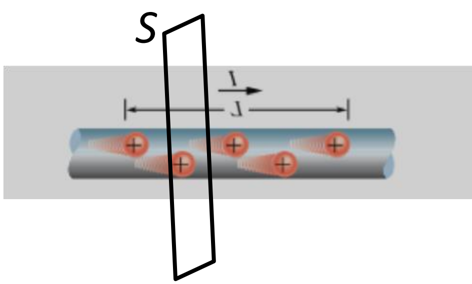
Stacionární elektrické pole
Elektrický proud

- stacionární = makroskopické veličiny nezávisí explicitně na čase.



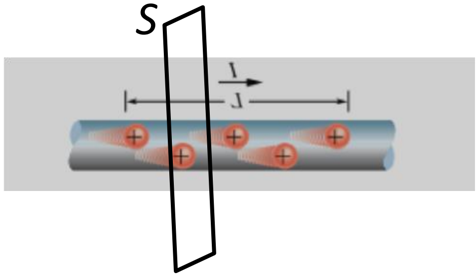
- Pohyb nositelů náboje - plochou S projde za čas Δt náboj ΔQ.
- Průměrný proud: $$I_{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$
- Okamžitý proud: $$I = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

- Množství náboje za čas T, nestacionární proud: $$Q = \int_0^T I(t)dt$$
- pro stacionární proud: $I(t) = konst: Q = IT$

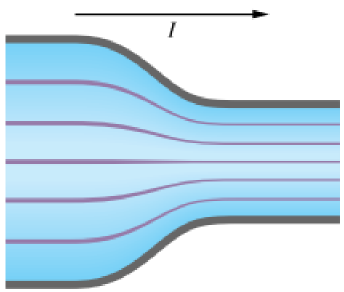
- Proud: skalární veličina - kladný náboj kladným směrem.
- $[I]$ = 1 A = 1 C/s

Proudová hustota

- ***j(r)*** - proudová hustota - vektorové pole definované v každém bodě plochy *S* - rozložení proudu na *S*



$$I_i = \int_0^{S_i} \boldsymbol{j} d\boldsymbol{S}$$



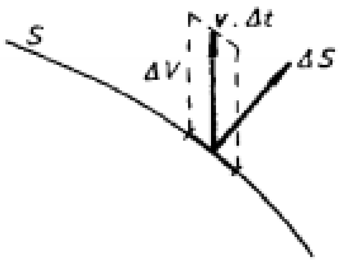
- Proudové čáry: tečna je $\boldsymbol{j}(\boldsymbol{r})$.
- Proudová trubice: část prostoru vymezená plochou tvořenou proudovými čarami.
- Povrch proudové trubice neprotíná žádná proudová čára.

- ***j***

- $\boldsymbol{j_S}(\boldsymbol{r})$ - plošný proud: pohyb náboje po ploše, který protéká nějakou křivkou v této ploše

Mechanismy vedení proudu

- **Volné proudy** - přemísťování volného náboje:
  - **Kondukční proudy** - pohyb volných nositelů v látkovém prostředí
  - **Konvekční proudy** - pohyb volných nositelů ve vakuu



- kladné a záporné náboje s hustotou ρ^{+}, resp. ρ^{-} s rychlostí v^{+}, resp. v^{-}.

$$\boldsymbol{j}_{+} = \rho_{+}\boldsymbol{v}_{+} \qquad \boldsymbol{j}_{-} = \rho_{-}\boldsymbol{v}_{-}$$

- celková hustota kondukčního proudu:

$$\boldsymbol{j} = \boldsymbol{j}_{+} + \boldsymbol{j}_{-} .$$

- pro : $\rho = |\rho+| = |\rho^{-}|$ a : $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_{+} - \boldsymbol{v}_{-}$ $\quad \boldsymbol{j} = \rho\boldsymbol{v}$
- ***v*** relativní rychlost obou nositelů náboje.

Mechanismy vedení proudu 2

- **Vázané proudy** - nedochází k pohybu náboje na makroskopické vzdálenosti
  - Polarizační proudy v dielektriku

$$I_P = \int_S \boldsymbol{j}_P . \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

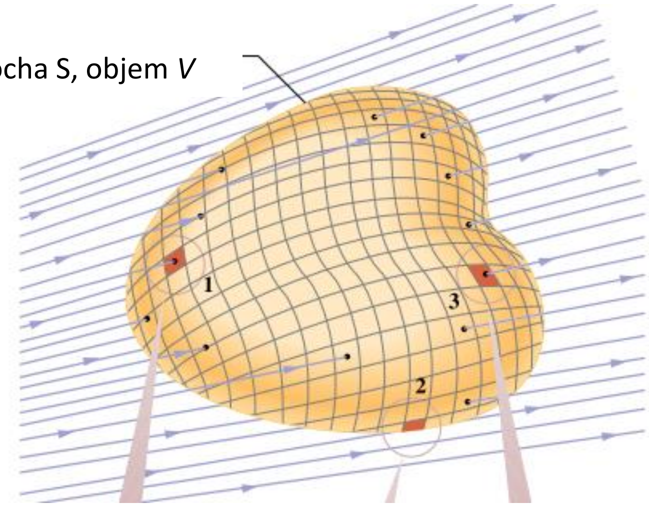
$$Q_P = \int_V \rho_P \,\mathrm{d}V = -\int_V \mathrm{div}\,\boldsymbol{P}\,\mathrm{d}V = -\int_S \boldsymbol{P}.\mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

$$I_P = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \boldsymbol{P}.\mathrm{d}\boldsymbol{S} = \int_S \frac{\partial \boldsymbol{P}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}.\mathrm{d}\boldsymbol{S}.$$

  - Hustota polarizační proudu: $\boldsymbol{j}_P = \dfrac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial t}$

  - Celkový proud - superpozice mechanismů
  - $\boldsymbol{j}_P$ nepřispívá k celkovému stacionárnímu proudu - nemůže být časově nezávislá.

Rovnice kontinuity



- Pp.: objem *V* ohraničený plochou *S*
- vytéká proud *I*
- úbytek náboje uzavřeného v *S*: -Δ*Q*
- Rovnice kontinuity v integrálním tvaru:

(*Q*(*t*) je množství náboje uzavřeného plochou *S*:

$$I + \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = 0$$

- Důsledek zákona zachování náboje.

$$\oint_S \boldsymbol{j} . \boldsymbol{dS}' + \frac{dQ}{dt} = 0 \qquad \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho \,\mathrm{d}V = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t}\mathrm{d}V$$

$$\Downarrow \qquad \swarrow$$

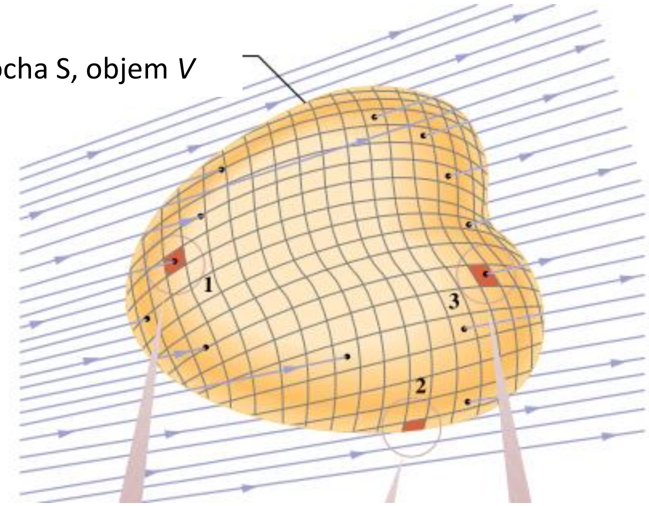
$$\boxed{\operatorname{div} \boldsymbol{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0.}$$

- Rovnice kontinuity v diferenciálním tvaru.

Pp.: nemáme plošné náboje a proudy.

Rovnice kontinuity

uzavřená plocha S, objem *V*



- Stacionární případ:

$$\oint_S \boldsymbol{j}.\mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0$$

$$\mathrm{div}\,\boldsymbol{j} = 0$$

- *I* je obecně celkový proud.
- Často se uvažuje pouze volný proud.

  Rovnice kontinuity je splněna, pokud se zachovává charakter nositelů náboje.

Stacionární elektrické pole

- Ve srovnání s elektrostatikou je přípustná existence makroskopického pohybu náboje - proudu
- Stacionární elektrické pole je potenciální a konzervativní.

$Q_C = Q + Q'$ $\quad$ Q_C, ρ_C celkový náboj $\quad$ $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 + \boldsymbol{E}'$

$\rho_C = \rho + \rho'$

$$\boxed{\varepsilon_0 \oint_S \boldsymbol{E}.d\boldsymbol{S} = Q + Q'} \qquad \boxed{\mathrm{div}\boldsymbol{E} = \frac{\rho_C}{\varepsilon_0}}$$

Obecný Gaussův zákon

$$\boxed{\varepsilon_0 \oint_S \varepsilon_r \boldsymbol{E}.d\boldsymbol{S} = \oint_S \boldsymbol{D}.d\boldsymbol{S} = Q} \qquad \boxed{\mathrm{div}\boldsymbol{D} = \rho}$$

Gaussův zákon pro dielektrikum explicitně jen volný náboj

$$Q' = \int_V \rho_v(\boldsymbol{r}')dV = -\int_V \mathrm{div}\boldsymbol{P}\, dV = -\oint_S \boldsymbol{P}.d\boldsymbol{S}$$

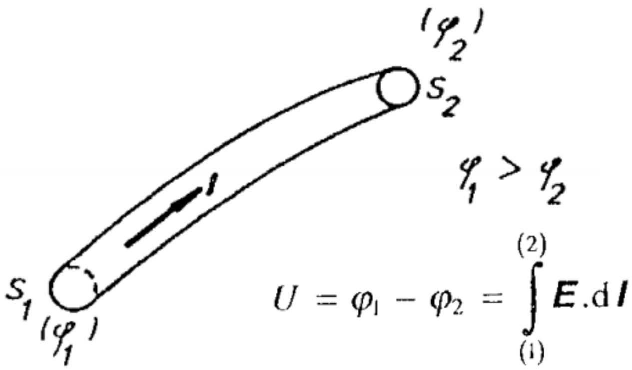
$$\boxed{\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \boldsymbol{E} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}} \qquad \boxed{\boldsymbol{P} = \varepsilon_0 \chi_e \boldsymbol{E}}$$

pro elektricky měkká prostředí

Stac. el. pole je konzervativní = potenciálové

$$\boxed{\oint_l \boldsymbol{E}.d\boldsymbol{l} = 0} \qquad \boxed{\mathrm{rot}\boldsymbol{E} = 0} \qquad \boxed{\boldsymbol{E} = -\mathbf{grad}\,\varphi}$$

Ohmův zákon pro homogenní vodiče



- Okamžitý proud I tekoucí vodičem je úměrný okamžité hodnotě spádu potenciálu U na tomto vodiči.
- O.z. v integrálním tvaru:

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

- *R* je elektrický odpor vodiče (rezistance).
- Závisí na tvaru vodiče a materiálu.
- Měrný odpor (specifický odpor, rezistivita) ρ_{R}: nezávisí na tvaru

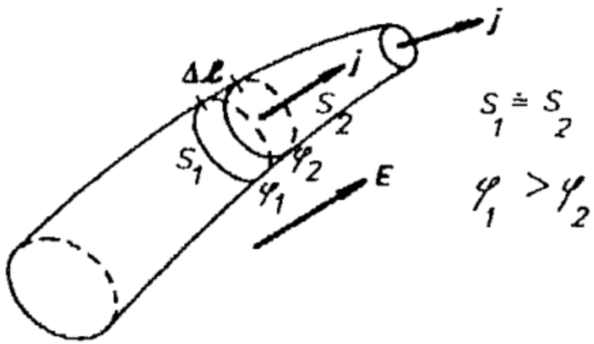
$$\boxed{R = \rho_R \frac{l}{S}}$$

- Vodivost G, měrná vodivost (konduktivita) γ.

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

$$\boxed{\gamma = \frac{1}{\rho_R}}$$

Ohmův zákon pro homogenní vodiče 2



$$\boldsymbol{I = j \, . \, S} \qquad \Delta U = \varphi_1 - \varphi_2 = \boldsymbol{E} . \Delta \boldsymbol{l}$$

$$R = \rho_R \frac{\Delta l}{S} \qquad I = \frac{\Delta U}{R}$$

- O.z. v diferenciálním tvaru:

$$\boxed{\boldsymbol{j} = \gamma \boldsymbol{E}}$$

$[R] = \Omega$

$[\rho_R] = \Omega$.m

$[G] = \Omega^{-1} = S$ Siemens

$[\gamma] = (\Omega . \mathrm{m})^{-1}$

- O. z. je materiálový vztah.
- Linearita je aproximace, např. pro kovy platí ve velmi širokém rozsahu.
- V lineárním, izotropním a homogenním vodiči je ***j***||***E.***
- Vodivost je obecně v anizotropním prostředí je tensor.

Ohmův zákon pro homogenní vodiče 3

- V lineárním homogenním vodiči protékaném stacionárním proudem je hustota vázaného i volného náboje nulová.

$$\boxed{\rho = \mathrm{div}\boldsymbol{D} = \varepsilon \mathrm{div}\boldsymbol{E} = \frac{\varepsilon}{\gamma}\mathrm{div}\boldsymbol{j} = \boldsymbol{0}}$$

$$\boxed{\boldsymbol{j} = \gamma \boldsymbol{E}}$$

$$\boxed{\mathrm{div}\,\boldsymbol{j} = 0}$$

$$\boxed{\rho_P = -\mathrm{div}\boldsymbol{P} = \chi_e \mathrm{div}\boldsymbol{E} = \frac{\chi_e}{\gamma}\mathrm{div}\boldsymbol{j} = \boldsymbol{0}}$$

- Tohle je v podstatě sporné tvrzení. Nemáme-li volný náboj $\Rightarrow$ nemáme nosiče proudu $\Rightarrow$ $\boldsymbol{j} = 0$.
- Vyplývá z kolize předpokladů, povolujících proud (jako náboj prošlý plochou za jednotku času) a požadavek neměnnosti hustoty náboje ve vodiči. Ve homogenním vodiči nemůže trvale působit konstantní pole ***E***.
- Důsledkem by byla změna rozložení nábojů, změna proudu a změna pole ......

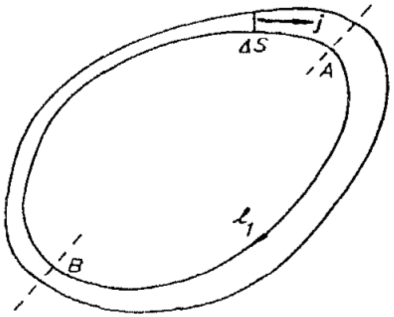
Ohmův zákon pro nehomogenní vodiče

- Proudové čáry jsou vždy uzavřené křivky (nositelé náboje se musí pohybovat po uzavřených drahách) - pro konečné soustavy.
- Takový stacionární proud nemůže být vyvolán elektrickým statickým anebo stacionárním polem - pole jsou potenciálová.
- Musí existovat nepotenciálová elektrická pole působící na náboje.
- Nehomogenní vodiče - neplatí Ohmův zákon.
- Zobecnění:
- ***E**** - vtištěná (elektromotorická) intenzita

$$\boxed{\boldsymbol{j} = \gamma(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{E}^*)}$$

- zobecněný Ohmův zákon, dif. tvar

Ohmův zákon pro nehomogenní vodiče 2



$$\boxed{\boldsymbol{j} = \gamma(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{E}^*)}$$

$$\int_{(A)}^{(B)} \frac{\boldsymbol{j}}{\gamma}.\mathrm{d}\boldsymbol{l} = \underbrace{\int_{(A)}^{(B)} \boldsymbol{E}.\mathrm{d}\boldsymbol{l}}_{U_{AB}} + \underbrace{\int_{(A)}^{(B)} \boldsymbol{E}^*.\mathrm{d}\boldsymbol{l}}_{\mathcal{E}_{AB}}$$

- Elektromotorické napětí

$$\int_{(A)}^{(B)} \frac{\boldsymbol{j}}{\gamma}.\mathrm{d}\boldsymbol{l} = \int_{(A)}^{(B)} \frac{j}{\gamma}\mathrm{d}l = I \underbrace{\int_{(A)}^{(B)} \frac{\mathrm{d}l}{\gamma \Delta S}}_{R}$$

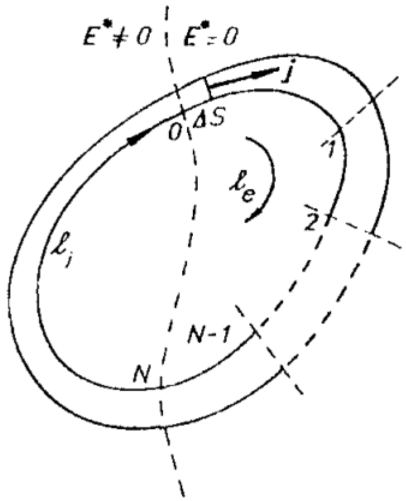
$$\boxed{I = \frac{1}{R}(U_{AB} + \varepsilon_{AB})}$$

- Integrální tvar O. z. pro danou část vodiče

- Pokud provedeme integraci přes celou uzavřenou křivku:
  (R_c celkový odpor)
  O. z. pro uzavřený obvod.

$$\boxed{I = \frac{\varepsilon}{R_C}}$$

Ohmův zákon pro nehomogenní vodiče 3



- Pp. vtištěná síla působí je na části l_i.
- Část l_e je tvořena homogenním vodičem.
- Elektrický obvod, složený z pasivních homogenních vodičů a jednak ze zdrojů elektromotorického napětí.

$$\int_{(A)}^{(B)} \frac{\boldsymbol{j}}{\gamma} . \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \int_{(A)}^{(B)} \frac{j}{\gamma} \mathrm{d}l = I \underbrace{\int_{(A)}^{(B)} \frac{\mathrm{d}l}{\gamma \Delta S}}_{R_i}$$

$$IR_i = \int_{l_i} \boldsymbol{E}.\boldsymbol{dl} + \mathcal{E}$$

$$\int_{l_e} \boldsymbol{E}.\boldsymbol{dl} = U_0$$

- U_0 - svorkové napětí

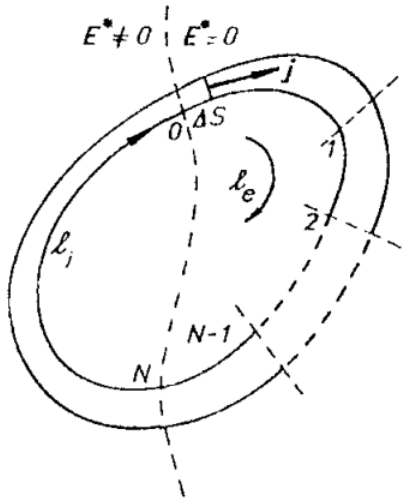
- Protože platí:

$$\int_{l_i} \boldsymbol{E}.\boldsymbol{dl} + \int_{l_e} \boldsymbol{E}.\boldsymbol{dl} = 0$$

$$\boxed{\mathcal{E} - IR_i = U_0}$$

- Svorkové napětí je menší než elektromotorické.

Ohmův zákon pro nehomogenní vodiče 4



- Bez odběru proudu ze zdroje platí rovnováha ***E*** = -***E****
- Při odběru proudu poklesne ***E***, poruší se rovnováha a náboje jsou doplňovány v působením vtištěné intenzity.
- Integrál přes uzavřenou proudovou čáru:

$$I\int_{l_i}\frac{\mathrm{d}l}{\gamma\Delta S}+\underbrace{I\int_{l_e}\frac{\mathrm{d}l}{\gamma\Delta S}}_{R_e}=\int_{l_i}\boldsymbol{E}^{*}.\,\mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

$$\boxed{\mathcal{E}=IR_i+IR_e}$$

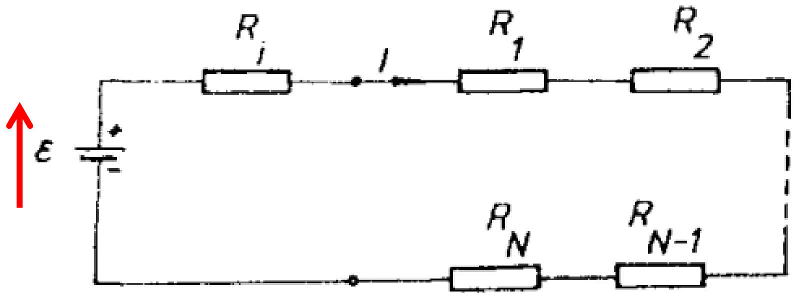
- Homogenní část lze rozdělit na *N* částí

$$\boxed{R_e=R_{e1}+R_{e2}+..+R_{eN}}$$

$$\boxed{\mathcal{E}=IR_i+IR_{e1}+IR_{e2}+..+IR_{eN}}$$

- Součet úbytků napětí na všech odporech obvodu je roven celkovému elektromotorickému napětí $\mathcal{E}$.

Elektrický obvod

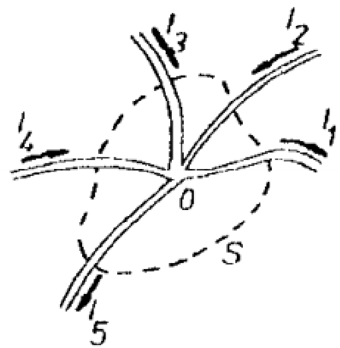


- Plášť proudové trubice souhlasí s povrchem vodičů.
- Schématické zobrazení

- Odpor (rezistor): norma ISO 
- americká norma: 

- Označen směr vtištěné síly - směr, kterým se uvnitř zdroje pohybují kladné náboje.
- (V elektrotechnice by šipka na zdroji byla opačná - pokles potenciálu)

Řešení složitých stacionárních obvodů

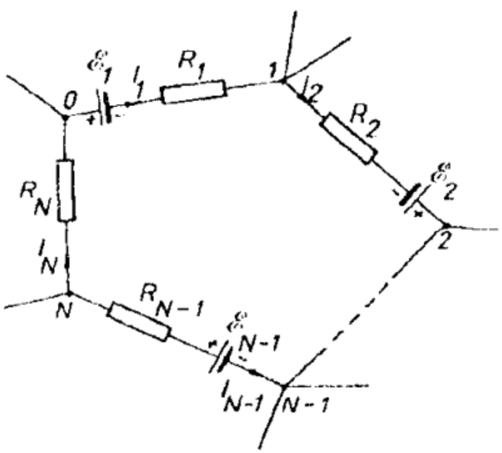


- **<u>I. Kirchhoffovo pravidlo</u>**

Celkový stacionární proud vytékající z libovolného uzlu je roven 0.

$$I_1 + I_2 + \ldots + I_N = 0$$

- Vyplývá z rovnice kontinuity.



- **<u>II. Kirchhoffovo pravidlo</u>**

Součet úbytků napětí na všech odporech ve smyčce je roven celkovému elektromotorickému napětí $\mathcal{E}$ působícímu ve smyčce.

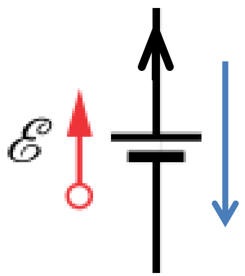
- Vychází z Ohmova zákona.
- Integrace podél smyčky:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \ldots + \mathcal{E}_N \qquad U_1 = R_1 I_1, \ldots, U_N = R_N I_N$$

$$\boxed{\mathcal{E} = U_1 + U_2 + \ldots + U_N}$$

- Volba směru integrace je libovolná - $\mathcal{E}$, U_i mohou být kladné i záporné podle směru proudu ve větvi a směru intenzity vtištěné síly

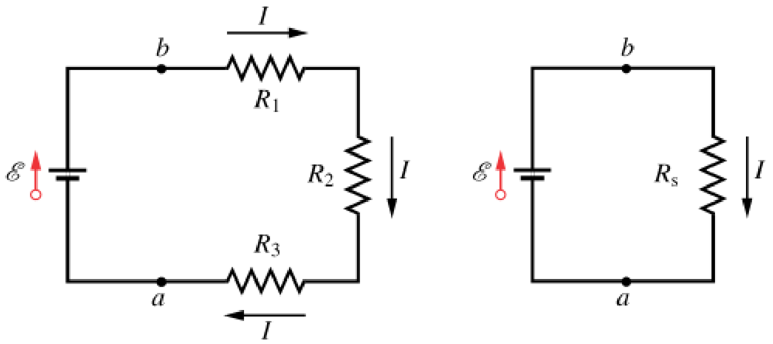
Obvody - znaménko u zdroje



- Směr elektromotorické síly - nutno brát záporně (Walker, Resnick, Halliday)
- Anebo nakreslit šipku + $\rightarrow$ -, a brát kladně
- obojí při „kladném“ průchodu smyčkou

$$U_1 + U_2 + \ldots + U_N - \mathcal{E} = 0$$

Sériové zapojení rezistorů



- Rezistory prochází stejný proud.
- Celkové přiložené napětí je rovno součtu úbytků napětí na rezistorech.

$$\mathscr{E} - IR_1 - IR_2 - IR_3 = 0,$$

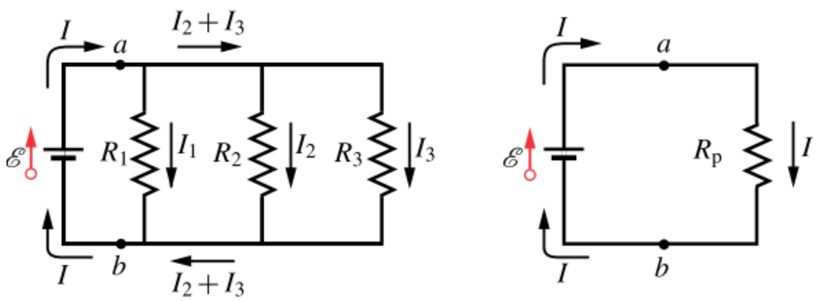
$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_s}$$

$$\boxed{R_s = R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_s = \sum_{j=1}^{n} R_j \quad (n \text{ rezistorů zapojených sériově}).$$

Paralelní zapojení rezistorů



- Napětí na rezistorech stejné.
- Celkový proud je roven součtu proudu ve větvích.

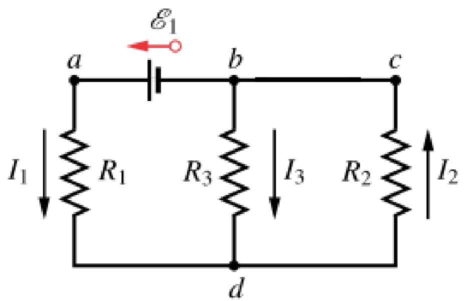
$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)$$

$$I = \frac{U}{R_p} \qquad \boxed{\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

$$\frac{1}{R_p} = \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{R_j} \quad \text{(}n\text{ rezistorů zapojených paralelně).}$$

Obvody - metoda nezávislých smyček (obvodových proudů)



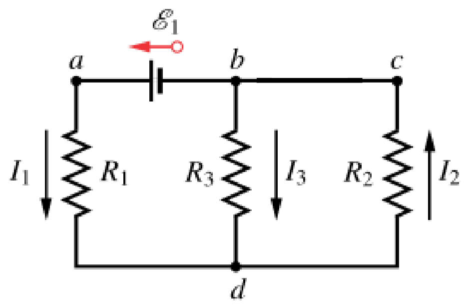
- Skutečný počet nezávislých rovnic podle Kirchhoffových pravidel???
- El. obvod = graf - ***u*** uzlů, ***v*** větví.

- Počet nezávislých uzlů: **(*u* - 1)** $\Rightarrow$ automaticky máme zahrnuto **(*u* - 1)** rovnic podle I. K. p.
  (přesněji: odečítáme počet galvanicky oddělených částí sítě, **-1** pokud je celá síť galvanicky propojena)
- Počet nezávislých větví: ***s*** = ***v*** - **(*u* - 1)** $\Rightarrow$ ***s*** rovnic podle II. K. p.
- Proudy nezávislými smyčkami jsou nezávislé - proud společnou větví je **superpozicí** proudů nezávislými smyčkami, jejichž je větev součástí.
- Prochází-li smyčkový proud zdrojem proudu, je přímo roven tomuto proudu. Máme-li tedy obvod, kde se zdroj proudu vyskytuje, je vhodné jeden ze smyčkových proudů (a jenom jeden) vést tímto zdrojem. Zredukujeme tak počet potřebných rovnic.

Obvody - metoda nezávislých smyček (obvodových proudů)

- Jiné metody určení počtu nezávislých větví ***s:***
- **metoda úplného stromu:** vytvoříme tzv. úplný strom, tj. podmnožinu sítě s následujícími vlastnostmi:
  (a) všechny uzly původní sítě jsou propojeny větvemi úplného stromu,
  (b) vlastnost (a) se ztrácí po vyjmutí libovolné větve úplného stromu.
  Počet větví, které musíme k úplnému stromu dodat, abychom dostali původní síť je pak roven počtu nezávislých smyček.
- **grafická metoda**: schéma obvodu překreslíme do roviny tak, aby nedocházelo ke křížení spojovacích vodičů bez vodivého spojení (tj. vodiče se mohou křížit jenom v uzlu). Pak počet nezávislých smyček je dán počtem "okének" v rovině nákresu, která jsou ohraničena větvemi sítě.

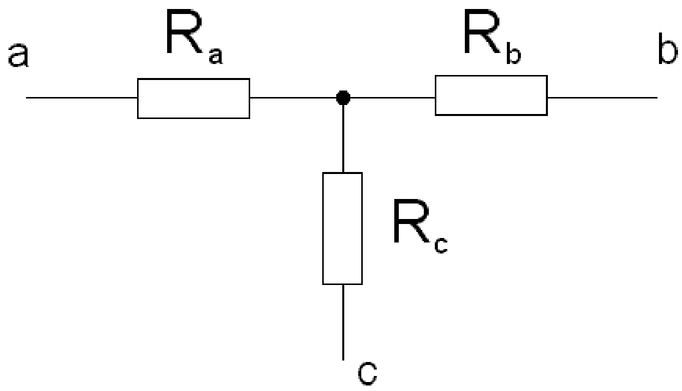
Obvody - metoda uzlových napětí

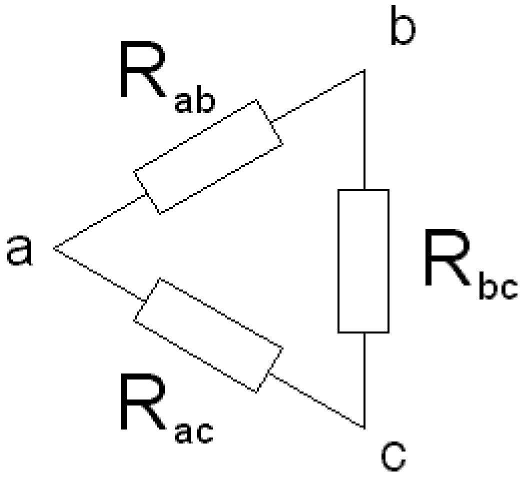


- Zvolíme si referenční uzel s potenciálem $\varphi_{ref} = 0$.
- Ostatní uzly jsou nezávislé, je na nich potenciál $\varphi_i - \varphi_{ref}$.
- Máme-li několik galvanicky oddělených částí, musíme vybrat referenční uzel v každé části sítě.
- Takto stanovená napětí automaticky splňují II. K. p.
- Vyjádříme proudy ve větvích podle Ohmova zákona
- Aplikujeme I. K. p.

Obvody - další možnosti zjednodušení

- Záměna hvězda - trojúhelník





- Odpor strany trojúhelníka je roven součtu 3 možných součinů odporů větví hvězdy dělenému odporem protilehlé strany hvězdy.

$$R_{ab} = (R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a)/R_c$$

- Odpor větve hvězdy je roven součinu odporů asociovaných větví trojúhelníka (větví, které mají společný stejný vrchol) děleném součtem odporů všech tří stran trojúhelníka.

$$R_a = R_{ab} R_{ca}/(R_{ab} + R_{bc} + R_{ca})$$

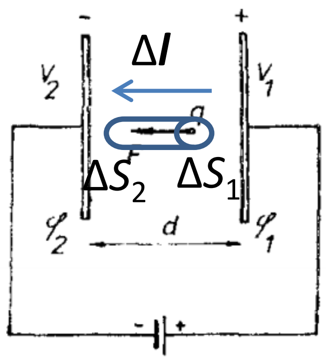
Obvody - další možnosti zjednodušení

- Mějme lineární síť, ve které je jenom jeden zdroj napětí, ostatní prvky jsou pasivní; předpokládejme, že zdroj je zapojen v k-té větvi. Studujme nyní proud v l-té větvi sítě.
  Věta o reciprocitě: stejný proud, jaký vyvolá zdroj v l-té větvi, vyvolá tentýž zdroj v k-té větvi, zapojíme-li ho do l-té větve (a svorky zdroje v k-té větvi spojíme nakrátko).

- **Propojovací pravidlo:**
  Mějme symetrickou síť, z jejíhož schématu je na první pohled evidentní, že v ní existuje alespoň jedna dvojice uzlů, které jsou na stejném potenciálu.
  Pak se **poměry v síti nezmění, propojíme-li tyto dva uzly zkratem**.

- **Příklady:** *D. Slavínská a kol.: Sbírka úloh z elektřiny a magnetismu, MFF UK*

Práce a výkon pro konvekční proud



- Mezi elektrodami napětí $U = \varphi_1 - \varphi_2 = \boldsymbol{E}.\Delta\boldsymbol{l}$
- Síla na částici s nábojem *q*: *F* = *qE*
- Získá kinetickou energii (rovnou ztrátě potenciální energie) na dráze *d*: *W* = *qU*
- Energii odevzdá při nárazu na elektrodu.
- Výkon dodávaný zdrojem elektrického pole:

$$N = UI$$

- **<u>Diferenciální forma vztahu:</u>**
- Pp. úzká proudová trubice ΔS_1, ΔS_2

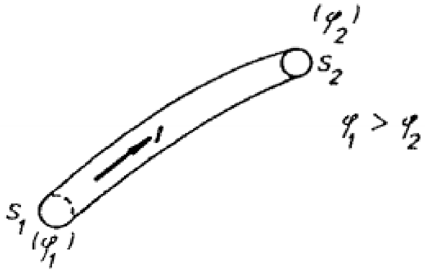
$$\Delta U = \boldsymbol{E}.\Delta\boldsymbol{l} \qquad \Delta W = \Delta Q(\boldsymbol{E}.\Delta\boldsymbol{l}) \qquad \Delta Q = \Delta t(\boldsymbol{j}.\Delta S)$$

$$(\boldsymbol{j}.\Delta\boldsymbol{S})(\boldsymbol{E}.\Delta\boldsymbol{l})\Delta t = (\boldsymbol{j}.\boldsymbol{E})(\Delta\boldsymbol{S}.\Delta\boldsymbol{l})\Delta t$$

$$\boxed{n = \boldsymbol{j}.\boldsymbol{E}}$$

- Hustota výkonu elektrického pole

Práce a výkon pro kondukční proud



- Mezi elektrodami napětí $U = \varphi_1 - \varphi_2 = \boldsymbol{E}.\Delta \boldsymbol{l}$
- S_1, S_2 - ekvipotenciální plochy

- Joulův zákon:
  Ve vodiči protékaném proudem vzniká (Jouleovo) teplo.
- Tepelný výkon:
  v integrálním tvaru:
  $$\boxed{N = UI = \frac{U^2}{R} = RI^2}$$
- v diferenciálním tvaru:
  $$\boxed{n = \boldsymbol{j}.\boldsymbol{E} = \gamma E^2 = \frac{j^2}{\gamma}}$$

- **<u>Konvekční vs. kondukční proud</u>**
- u konvekčního proudu není odpor a tedy nevzniká Jouleovo teplo

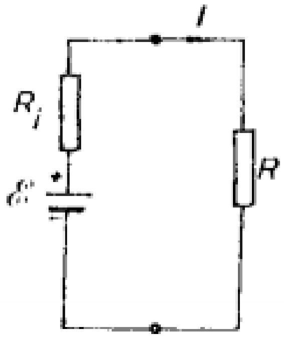
Práce a výkon v elektrickém obvodu

$$\boxed{R_i I^2 + R_e I^2 = \mathcal{E} I}$$

- Levá strana vyjadřuje Jouleovou teplo vznikající na odporech.
- $N_z = \mathcal{E} I$ - výkon dodávaný do obvodu zdrojem
- $n_z = \boldsymbol{j}.\boldsymbol{E}^*$ - hustota výkonu

- Do obvodu je dodávána energie výhradně prací vtištěných sil.
- Ta je konána na úkor jiných forem energie.

Výkonové přizpůsobení spotřebiče

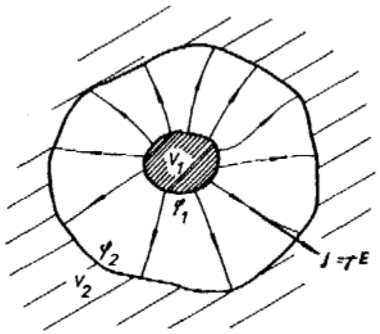


- Ke zdroji s vnitřním odporem R_i je připojen spotřebič s odporem R.
- Výkon dodávaný zdrojem:

$$N(R) = RI^2 = \frac{R}{(R + R_i)^2}\mathscr{E}^2$$

- Maximum pro $R = R_i$, tj. spotřebič je výkonově přizpůsoben zdroji.

Vztah odporu a kapacity kondenzátoru s dielektrikem



- Vodič o objemu V_1 je obklopen vodičem o objemu V_2, mezi nimi je dielektrikum s permitivitou ε a vodivostí γ.
- Na vodiče jsou přivedeny náboje stejné velikosti a opačného znaménka Q.

$$Q = CU$$

- Gaussův zákon:

$$Q = \int \boldsymbol{D}.\mathrm{d}\boldsymbol{S} = \varepsilon \int \boldsymbol{E}.\mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

- Proud:

$$I = \int_S \boldsymbol{j}.\mathrm{d}\boldsymbol{S} = \gamma \int_S \boldsymbol{E}.\mathrm{d}\boldsymbol{S}.$$

$$R = \frac{\varepsilon}{\gamma C}$$

- Lze využít vztahy specifické jen pro stacionární pole, tak vztahy platné též pro elektrostatiku.