

# 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):**

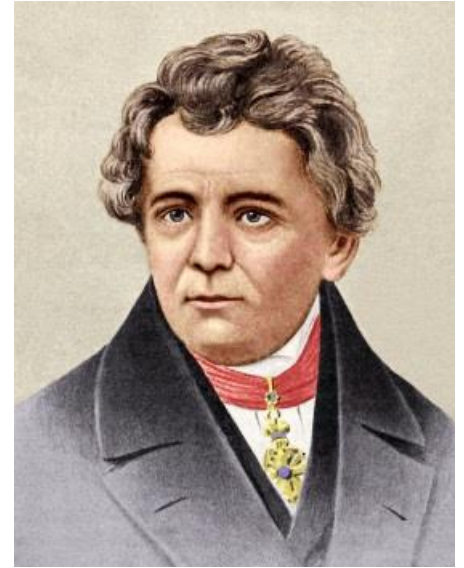
- ⇒ francouzský matematika a fyzik;
- ⇒ nikdy nechodil do školy ;-)
- ⇒ vzděláván otcem, který skončil pod gilotinou;
- ⇒ 1820 – cívka s proudem vyvolává magnetické pole
- ⇒ 1827 – **pravidlo pravé ruky** (prsty ve směru proudu, palec ukazuje severní pól cívky);
- ⇒ objevil vztah pro magnetickou sílu 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;



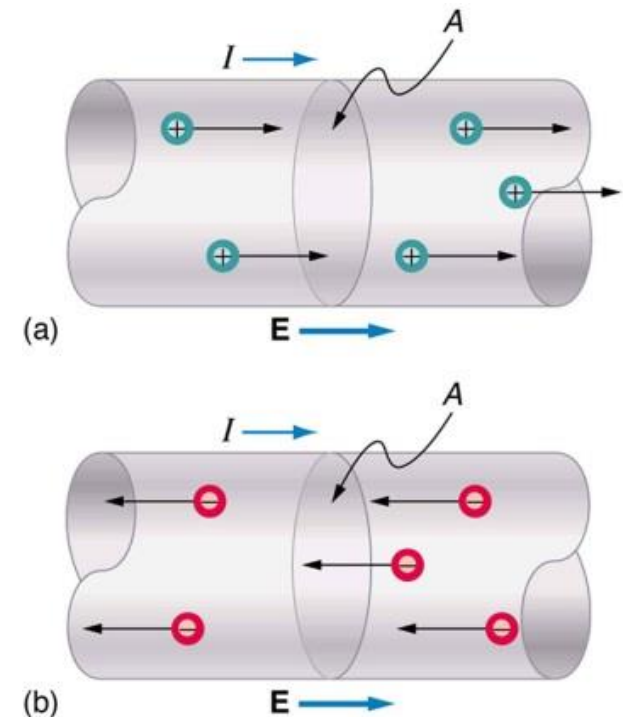
# 13. Vznik elektrického proudu

## 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 –

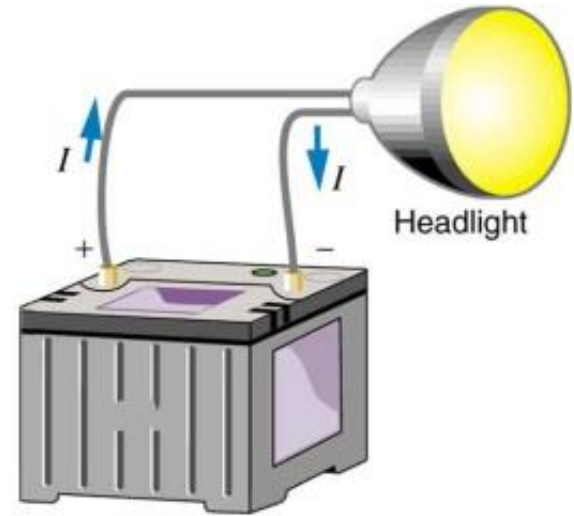
**b) směr elektronů** ve vodiči  
(proti směru intenzity el. pole  $E$ )



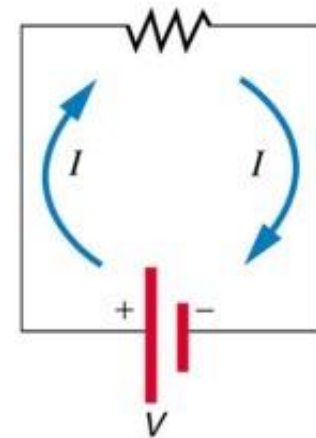
# 13. Vznik elektrického proudu

## 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 –  $i$**

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

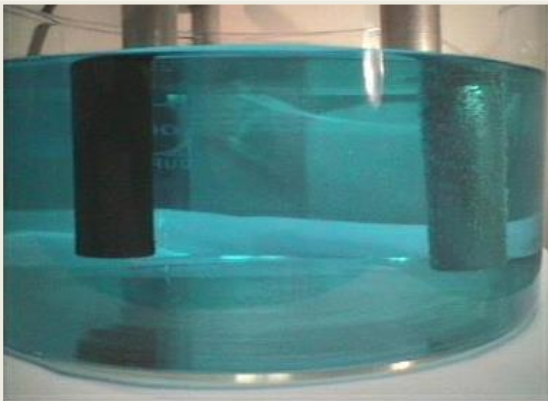
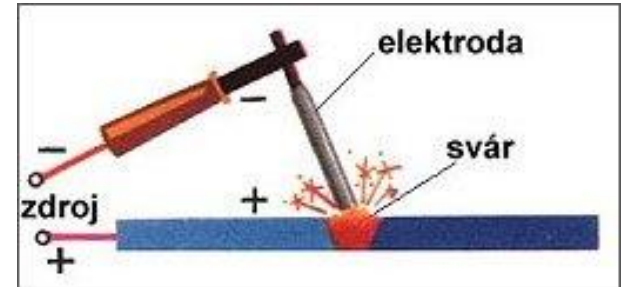
➤ nerovnoměrný průchod náboje  $Q$  průřezem vodiče za čas  $t$ , obecný vztah



# 13. Vznik elektrického proudu

## Účinky elektrického proudu:

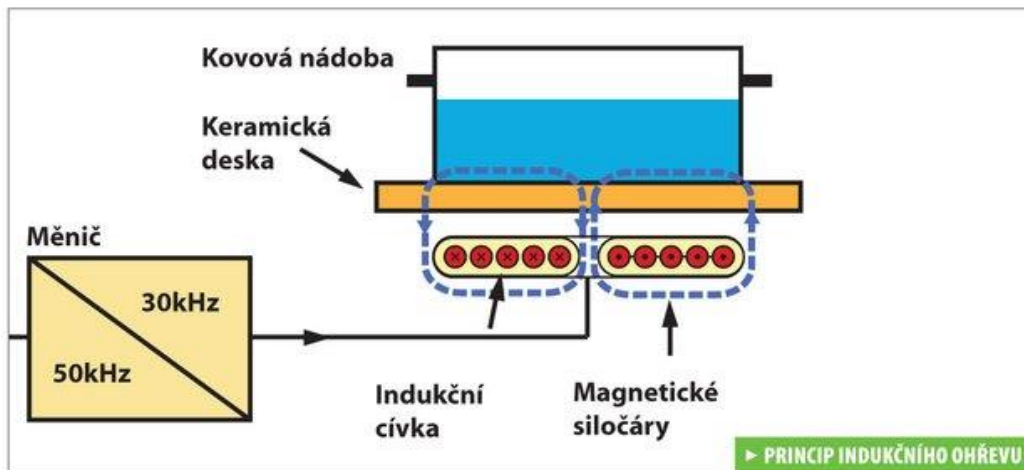
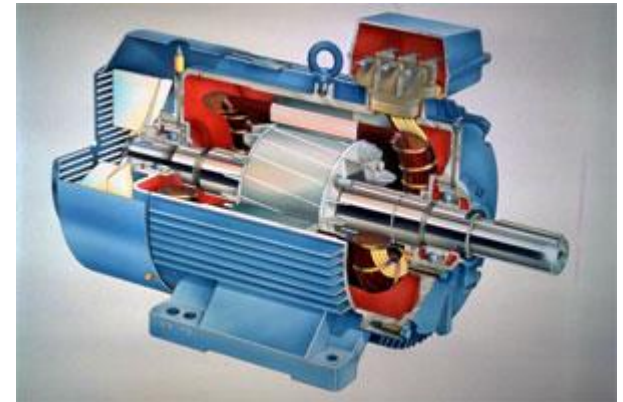
- tepelné – vařič, elektrické podlahové topení, sváření elektrickým obloukem
- chemické – elektrolýza (změna složení kapalin)
- magnetické – elektromagnet



# 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

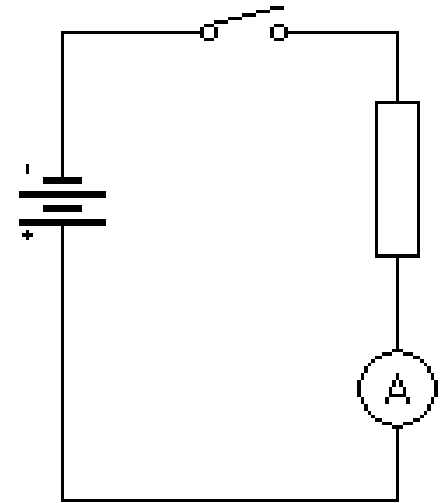


# 13. Vznik elektrického proudu

## 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**

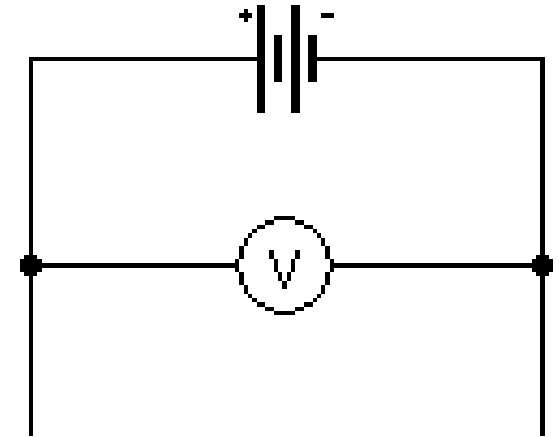
**elektrochemických potenciálů uvnitř zdroje**

- 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

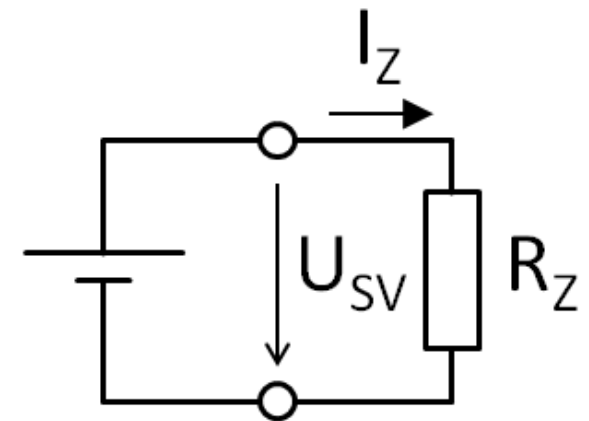
## nezatížený zdroj

- 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

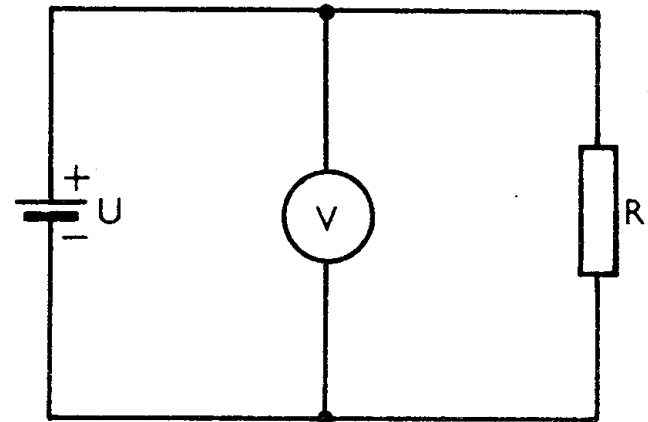
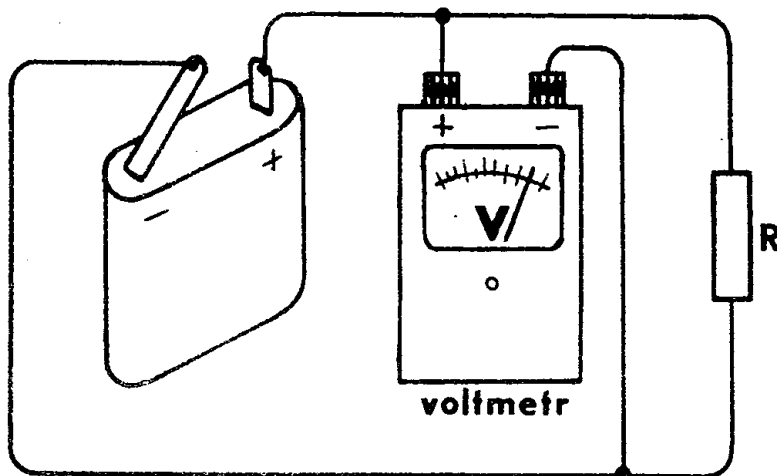
- na vnější svorky zdroje připojen spotřebič (na obr. realizovaný rezistorem  $R_Z$ )
- vnějším obvodem prochází el. proud  $I_Z$
- svorkové napětí  $U$  (na obr.  $U_{SV}$ ) je vždy menší než elektromotorické, tj.  $U < U_e$
- $U = U_e - U_i$ ;  $U_i$  – je úbytek napětí vznikající uvnitř zdroje průchodem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



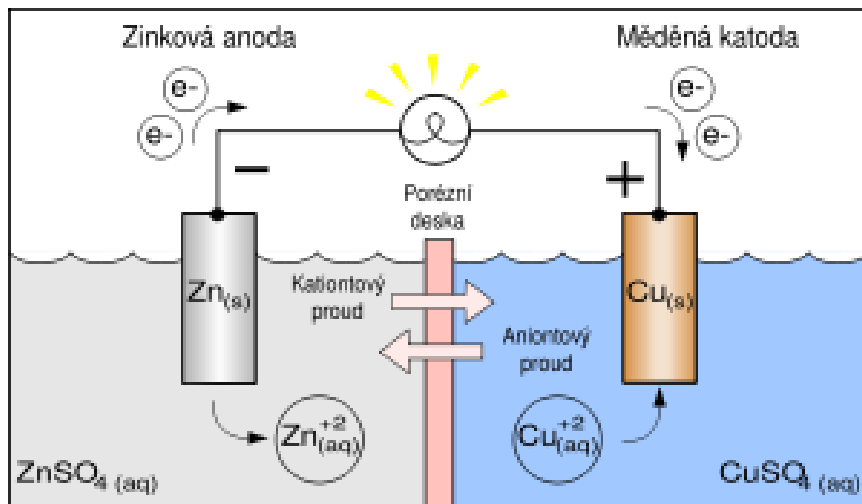


# 14. Zdroje elektrického proudu

## 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

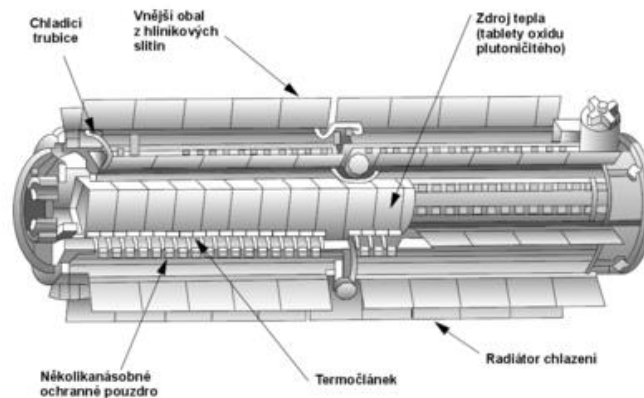
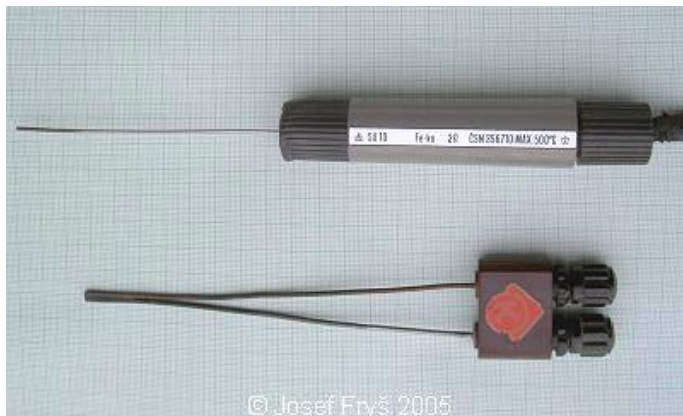
**b) termoelektrický článek** – každý kov má tzv. termoelektrický potenciál; zahříváním dvou spojených kovů (bimetalového pásku) vzniká rozdíl potenciálů, tj. napětí

⇒ 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)

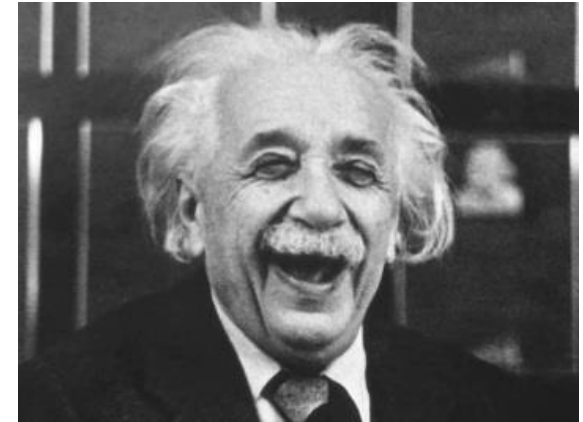


# 14. Zdroje elektrického proudu

## 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

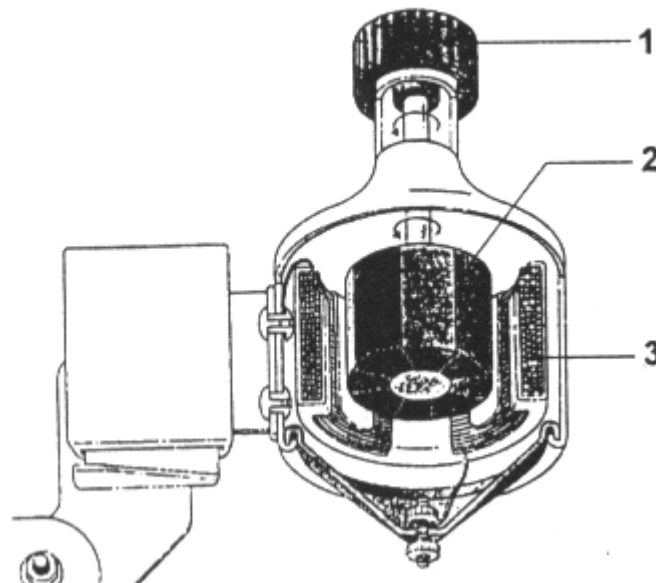
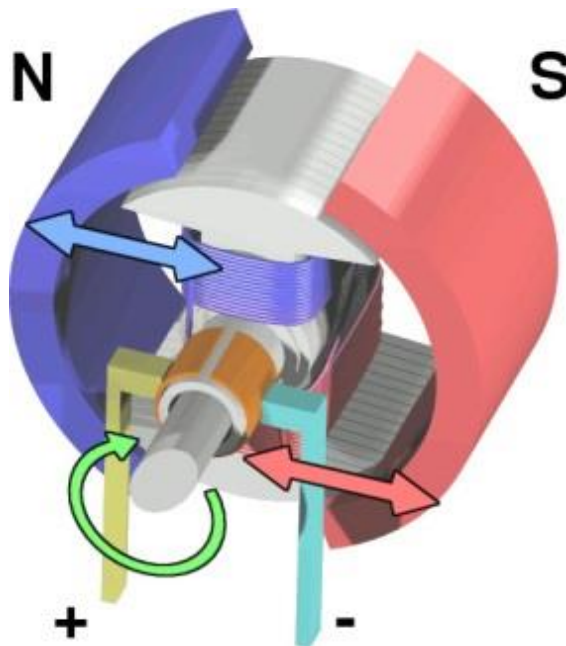


# 14. Zdroje elektrického proudu

## d) dynamo

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

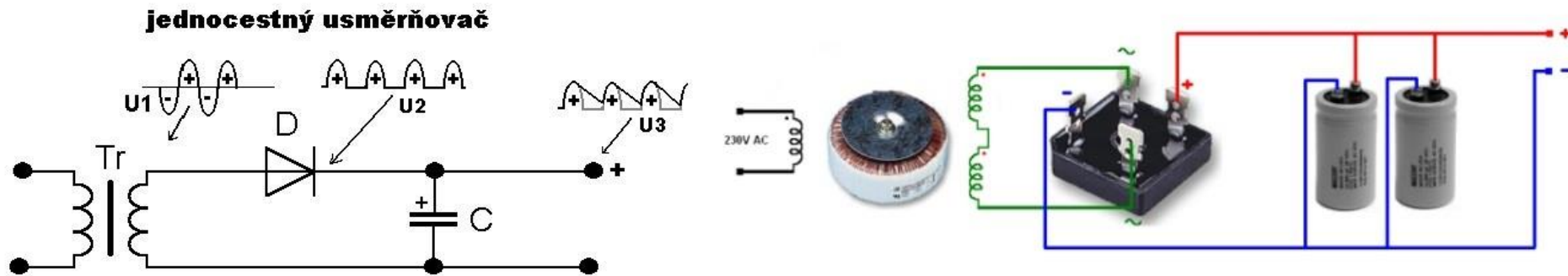
**Neelektrostatické síly vznikají pohybem vodiče v magnetickém poli.**





# 14. Zdroje elektrického proudu

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



**f) mechanické zdroje**

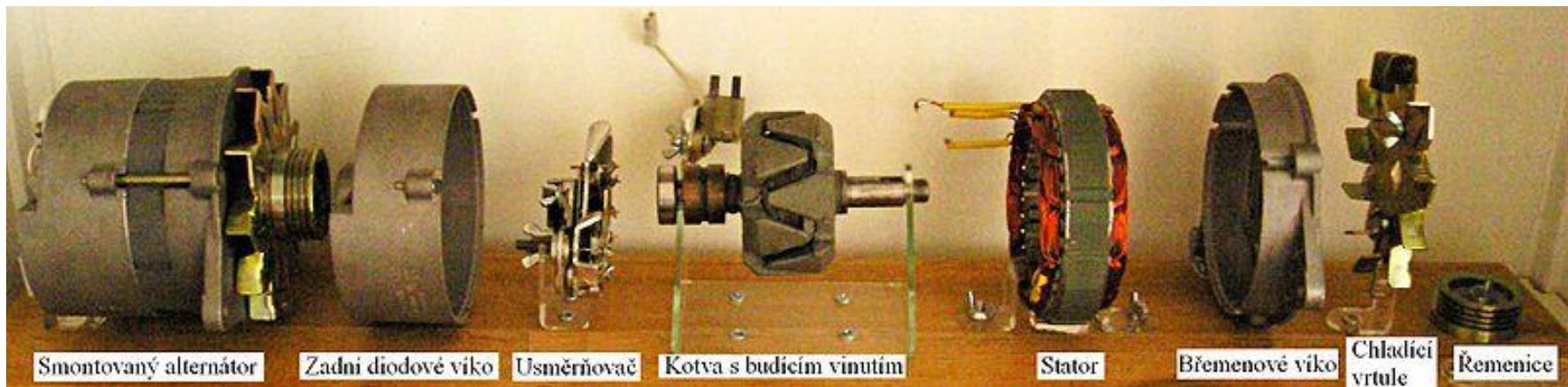
- ⇒ náboje se tvoří třením dvou dielektrik (pás - cívky, kotouče)
- ⇒ dnes se používají pouze k demonstračním fyzikálním experimentům



# 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



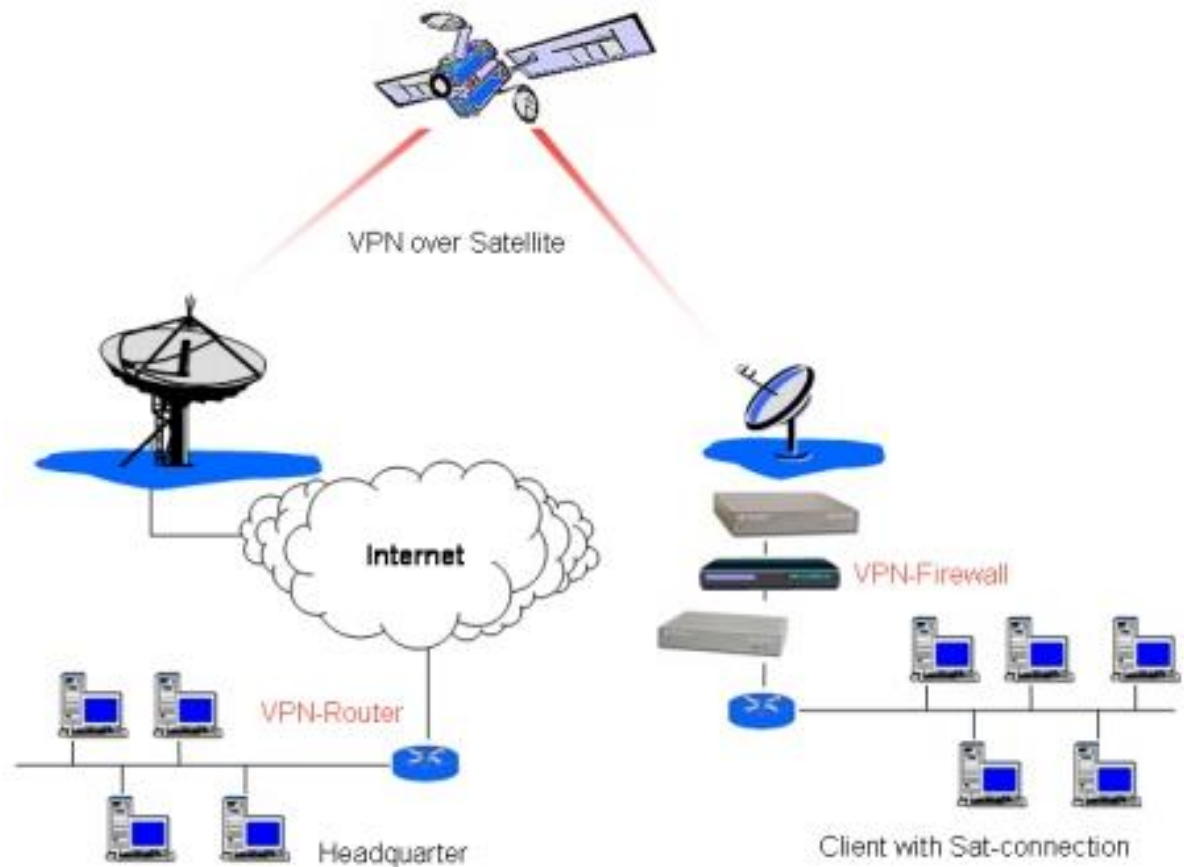


# 14. Zdroje elektrického proudu

**b) oscilátory** – elektronické zdroje;

⇒ generátory sinusového signálu různých frekvencí

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



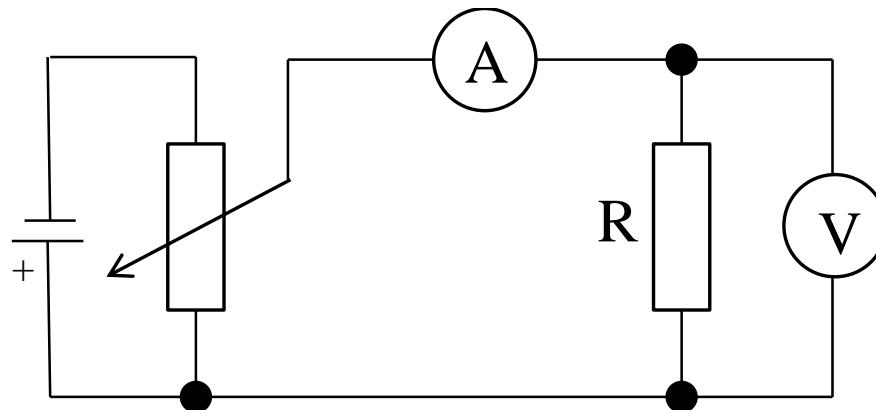
# 15. Elektrický odpor. Ohmův zákon pro část obvodu.



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)       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $\frac{U}{I}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

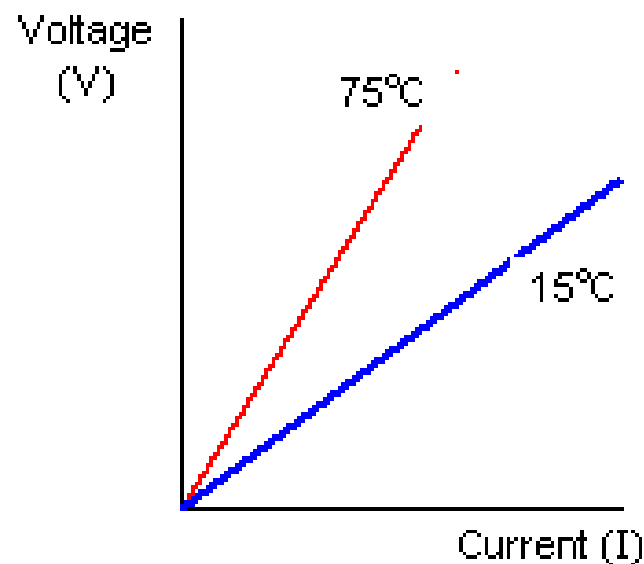
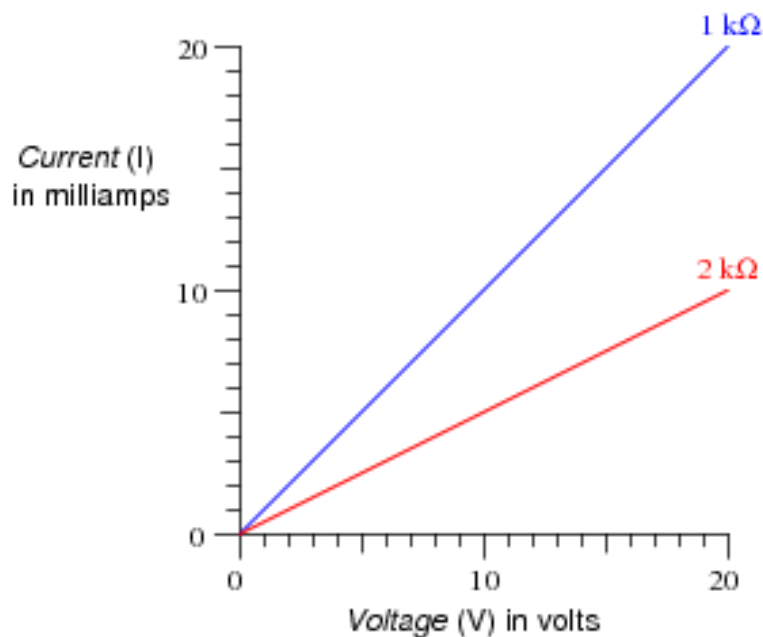
Schéma zapojení:



# 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)

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

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

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

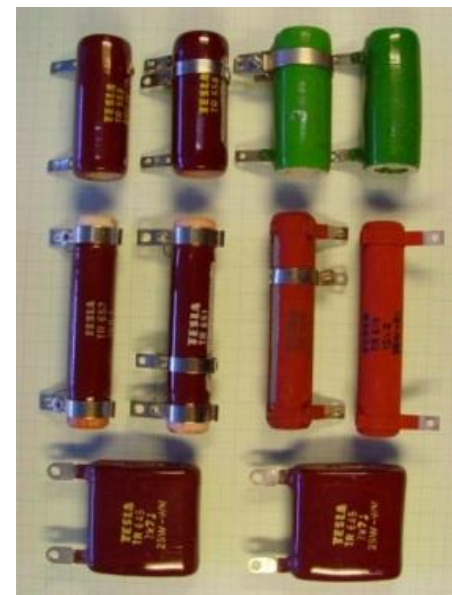
# 15. Elektrický odpor. Ohmův zákon pro část obvodu.

## odpor

- vlastnost vodiče

## rezistor

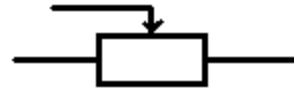
- elektronická součástka používaná v elektronických obvodech k nastavení nebo omezení proudu
- využití: elektronika, ochrana proti zkratu, topná tělesa
- slangově se nazývá též odpor
- značení:



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

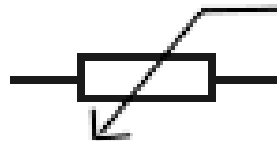
## reostat

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



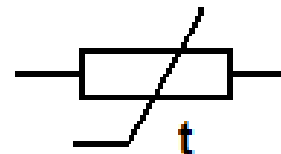
## potenciometr

- 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

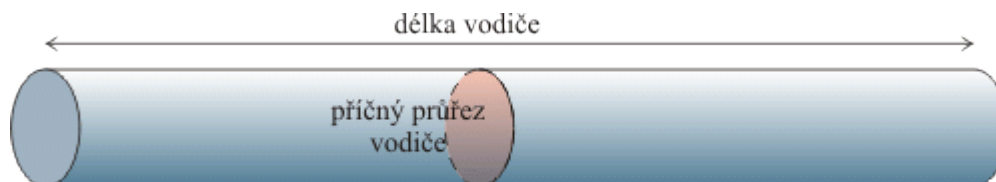


1. Změříme odpor stejného vodiče při různé délce a stejném průřezu.
2. Změříme odpor stejného vodiče při různém průřezu a stejné délce.
3. Změříme odpor dvou různých vodičů stejné délky a průřezu.

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

$l$  – 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.

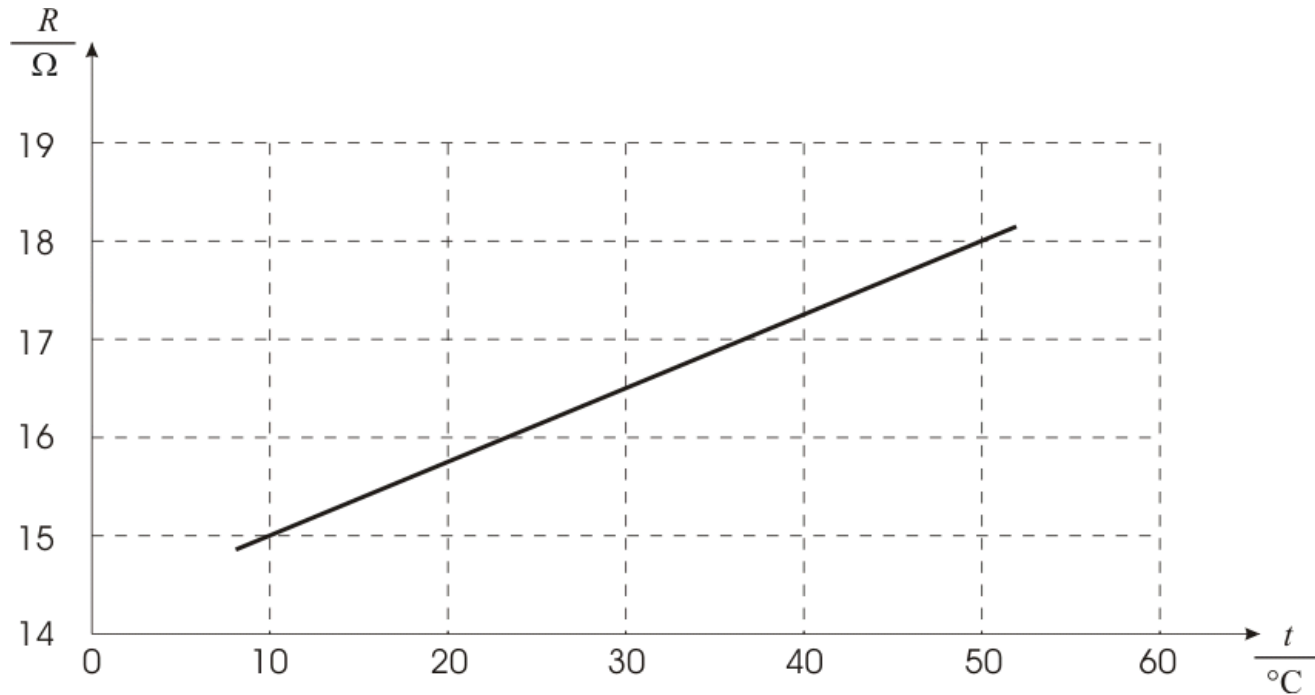


➤ změříme velikost odporu vlákna žárovky pro různé proudy

|                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $U$ (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<br>$\rho [\mu\Omega \text{ m}]$ | Teplotní součinitel<br>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?

$$R_0 = 64 \Omega$$

$$t_0 = 20 \text{ °C}$$

$$t = 2500 \text{ °C}$$

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

$$R = ? \Omega$$

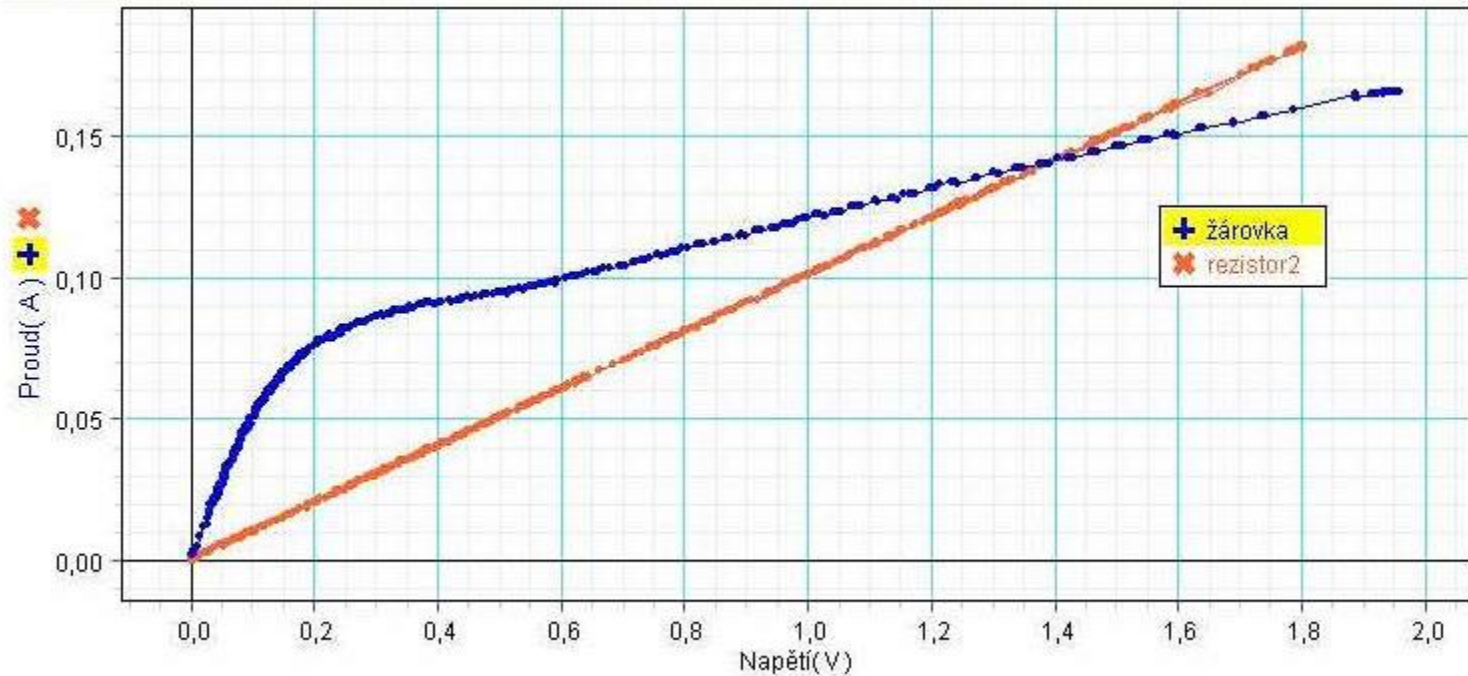
$$**R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)**$$

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

$$R = 762 \Omega$$

# 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

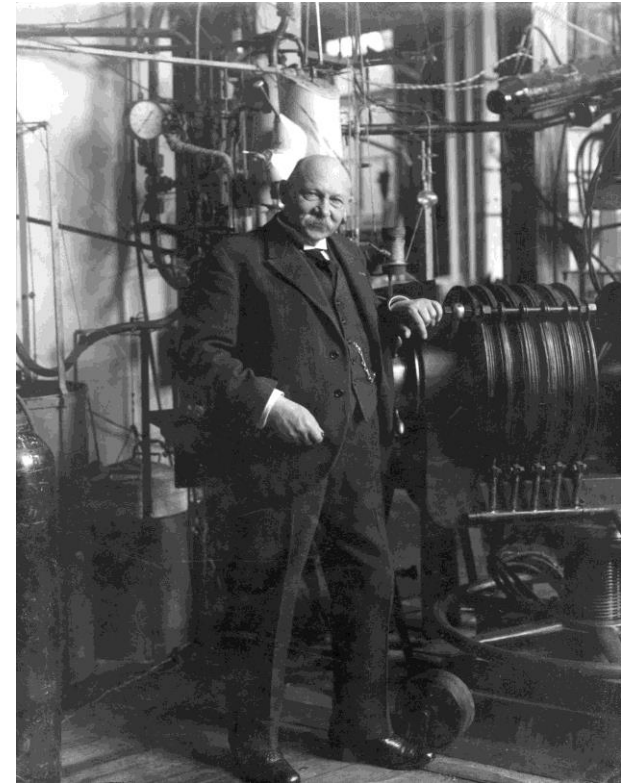
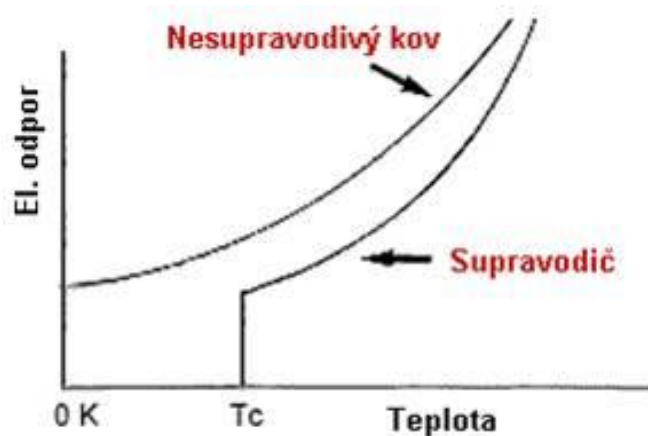
# 16. Závislost odporu kovového vodiče na teplotě.

## 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

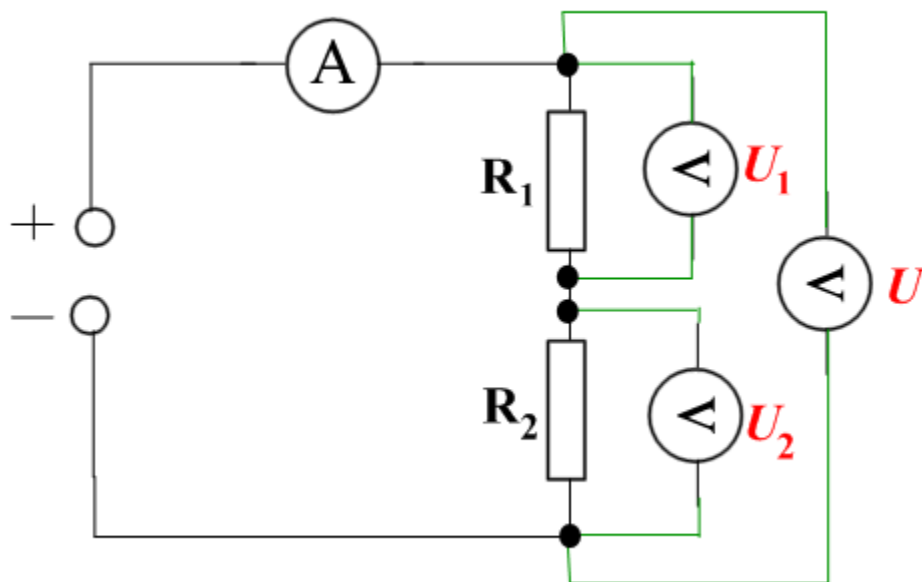


# 17. Spojování rezistorů. Regulace proudu a napětí.

## 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:

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

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

$$R = R_1 + R_2$$

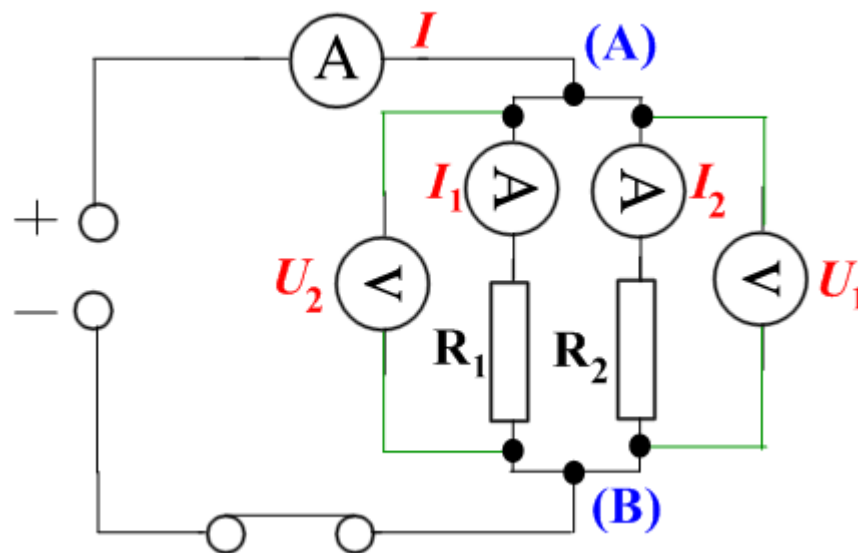
- analogicky pro větší počet rezistorů zapojených do série platí:  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$

# 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:

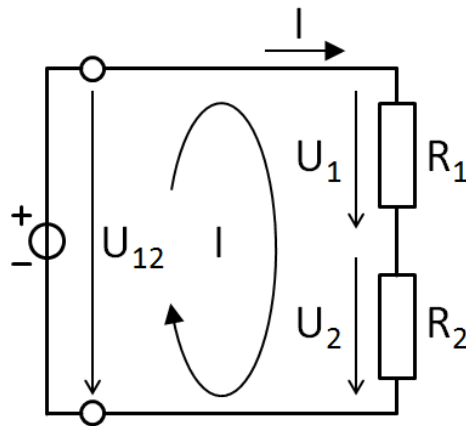
$$R_1 = 10 \Omega$$

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

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

---

$$R_2 = ? (\Omega)$$



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  $R_2$

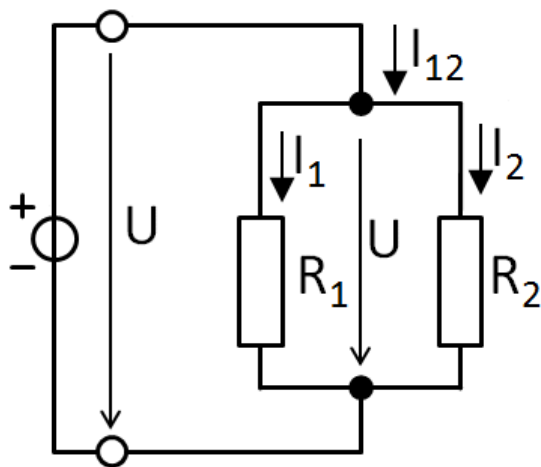
Zápis zadání:

$$R_1 = 30 \Omega$$

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

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

$$R_2 = ? (\Omega)$$



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:

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

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

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

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

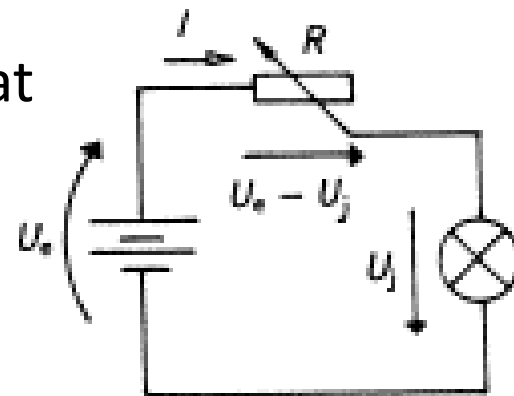
$$R_1 < R_2 \rightarrow I_1 > I_2$$

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

# 17. Spojování rezistorů. Regulace proudu a napětí.

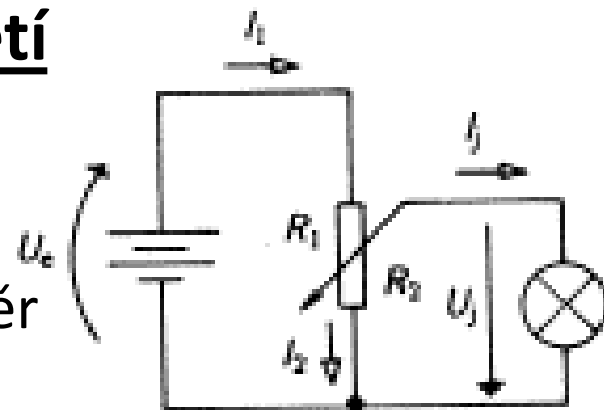
## Regulace proudu $I$ v obvodu

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



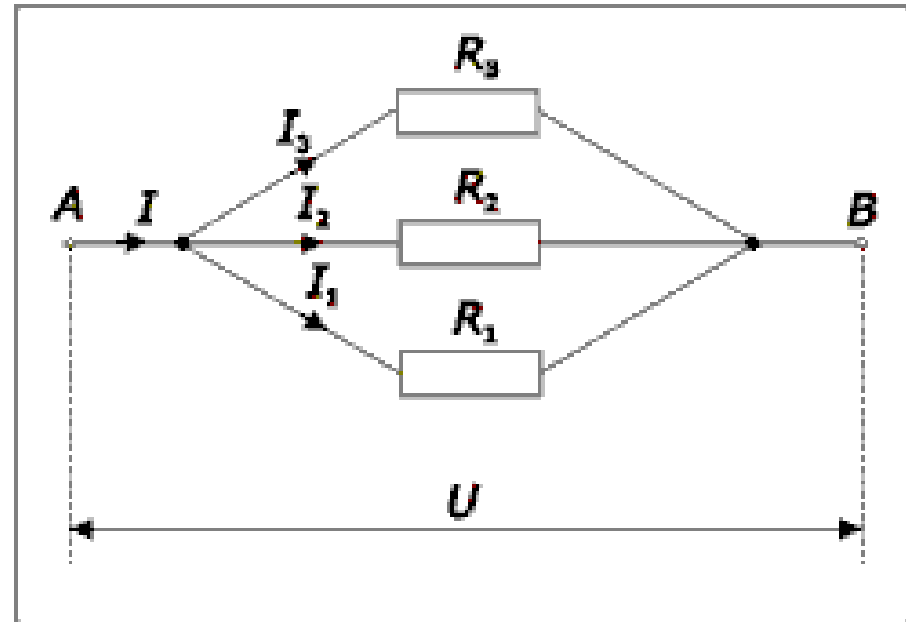
## Regulace napětí $U$ v obvodu – dělič napětí

- **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)

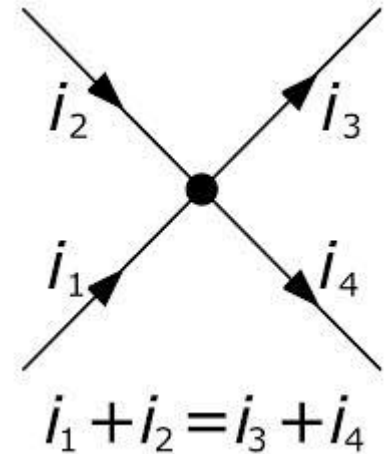
- německý fyzik;
- $\Rightarrow$  1847 formuloval zákony rozvětvení el. proudu;
- $\Rightarrow$  rozvinul (společně s R. Bunsenem) metodu spektrální analýzy  $\Rightarrow$  metoda se používá pro určování složení hvězd;
- $\Rightarrow$  spoluobjevil cesium a rubidium



# 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 –



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



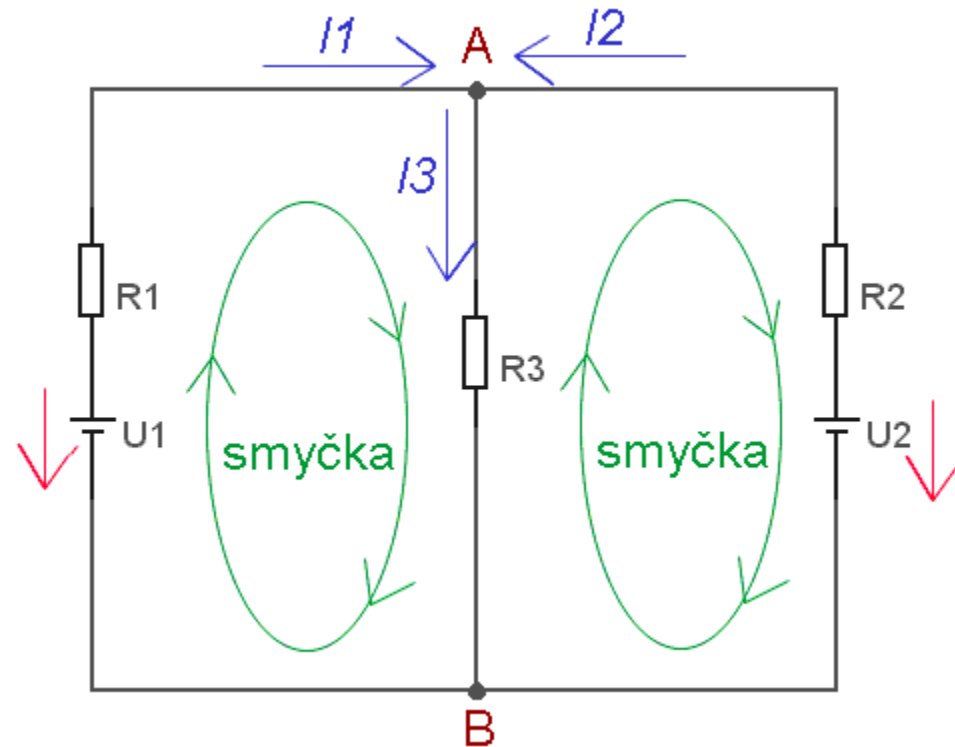
# 18. Kirchhoffovy zákony

## 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  $U_1$ )

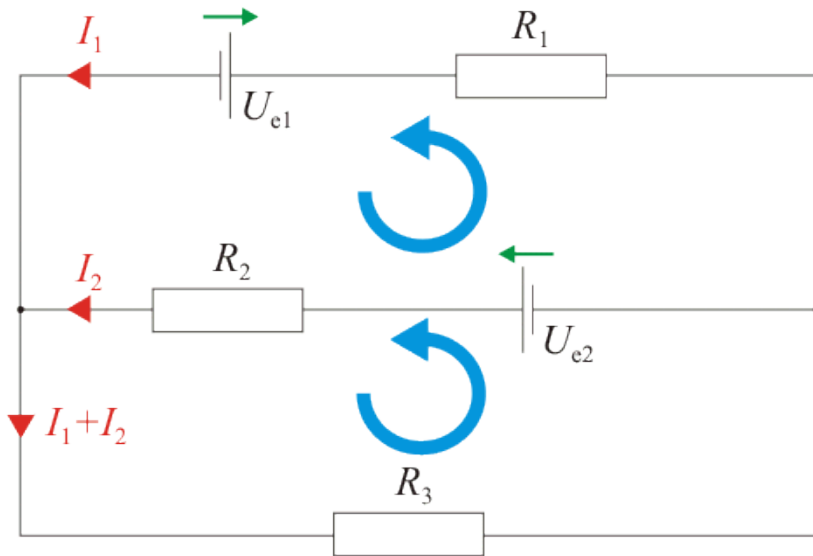


$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{j=1}^m U_{e_j}$$

# 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

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



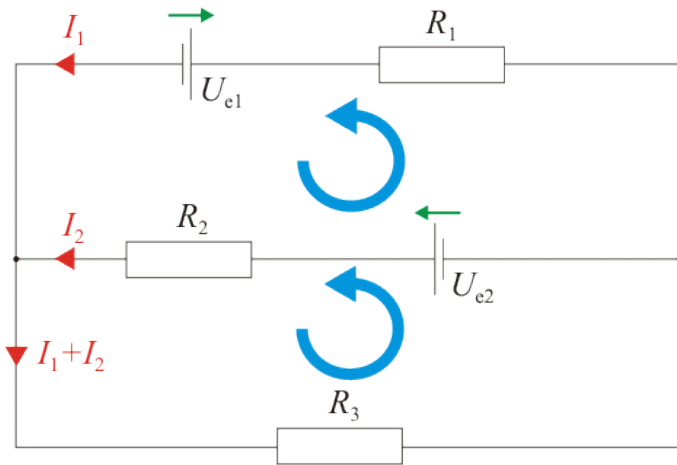
<http://fyzikalniulohy.cz>

- 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:

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

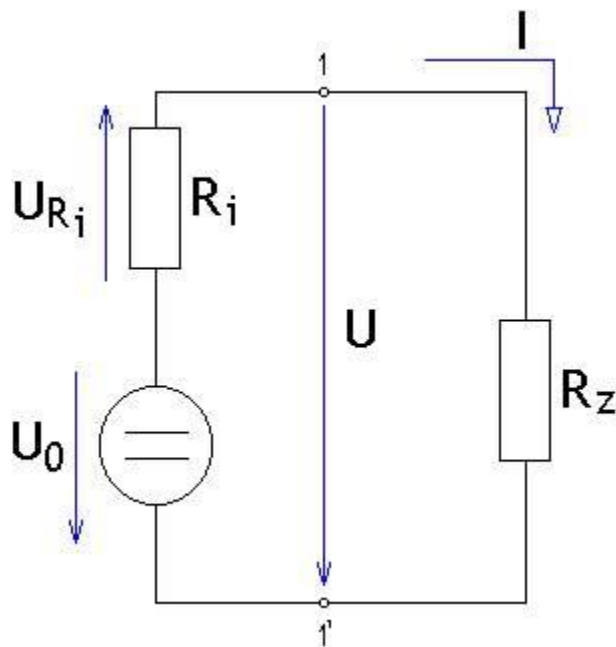
➤ záporné znaménko u proudu  $I_1$  znamená, že proud má opačný směr než námi původně určený ve schématu

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:  $I = 0 \text{ A}$

$$U = U_0 = U_e$$

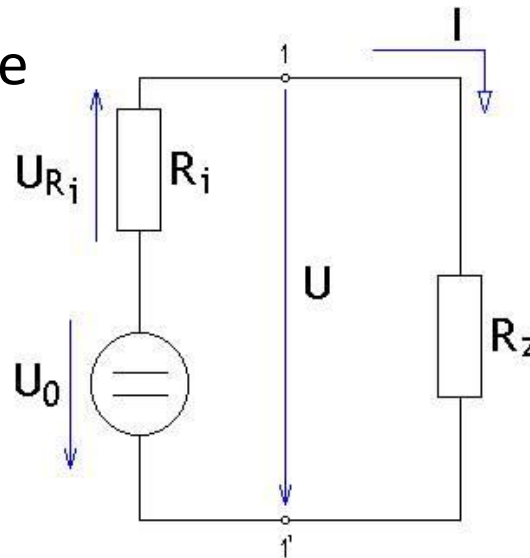
$U$  – napětí na svorkách zdroje (svorkové napětí)

$U_0$  – 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:

$$RI = U_e - R_i I$$

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

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

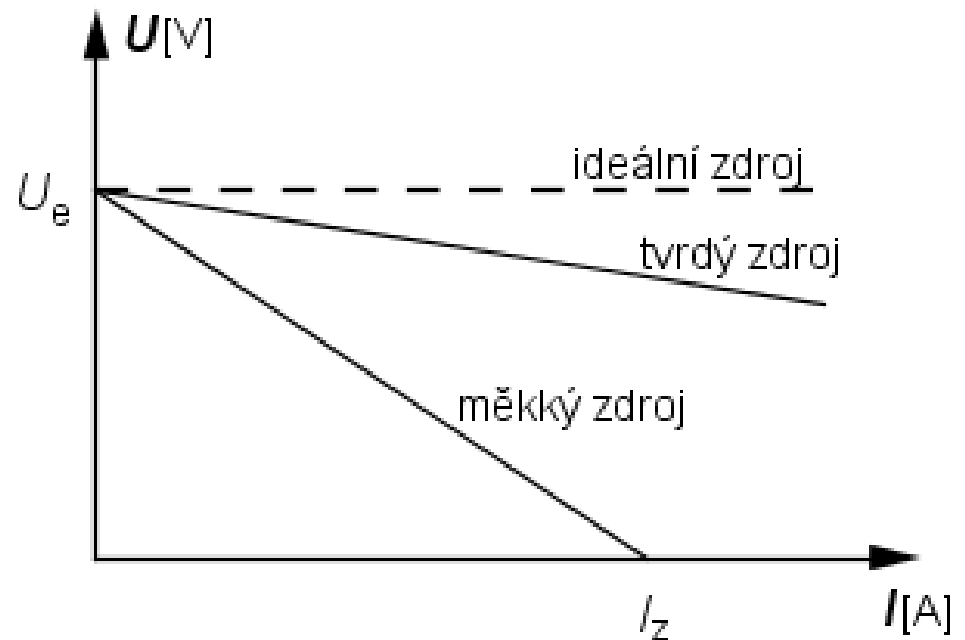
**elektrický proud dodávaný zdrojem**

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

# 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 –  $I_z$**

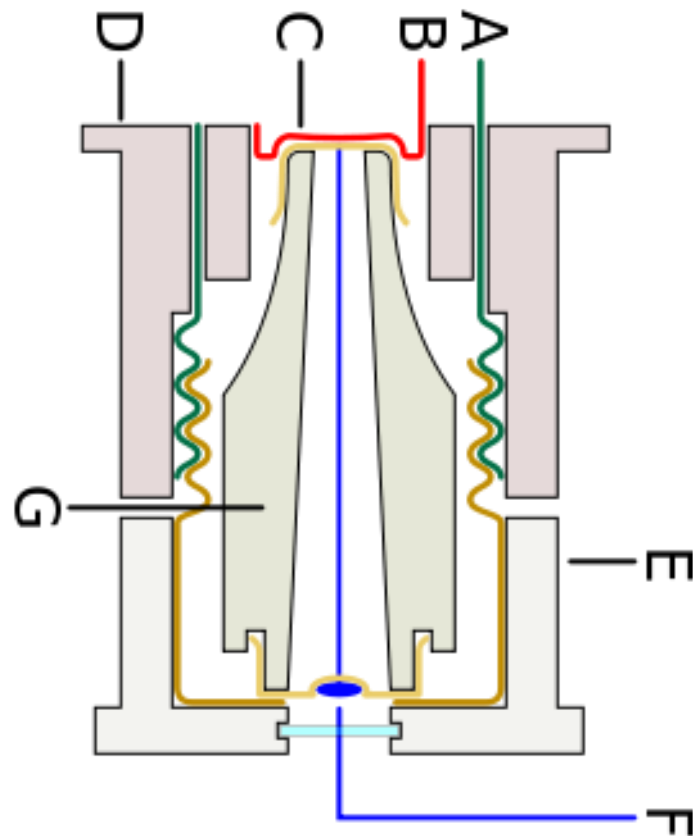
$$I_z = \frac{U_e}{R_i}$$

- 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

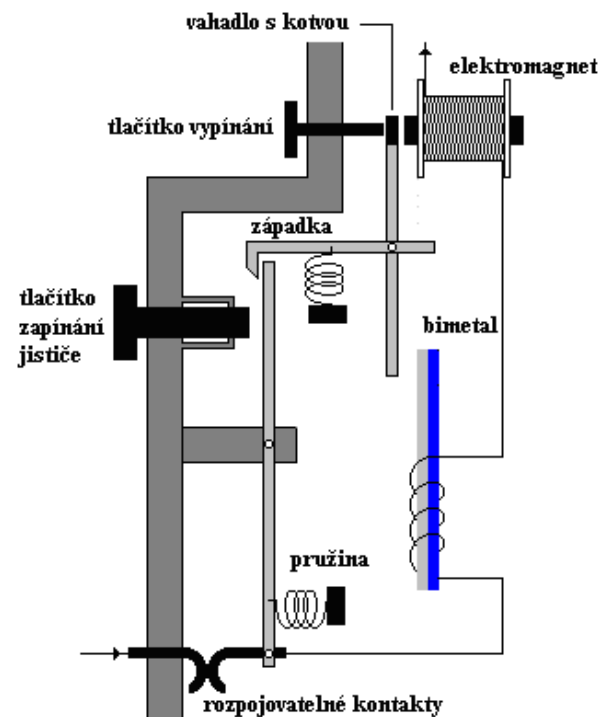
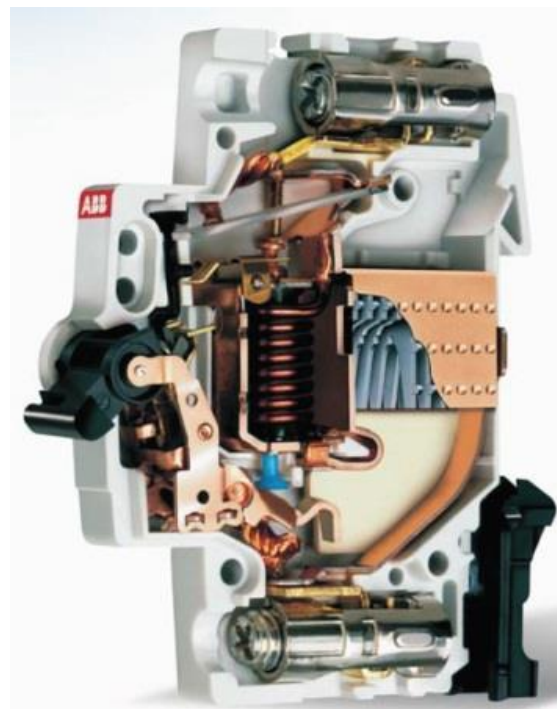
- pojistky ⇒ protékající proud roztaví vnitřní drátek; nebezpečí požáru z jiskřiště; nenahrazovat pojistku hřebíkem!!!



# 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  $I$

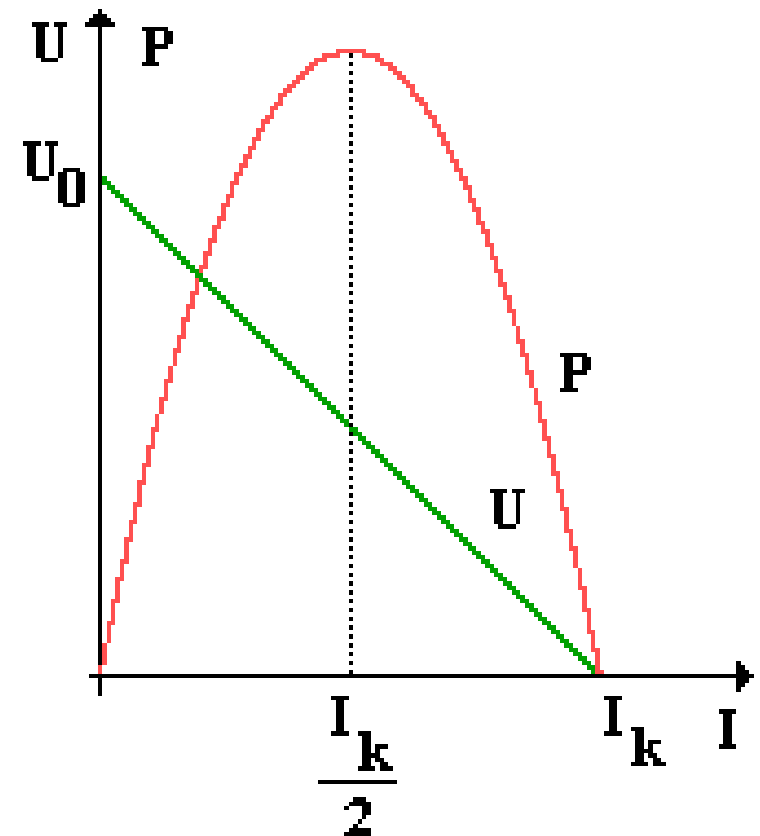
## Graf výkonu a napětí v závislosti na proudu

➤ **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