1}^m U_{e_j}$$

# 18. Kirchhoffovy zákony

Př. 1 Určete velikosti proudů  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  a napětí  $U_{AB}$  mezi body AB (uzly) v následujícím obvodu, je-li

$$U_{e1} = 6 \text{ V}, U_{e2} = 4 \text{ V}, R_1 = 2 \Omega, R_2 = 3 \Omega, R_3 = 10 \Omega$$



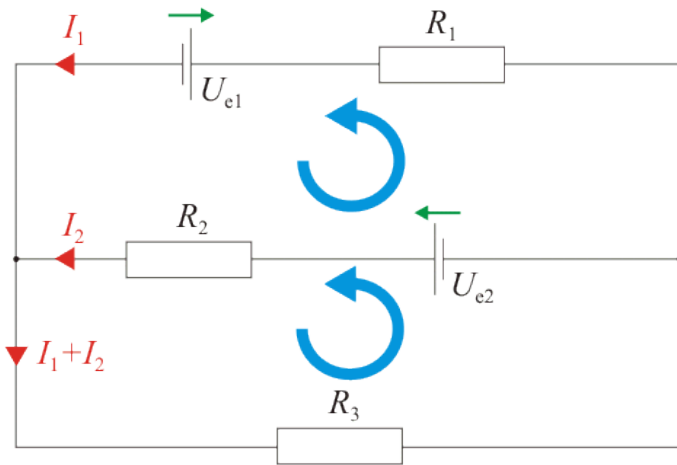
<http://fyzikalniulohy.cz>

- podle 1. KIZ sestavíme první rovnici pro proudy v jednotlivých uzlech (zde stačí např. uzel A vlevo):
  - $I_1 + I_2 = I_3$  resp.  $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ 
    - ⇒ směr proudu určíme podle dohody od + k –
    - ⇒ šipka proudu míří k k zápornému pólu baterie
- určíme smysl obíhání v jednotlivých větvích (modré kulaté šipky)
- určíme směr elektromotorických napětí v obvodu (zelené šipky u zdrojů napětí)

# 18. Kirchhoffovy zákony

Př. 1 Určete velikosti proudů  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  a napětí  $U_{AB}$  mezi body AB (uzly) v následujícím obvodu, je-li

$$U_{e1} = 6 \text{ V}, U_{e2} = 4 \text{ V}, R_1 = 2 \Omega, R_2 = 3 \Omega, R_3 = 10 \Omega$$



<http://fyzikalniulohy.cz>

➤ podle 2. KIZ sestavíme další dvě rovnice (pro každou smyčku 1 rovnice)  $\Rightarrow$  co jde **proti smyslu obíhání** má **znaménko -**

➤ horní smyčka:  $R_1 I_1 - R_2 I_2 = -U_{e1} - U_{e2}$ ,  
resp.  $-R_1 I_1 + R_2 I_2 = U_{e1} + U_{e2}$

dolní smyčka:  $R_2 I_2 + R_3 I_3 = U_{e2}$

# 18. Kirchhoffovy zákony

Př. 1 Určete velikosti proudů  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  a napětí  $U_{AB}$  mezi body AB (uzly) v následujícím obvodu, je-li

$$U_{e1} = 6 \text{ V}, U_{e2} = 4 \text{ V}, R_1 = 2 \Omega, R_2 = 3 \Omega, R_3 = 10 \Omega$$

➤ nakonec dosadíme za hodnoty odporů a elektromotorických napětí a získáme tři rovnice o třech neznámých:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$-2I_1 + 3I_2 = 6 + 4$$

$$3I_1 + 10I_3 = 4$$

Soustava má řešení:

$$I_1 \cong -1,49 \text{ A}, I_2 \cong 2,34 \text{ A}, I_3 \cong 0,85 \text{ A}$$

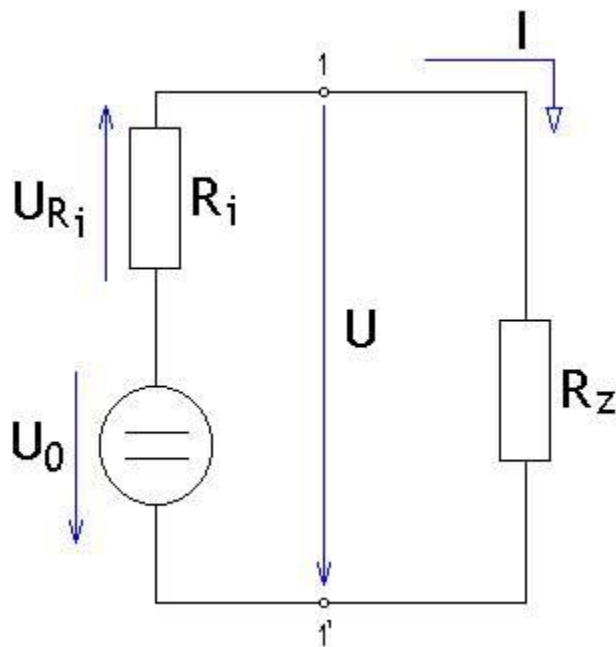
➤ záporné znaménko u proudu  $I_1$  znamená, že proud má opačný směr než námi původně určený ve schématu

napětí mezi uzly AB je stejné jako napětí na rezistoru  $R_3$

$$\Leftrightarrow U_{AB} = U_3 = R_3 I_3 = 10 \cdot 0,85 \text{ V} = 8,5 \text{ V}$$

# 19. Ohmův zákon pro celý obvod

**vnitřní odpor zdroje** – každý zdroj elektrické energie klade průchodu proudu určitý odpor  $R_i$



$U_0$  ... svorkové napětí naprázdno  
 $U$  ... svorkové napětí  
 $R_i$  ... vnitřní odpor zdroje  
 $I$  ... proud zátěží

# 19. Ohmův zákon pro celý obvod

a) nezatížený zdroj:  $I = 0 \text{ A}$

$$U = U_0 = U_e$$

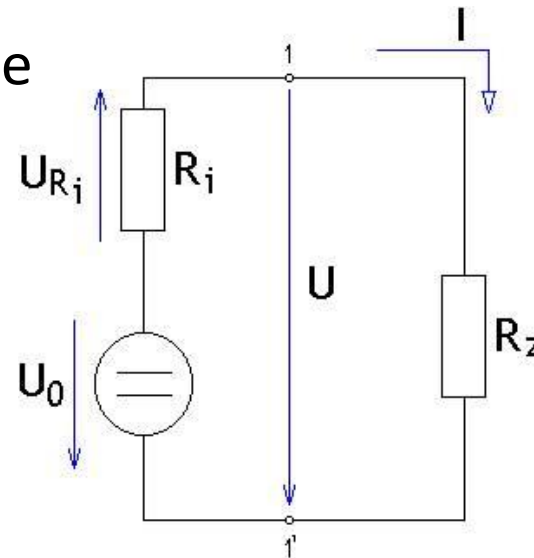
$U$  – napětí na svorkách zdroje (svorkové napětí)

$U_0$  – napětí naprázdno

$U_e$  – elektromotorické napětí zdroje

b) zatížený zdroj:  $I \neq 0 \text{ A}$

➤  $U_e = U + U_i$



$U_0$  ... svorkové napětí naprázdno  
 $U$  ... svorkové napětí  
 $R_i$  ... vnitřní odpor zdroje  
 $I$  ... proud zátěží

svorkové napětí –  $U$

$$U = U_e - U_i$$

$U_i$  – úbytek napětí na vnitřním odporu  $R_i$

# 19. Ohmův zákon pro celý obvod

➤ do předchozího vztahu dosadíme z Ohmova zákona pro část obvodu:

$$RI = U_e - R_i I$$

$$\text{resp. } RI + R_i I = U_e$$

$$\text{resp. } I(R + R_i) = U_e \text{ a vyjádříme proud } I$$

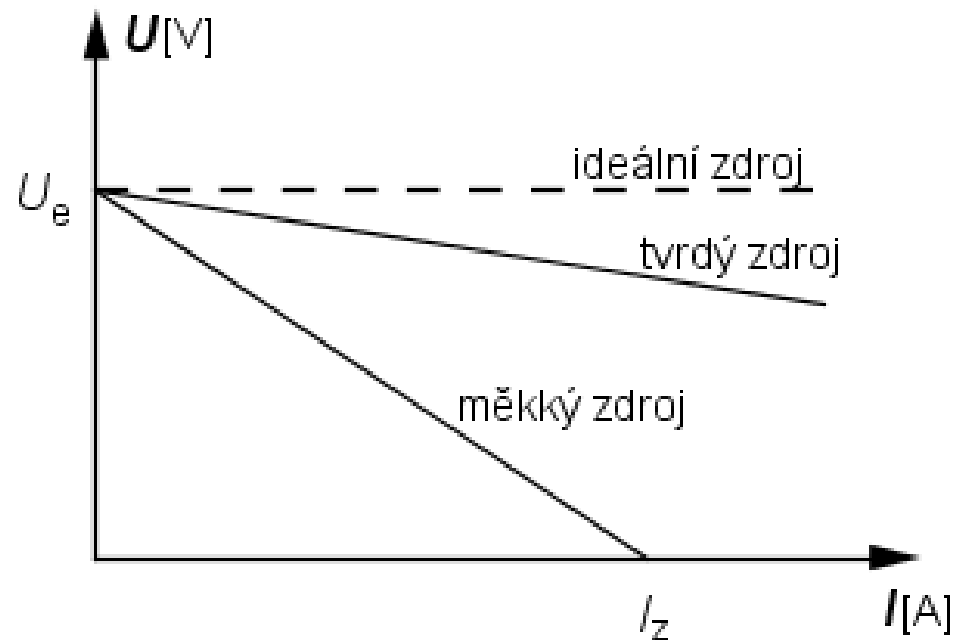
**elektrický proud dodávaný zdrojem**

$$I = \frac{U_e}{R + R_i}$$

# 19. Ohmův zákon pro celý obvod

## Zatěžovací charakteristika zdroje (VA charakteristika zdroje)

- **závislost velikosti svorkového napětí na proudu procházejícího obvodem**
- **tvrdý zdroj** (kvalitní)  $\Rightarrow$  dochází k nepatrnému poklesu napětí při průchodu velkých proudů  $\Rightarrow$  př. akumulátor
- **měkký zdroj** (nekvalitní)  $\Rightarrow$  rychlý pokles svorkového napětí při zatížení  $\Rightarrow$  př. téměř vybitý monočlánek  $\Rightarrow$  napětí baterie je třeba měřit nikoliv pouze voltmetrem (ten měří pouze napětí naprázdno), ale při zatížení např. žárovkou



# 19. Ohmův zákon pro celý obvod

## Zatěžovací charakteristika zdroje (VA charakteristika zdroje)

**zkratový proud –  $I_z$**

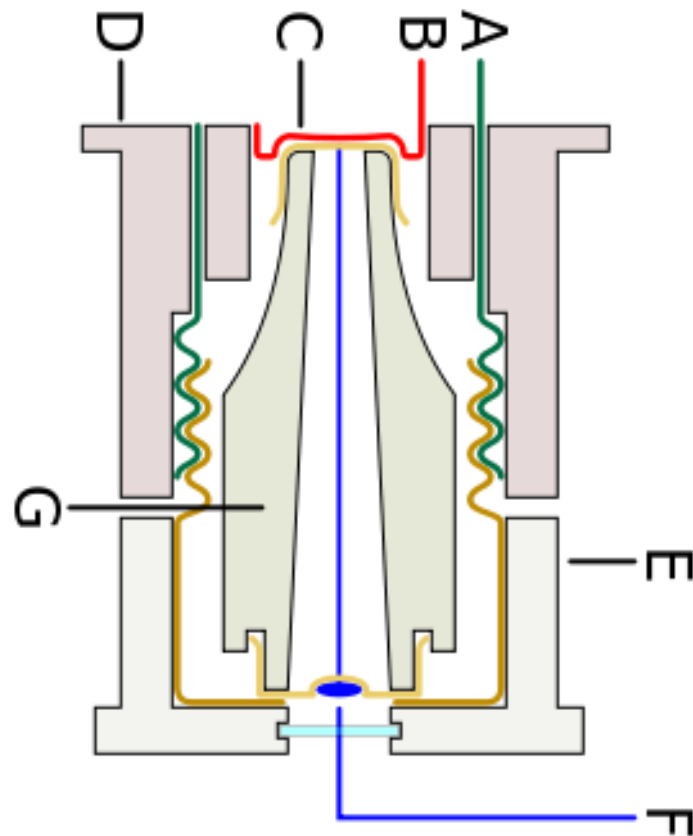
$$I_z = \frac{U_e}{R_i}$$

- při spojení nakrátko  
(natvrdo spojíme svorky zdroje, takže svorkové napětí  $U = 0 \text{ V}$ )
- může dosahovat až několik ampér (v závislosti na typu zapojení)

# 19. Ohmův zákon pro celý obvod

## Ochrana proti velkým proudům

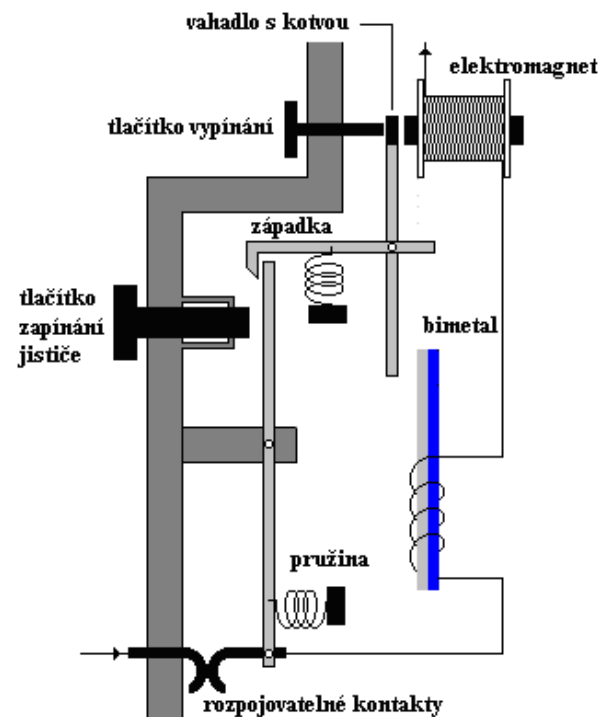
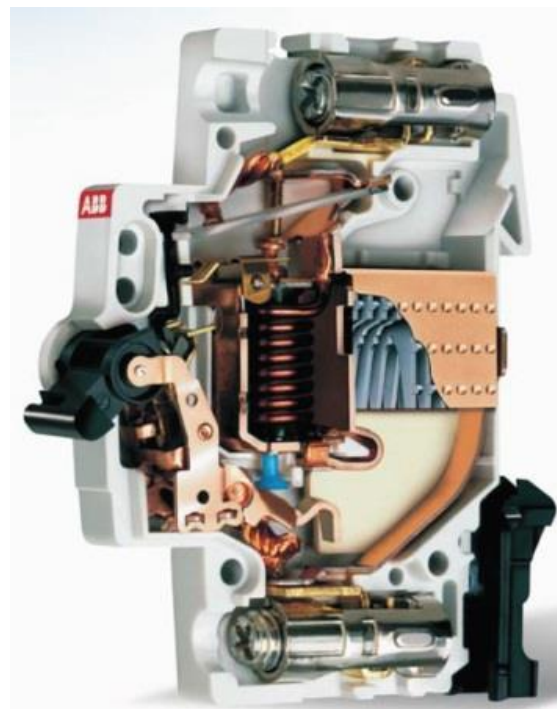
- pojistky ⇒ protékající proud roztaví vnitřní drátek; nebezpečí požáru z jiskřiště; nenahrazovat pojistku hřebíkem!!!



# 19. Ohmův zákon pro celý obvod

## Ochrana proti velkým proudům

- jističe
- velký vnitřní odpor u zdrojů vysokého napětí (VN) při experimentech v elektrostatiice ⇒ i při napětí řádově několika tisíc kV protékají bezpečné proudy



## 20. Elektrická práce a výkon v obvodech = $I$

- síly el. pole konají při přemístění náboje určitou práci
- $W_e = Q \cdot U$      $I = \frac{Q}{t}$      $R = \frac{U}{I}$
- vzájemnou kombinací předchozích vzorců získáme různá vyjádření pro elektrickou práci:

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

**Jouleovo teplo –  $Q_J$**

jednotka: [  $Q_J$  ] = 1 J (joule)

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

- při průchodu proudu vodičem dochází k jeho zahřívání  $\Rightarrow$  princip el. vaříče  $\Rightarrow$  vzniká teplo

**$R$**  – odpor vodiče

**$I$**  – proud procházející vodičem

**$t$**  – doba (čas) průchodu proudu vodičem

# 20. Elektrická práce a výkon v obvodech = $I$

- dochází k tzv. disipaci energie  $\Rightarrow$  nevratná přeměna el. energie na teplo
- v praxi: v případě střídavého proudu se jedná zejména o ztráty při přenosu el. energie  $\Rightarrow$  proto se napětí z generátoru transformuje na VVN (velmi vysoké napětí) řádově  $10^2$  kV (omezí se proud vodičem)

**James Prescott Joule (1818 – 1889)** – anglický fyzik;

- $\Rightarrow$  spolupracoval s W. Thompsnem na vývoji termodynamické teplotní stupnice;
- $\Rightarrow$  kvůli poruše páteře nechodil do školy; otec měl pivovar;
- $\Rightarrow$  1840 objevil zákon o přeměně el. energie na teplo
- $\Rightarrow$  1846 objevil magnetostrikci (změna délky železné tyče vlivem zmagnetování; dnes využito ve spojení s ultrasonickými zvukovými vlnami)
- $\Rightarrow$  jeho jménem pojmenována jednotka tepla
- $\Rightarrow$  zjistil, že teplo není tekutina (čemuž se věřilo), ale je forma energie
- $\Rightarrow$  formuloval zákon zachování energie, čímž byl položen základ termodynamiky
- $\Rightarrow$  nikdy se nestal profesorem, zůstal celý život pivovarníkem
- $\Rightarrow$  vynalezl elektrické svařování nebo výtlačovou pumpu



## 20. Elektrická práce a výkon v obvodech = $I$

**výkon el. spotřebiče –  $P$**

jednotka: [  $P$  ] = 1 W (watt)

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

$R$  – odpor vodiče

$I$  – proud procházející vodičem

$U$  – napětí na vodiči

**účinnost přeměny energie v el. obvodu –  $\eta$**

jednotka: [  $\eta$  ] = bez rozměru

$$\eta = \frac{R}{R + R_i}$$

- účinnost je tím větší, čím větší je hodnota odporu  $R$  oproti vnitřnímu odporu  $R_i$

# 20. Elektrická práce a výkon v obvodech = $I$

??? Za jakých podmínek je výkon maximální?

$$P = UI = (U_e - R_i I) \cdot I = U_e I - R_i I^2 = -R_i I^2 + U_e I$$

➤ z pohledu funkcí se jedná o kvadratickou funkci závislosti výkonu  $P$  na proudu  $I$

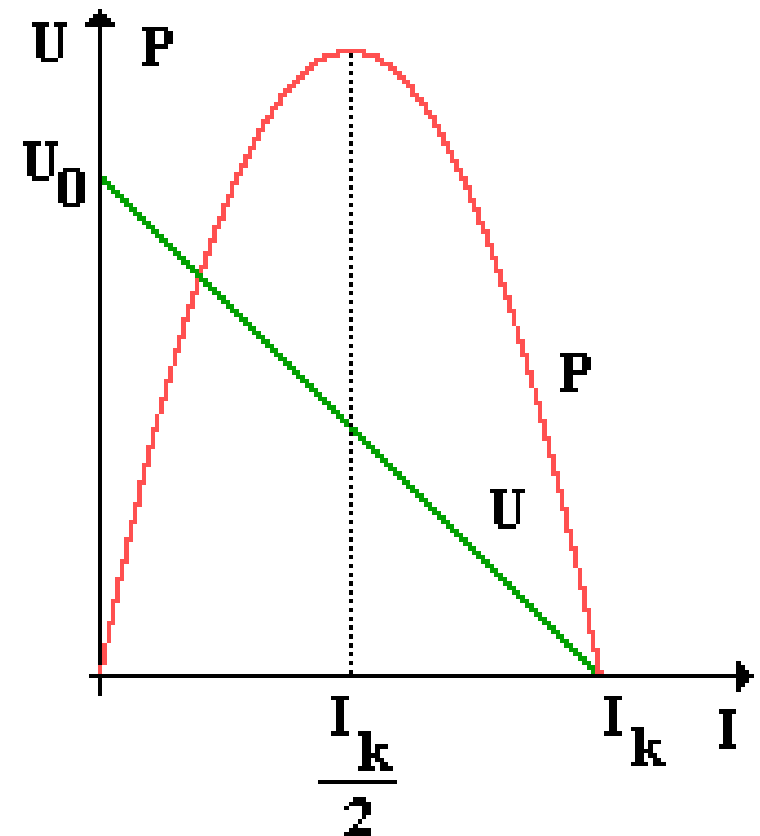
## Graf výkonu a napětí v závislosti na proudu

➤ **červená křivka výkonu** – parabola ( $ax^2 + bx + c$ ) má vrchol  $V \left[ -\frac{b}{2a}; y_0 \right] \Rightarrow$  pro naši funkci výkonu je to konkrétně

$$V \left[ -\frac{U_e}{-2R_i}; y_0 \right]$$

➤ podíl  $\frac{U_e}{R_i}$  je roven zkratovému proudu  $I_k$ ;

vrchol tedy na ose  $x$  odpovídá hodnotě  $\frac{I_k}{2}$



# 20. Elektrická práce a výkon v obvodech = I

## Graf výkonu a napětí v závislosti na proudu

- dosadíme-li do Ohmova zákona pro celý obvod, dostaneme vztah

$$\frac{I_k}{2} = \frac{U_e}{R+R_i}, \text{ resp. po úpravě } \frac{R+R_i}{2} = \frac{U_e}{I_k} = R_i, \text{ resp. } R + R_i = 2R_i, \text{ resp. } R = R_i$$

- tento výsledek dosadíme do vztahu pro účinnost a máme

$$\eta = \frac{R}{R + R_i} = \frac{R}{2R} = \frac{1}{2} = 50 \%$$

- nejvyššího výkonu spotřebiče tedy dosáhneme, je-li jeho odpor roven vnitřnímu odporu zdroje a účinnost pak dosáhne 50 %  $\Rightarrow$  lze dosáhnout i větší účinnosti, ale za cenu menšího výkonu
- v praxi jsou obvody navrženy tak aby bylo dosaženo rozumného kompromisu mezi maximálním výkonem a maximální účinností