

Úvod do elektrokinetiky

Hlavní body - elektrokinetika

- Elektrické proudy – pohyb nábojů
- Ohmův zákon, mikroskopický pohled
- Měrná vodivost σ – izolanty, vodiče, polovodiče
- Elektrické zdroje napětí (a proudu)
- Rezistance a rezistory
- Elektrické zdroje, přenos náboje, energie a výkon
- Reálný elektrický zdroj, akumulátor
- Skládání rezistorů - seriově/paralelně
- Řešení obvodů - Kirchhoffovy zákony

Elektrický proud

Zatím jsme se zabývali **rovnovážnými** stavy.

Avšak než je jich dosaženo, dochází obvykle k pohybu **volných** nositelů náboje v **nenulovém elektrickém poli**, čili tam existují **proudy**.

Často záměrně udržujeme na vodičích **rozdíl potenciálů**, abychom udrželi **elektrický proud**.

Elektrický proud v určitém okamžiku je definován jako :

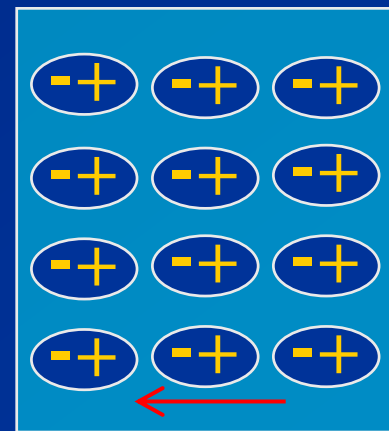
$$I(t) = \frac{dQ}{dt}$$

Z fyzikálního hlediska rozlišujeme tři druhy proudu. První dva jsou přímo přenos náboje:

kondukční – pohyb volných nositelů náboje v látkách, pevných nebo roztocích

konvekční – pohyb nábojů ve vakuu (např. elektronů v obrazovce)

posuvný – je spojený s časovou změnou elektrického pole (polarizace dielektrik)



- Elektrické proudy mohou být uskutečněny pohybem nábojů obojí polarity.
- Podle konvence směřuje proud ve směru elektrického pole, čili stejně, jako kdyby nositelé náboje byly kladné.
- Pokud jsou volné nositele v určité látce záporné, jako například u kovů, pohybují se fyzicky proti směru konvenčního proudu.

$$\text{Směr pohybu} + Q \approx \text{směru} + I$$

- Nejprve se budeme zabývat **stacionárními proudy**. Jedná se o zvláštní případ **rovnováhy**, kdy napětí a proudy v obvodech jsou **stálá a konstantní**.

- **Jednotkou proudu je 1 ampér** se zkratkou A

$$1 A = 1 C/s \quad \sim \quad 6,24 \cdot 10^{18} \text{ elektronu za s!}$$

- Protože proudy lze relativně snadno měřit je **ampér** přijat jako **základní jednotka soustavy SI**.
- Pomocí něj jsou potom definovány i další elektrické jednotky. Například 1 Coulomb :

$$1 C = 1 As.$$

Mikroskopický popis proudu

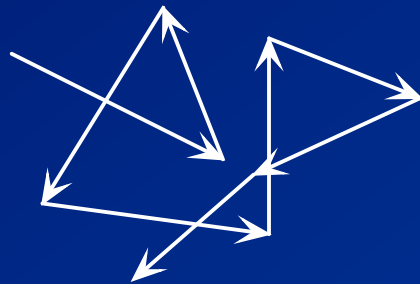
- Pokud by se elektron pohyboval **bez brzdící síly** jeho hybnost v elektrickém poli a tedy i **celkový proud by s časem t neustále rostl** (rovnoměrně zrychlený pohyb).

Např. ve vakuu $m_e \cdot v = E \cdot e \cdot t$

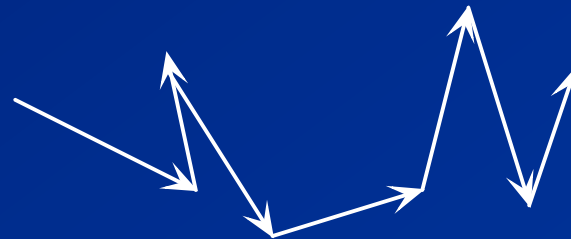
(hybnost) (impuls)

Ale v pevných látkách:

- Díky srážkám s “poruchami mřížky“ se ustálí **konstantní proud**.



Tepelný pohyb
 $v_T \sim 10^6 \text{ ms}^{-1}$!



Superpozice driftového
pohybu přes tepelný pohyb

Konstantní proud = konstantní driftová (střední) rychlost elektronů v_D
ta je dána středním relaxačním časem

τ (střední doba mezi srážkami)

$$m_e v_D = e E \tau$$

(hybnost) (impuls)



Driftová rychlost v jednotkovém poli = **pohyblivost** μ

$$v_D/E = e \tau / m_e = \mu$$

Abychom udrželi **konstantní proud**, například ve vodivé tyčce, musíme udržet **konstantní elektrické pole E**

→ vytvoří se rovnováha mezi brzdou (srážky) a urychlující silou E
to je ekvivalentní udržování konstantního rozdílu potenciálu neboli **napětí mezi konci tyčky**. K tomu potřebujeme elektrický **zdroj napětí U**.

Ohmův zákon – mikroskopický pohled, odvození

Jednotkovým průřezem $S = 1 \text{ m}^2$ projde za čas dt

$S \cdot n \cdot dl$ elektronů proud I

kde, $dl = v_D \cdot dt$, $n =$ počet elektronů v 1 m^3 (koncentrace)

To znamená, že za dt projde jednotkovým průřezem celkový náboj dQ :

$$I = dQ / dt = e \cdot S \cdot n \cdot v_D = e^2 n \cdot S \cdot \tau \cdot E / m_e \quad \Rightarrow \quad \text{hustota proudu}$$

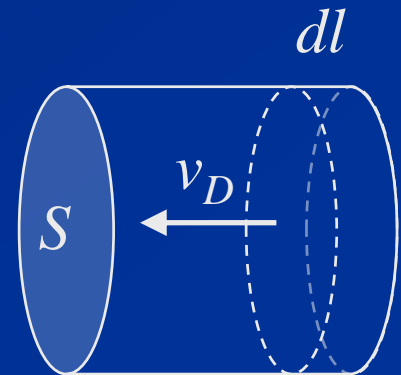
Ohmův zákon: Hustota proudu $i = I/S$ je přímo úměrná intenzitě el. pole E (diferenciální tvar)

$$\vec{i} = \frac{e^2 n \cdot \tau}{m_e} \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad \sigma \dots \text{měrná vodivost}$$

$\rho \dots$ měrný odpor

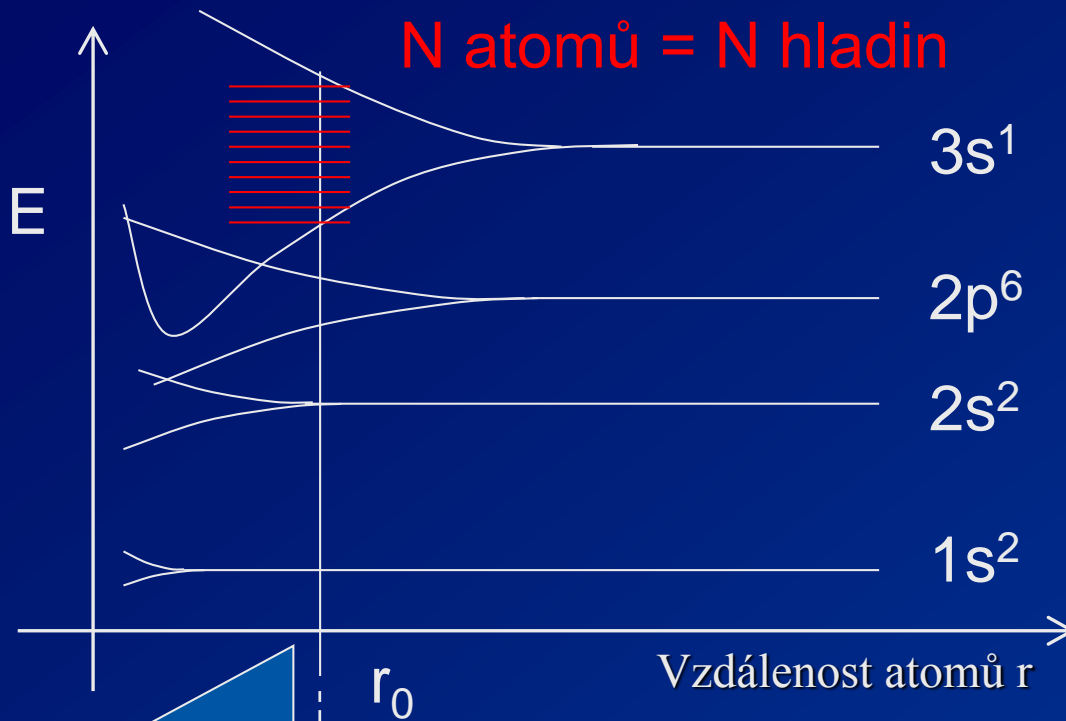
$$\vec{i} = \frac{\vec{E}}{\rho}$$

Materiálové parametry!

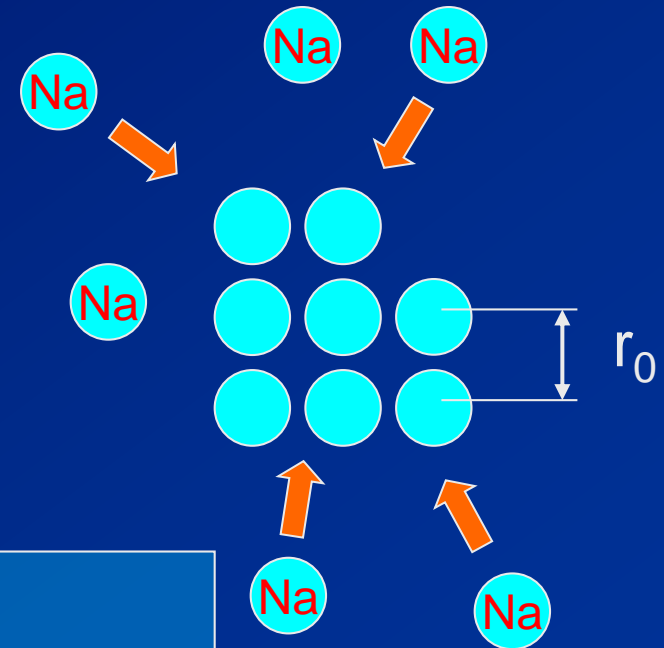


Pásová teorie pevných látek

N atomů = N hladin



Kondenzace sodíkových atomů – vznik energetických pásů



3. Pásky
kovového sodíku

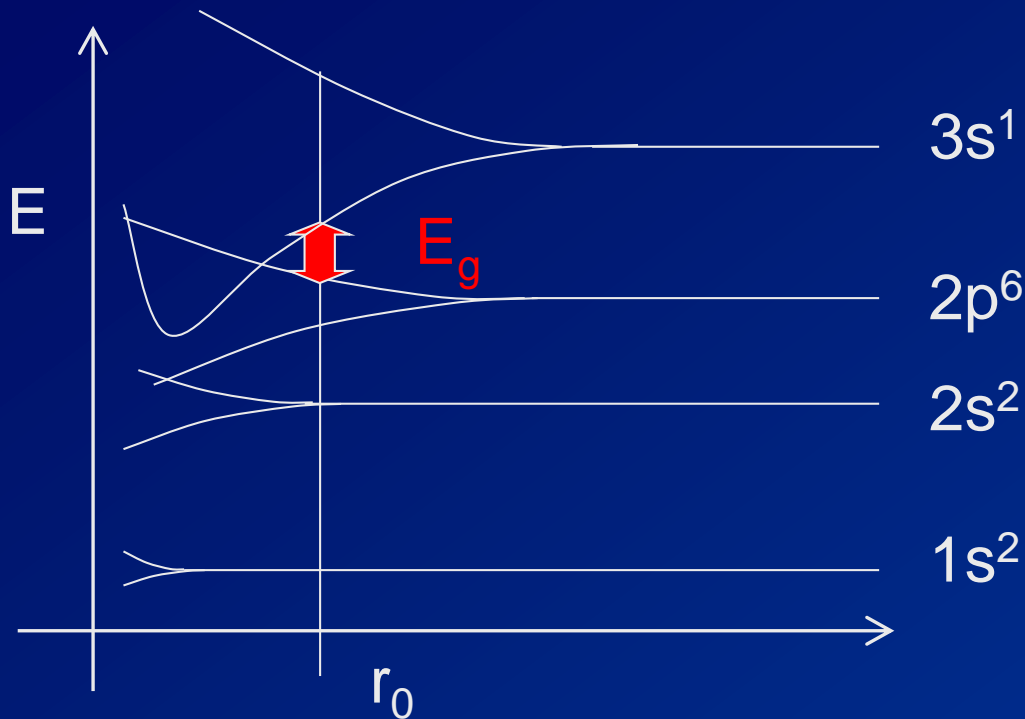
2. Počínající
překryv orbitalů

1. Orbitály
jednotlivých atomů

Klesá celková energie

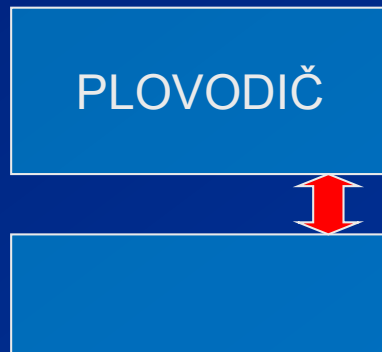
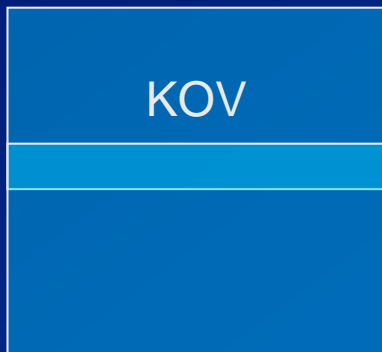
- U **kovů** se energetické pásy **překrývají** nebo jsou **neúplně zaplněné**
- U **polovodičů / izolantů** se nepřekrývají a jsou **zcela plné** nebo **zcela prázdné**

Pásová teorie pevných látek



Pásy
kovového sodíku

Orbitaly
jednotlivých atomů

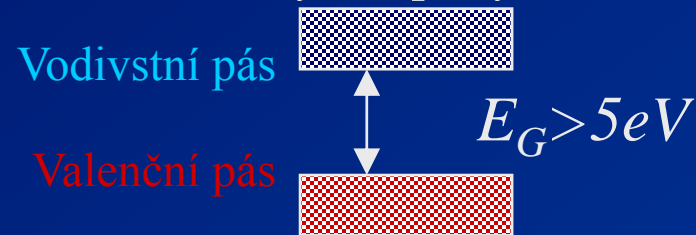


Měrná vodivost σ –
izolanty, vodiče, polovodiče

$$\sigma = \frac{e^2 n \cdot \tau}{m_e} \quad \text{rozbor}$$

Izolanty: Prakticky neexistují ani volné elektrony ani pohyblivé ionty

$$n \rightarrow 0, \quad \sigma \rightarrow 0$$



Vodiče: Nejčastěji kovy, n je velké konstantní $\sigma(T)$ klesá s rostoucí teplotou protože τ se zmenšuje (srážky elektronů s kmity mřížky jsou častější)

$$n \approx 10^{28} \text{ m}^{-3}, \quad \sigma \text{ je veliká}$$

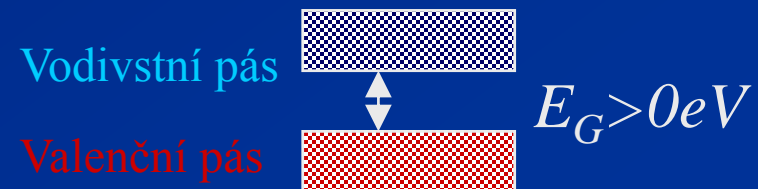
$$\tau(T) \downarrow \implies \sigma(T) \downarrow$$



Polovodiče: Si, Ge, GaAs,... n roste s teplotou = excitace

$$n \approx 10^{20} \text{ m}^{-3}, \quad \sigma \text{ je střední}$$

$$n(T) \uparrow, \tau(T) \downarrow \implies \sigma(T) \uparrow \text{ potom } \downarrow$$



- **Příklad :** Mějme proud $I=10$ A, protékající měděným vodičem o průřezu $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$. Jaká je hustota proudu a driftová rychlost nosičů náboje, přispívá-li každý atom jedním volným elektronem?

M (Cu) je $63,5 \text{ g/mol}$, $\rho(\text{Cu}) = 8,95 \text{ g/cm}^3$.

- V 1 m^3 je $8,95 \cdot 10^6 / 63,5 = 1,4 \cdot 10^5 \text{ mol} = 1,4 \cdot 10^5 \cdot N_A$ atomů
- Každý atom přispívá jedním volným elektronem. Hustota nosičů náboje tedy je : $n = 8,48 \cdot 10^{28} \text{ elektronů/m}^3$.
- Driftová rychlost v_D :

$$v_D = I / e \cdot S \cdot n =$$

$$10 / (8,48 \cdot 10^{28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{-6}) = \underline{\underline{2,46 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} !!!}}$$

≠ rychlosti šíření pole, to se šíří téměř rychlostí c !!!

Ohmův zákon

$$\vec{i} = \frac{\vec{E}}{\rho} = \sigma \vec{E}$$

pro homogenní pole

$$E = \frac{U}{l}$$

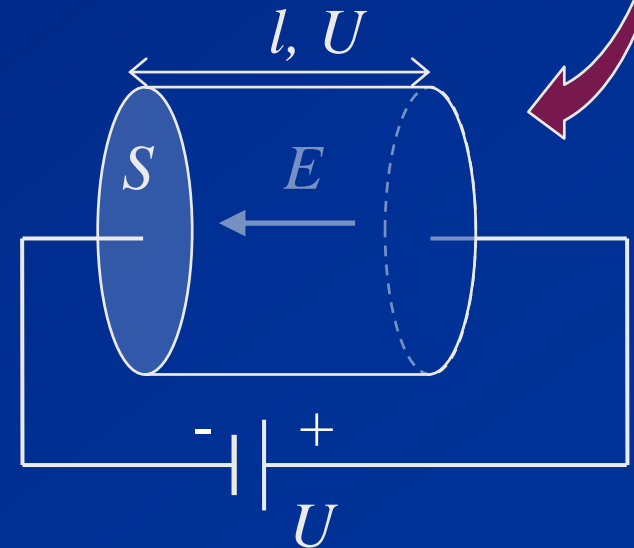
ρ, σ ...měrný odpor, vodivost, - koeficient charakteristický pro daný materiál, udává kvalitu materiálu z hlediska vedení proudu (má mikroskopický původ!)

pro celkový proud elementem I

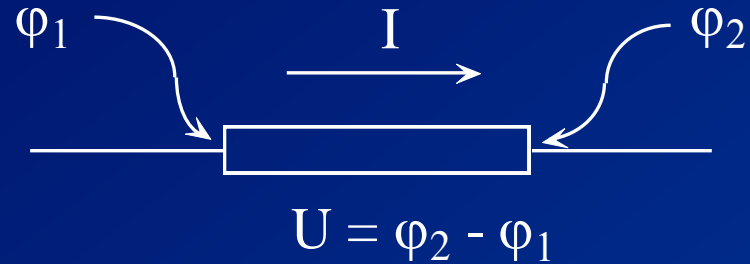
$$I = S \cdot i = \frac{U}{\rho \frac{l}{S}} \Rightarrow I = \frac{U}{R}$$

Kde R je rezistance daného elementu

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



Rezistance a rezistory



- Každé situaci, kdy jistým elementem protéká při určitém napětí určitý proud, můžeme přiřadit určitou rezistanci
 $R = U/I$ [Ω] *Ohm*
- Rezistance může ale obecně **záviset** na napětí, proudu a řadě jiných faktorů jako teplota.
- Pokud má existovat ve vodiči gradient potenciálu, musí jím protékat proud.

Elektrické zdroje

$$U = R \cdot I$$

- Abychom udrželi **konstantní proud**, například ve vodivé tyčce o odporu R , musíme udržet **konstantní elektrické pole**, které se snaží přivést náboje v tyčce k rovnováze. To je ekvivalentní udržování **konstantního rozdílu potenciálu neboli napětí** mezi konci tyčky.
- K tomu potřebujeme elektrický **zdroj** napětí, který je podobný kondenzátoru. Musí však obsahovat mechanismus, který **doplňuje náboje odvedené z jednotlivých elektrod**, aby napětí mezi nimi zůstalo zachováno.

vs. SUPRAVODIČE



Elektrický zdroj – práce a výkon

- musí obsahovat **síly neelektrické/elektrické** povahy, které ho **dobíjí**. Musí přenášet kladný náboj ze záporné elektrody na kladnou (nebo naopak). Protože je mezi nimi napětí, konají tak **práci = pumpa na elektrony**

$$dW = U \cdot dQ = U \cdot I \cdot dt$$

- musí vynakládat práci určitou **rychlostí**, takže elektrický zdroj dodává do obvodu určitý **výkon**

$$P = dW/dt = U \cdot I$$

- Tam se výkon může transformovat na jiné formy, jako výkon tepelný, světelný nebo mechanický.

Reálný elektrický zdroj - akumulátor

- Existují speciální zdroje – **akumulátory** (zdrojem energie je **chemická reakce**). Jejich vlastnosti jsou velmi podobné kondenzátorům, ale pracují při (téměř) **konstantním napětí**.
- Proto potenciální energie **akumulátoru** nabitého nábojem Q na napětí U je :
 $E_p = QU$ a **ne** $QU^2/2$, jak by tomu bylo u kondenzátoru.
- Tyto zdroje mají udanou tzv. kapacitu nejčastěji v Ah (3600*Coulombech) - náboj **nezaleží** jako u kondenzátoru na napětí jelikož napětí je dáno napětím článku
- Dobíjecí: Ni-Cd, NiMH, Li-ion, Li-pol, Ni-Fe, Pb-PbO₂....
- Nedobíjecí: Zn-MnO₂,

Suchý zinkový článek +C/NH₄Cl (MnO₂)/Zn -

- Celkový zápis:



Děj na kladné katodě – **odebírání elektronů**:



Děj na záporné anodě – **uvolňuje elektrony**:



- Následné děje - pohlcování plynů:



Reálný elektrický zdroj

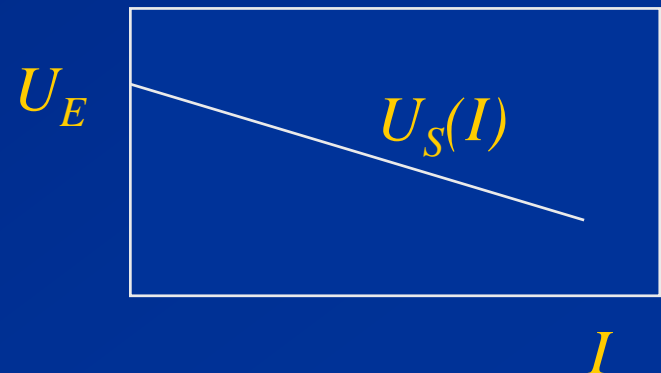
Reálné zdroje mají obvykle vnitřní odpor.

Svorkové napětí U_S takového zdroje je následkem toho lineárně závislé na proudu :

$$U_S(I) = U_E - R_i \cdot I$$

Svorkové napětí U_S je rovno elektromotorickému U_E jen při nulovém odebíraném proudu I , s rostoucím proudem klesá

vs. NAPĚTÍ V SÍTI



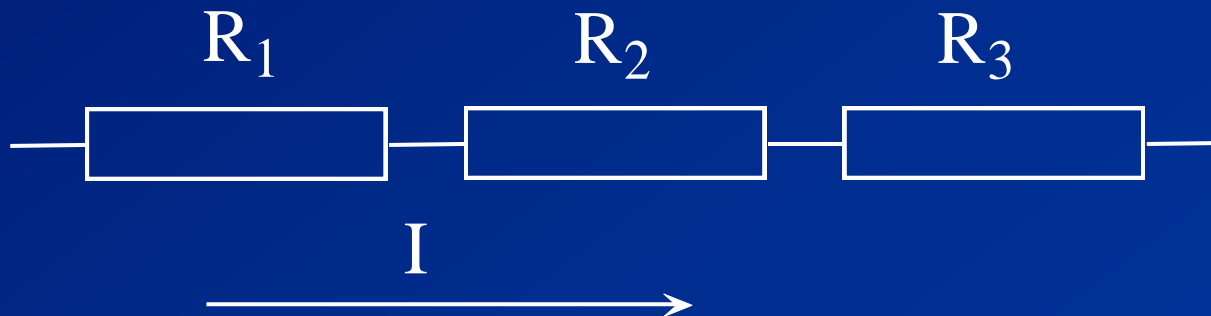
Seriové zapojení rezistorů

Rezistory, zapojenými seriově, prochází stejný společný proud I .

Současně napětí na všech dohromady musí být součet napětí na rezistorech jednotlivých.

Seriové zapojení tedy můžeme nahradit jedním rezistorem, pro jehož rezistanci platí

$$U = U_1 + U_2 + \dots \implies R \cdot I = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + \dots \implies R = R_1 + R_2 + \dots$$

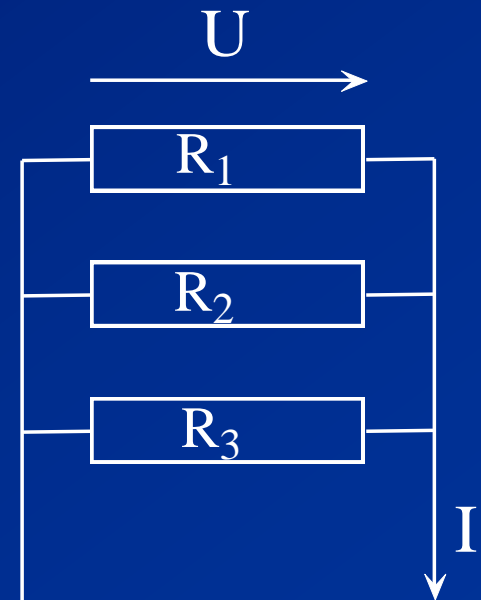


Paralelní zapojení rezistorů

Jsou-li rezistory zapojeny paralelně, je na každém stejné společné napětí U .

Současně se celkový proud dělí mezi ně a je tedy součtem proudů jednotlivými rezistory.

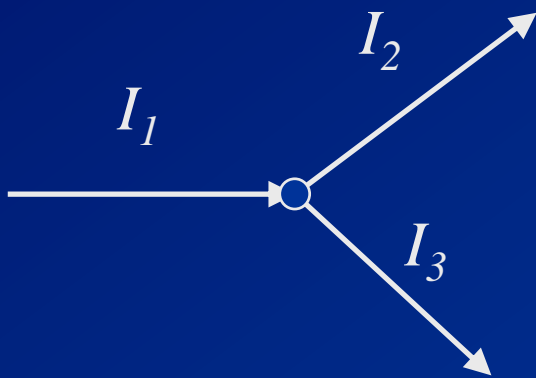
Paralelní zapojení tedy můžeme nahradit jedním rezistorem, pro jehož rezistanci platí



$$I = I_1 + I_2 + \dots \implies \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots \implies \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

Řešení obvodů – Kirchhoffovy zákony

První Kirchhoffův zákon, zákon pro uzly, říká, že součet proudů přitékajících do jistého uzlu se rovná součtu proudů z tohoto uzlu vytékajících. Je to zákon zachování náboje.



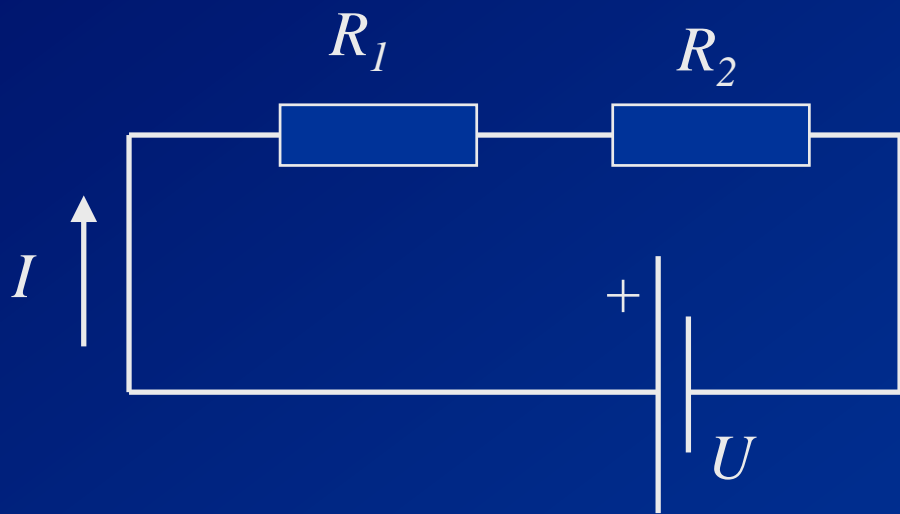
$$" \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = 0 "$$

nebo

$$I_1 = I_2 + I_3$$

Řešení obvodů – Kirchhoffovy zákony

Druhý Kirchhoffův zákon, říká, že **součet elektromotorických napětí v každé uzavřené smyčce se musí rovnat úbytku napětí na rezistorech v téže smyčce**. Je to zákon zachování energie



$$" \vec{U} + R_1 \vec{I} + R_2 \vec{I} = 0 "$$

nebo

$$U = R_1 I + R_2 I$$

příklad