3.2. Elektrický proud v kovových vodičích

Kapitola 3.1. byla bez výhrad věnována popisu elektrických nábojů v klidu, nyní se budeme zabývat pohybujícími se nabitými částicemi.

3.2.1. Základní pojmy

Elektrický proud je znám z každodenního života, přesto je velmi důležité umět tento pojem vnímat jak pro označení „jevu“ **(kap. 3.2.1)**, tak jako fyzikální veličinu, která tento jev kvantitativně popisuje **(kap. 3.2.2)**.

Elektrický proud jako **jev** charakterizuje jednu z forem fyzikálního pohybu, kterou je **uspořádaný pohyb elektricky nabitých částic** v látce. Přestože jakýkoliv elektrický proud je vždy tvořen pohybujícími se náboji, nemusí všechny pohybující se náboje vytvářet elektrický proud.

Ve vodiči dochází ke vzniku trvalého elektrického proudu za těchto podmínek:

- vodič se musí nacházet v trvalém elektrickém poli, což je realizováno pomocí tzv. **zdroje** (generátoru) elektrického napětí
- ve vodiči musí být přítomny **volné nosiče** elektrického náboje

Podle charakteru vnějšího elektrického pole lze rozlišit tři základní druhy proudů:
a) **stejnosměrný** proud vzniká tehdy, jestliže má intenzita elektrického pole konstantní orientaci,
b) **střídavý** proud ve vodiči vytváří vnější elektrické pole, jehož intenzita periodicky mění svou orientaci na opačnou,
c) **stacionární** stejnosměrný proud vzniká ve vodiči, je-li intenzita elektrického pole konstantní co do velikosti, směru i orientace.

Nabité částice představující volný náboj ve vodičích jsou v neustálém chaotickém tepelném pohybu (viz modul 2 - molekulová fyzika a termodynamika). jedná se o mikroskopický pohyb, který nemá za následek makroskopicky pozorovatelné přemístění náboje. Pokud ve vodiči vytvoříme elektrické pole, tepelný pohyb nabitých částic neustane, ale k náhodné složce rychlosti přibude ještě složka rychlosti ve směru vloženého pole.

Při studiu elektrického proudu v kovových vodičích se zabýváme **ustálenými proud**y vodivostních elektronů, které v kovu vytváří tzv. elektronový plyn. Tyto vodivostní elektrony jsou téměř volné a pohybují se v poli kladných iontů uspořádaných v krystalové mřížce.

3.2.2. Elektrický proud

1. Umět rozlišit pojem „elektrický proud“ a veličinu „elektrický proud“
2. Definovat průměrný i okamžitý elektrický proud, včetně jednotky.
3. Znát dohodu o technickém směru proudu.
4. Charakterizovat driftovou rychlost.
5. Definovat proudovou hustotu včetně jednotky.
6. Vyjmenovat a popsat druhy elektrického proudu.

Elektrický proud je také skalární **fyzikální veličina** ozn. *I*., jejíž jednotkou je základní jednotka soustavy SI: ampér – A. V této soustavě jednotek je ampér definován na základě silových účinků mezi dvěma vodiči, kterými prochází elektrický proud. Tato síla je magnetického původu, avšak magnetické pole vzniká jako důsledek pohybu elektrického náboje. S definicí této jednotky se tedy setkáme v kapitole o magnetickém poli 3.6.

Připojíme-li vodič ke zdroji elektrického napětí, elektrické pole uvnitř působí elektrickou silou na vodivostní elektrony, vyvolává jejich pohyb a tím vytváří elektrický proud, který je po krátké době stacionární (ustálený, nezávislý na čase). Jestliže vodičem projde náboj ΔQ resp. dQ za časový interval Δt resp. dt, lze definovat průměrný resp. okamžitý proud ve vodiči:

a) **průměrný** elektrický proud:

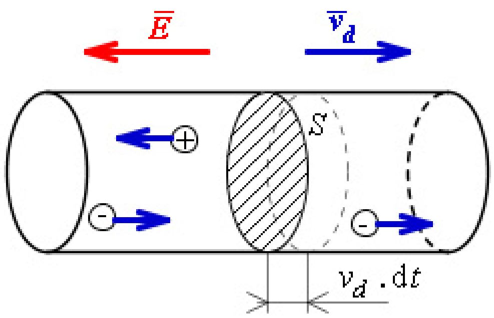
$$I_P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad 3.2.\text{-}1$$

b) **okamžitý** elektrický proud (který je limitním případem proudu průměrného, studujeme-li množství náboje, které projde průřezem vodiče za infinitezimální (nekonečně krátký) časový interval):

$$I = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} \qquad 3.2.\text{-}2$$

V ustáleném stavu protéká všemi průřezy vodiče stejně velký proud.

Technický směr elektrického proudu je směr pohybu kladného náboje, což bylo stanoveno dohodou, neboť účinek pohybu kladného náboje jedním směrem je identický s účinkem pohybu záporného náboje směrem opačným! Znázornění směru pohybu kladných a záporných nábojů uvnitř vodiče je zřejmé z následujícího obrázku 3.2.-1, kde je současně vyznačen technický směr proudu a směr vektoru intenzity vnějšího elektrického pole.



Obr. 3.2.-1.

Volné nosiče náboje v kovovém vodiči, tzv.vodivostní elektrony se však uvnitř vodiče pohybují po obecně křivočaré trajektorii. Tento pohyb je chaotický a je dán srážkami s ionty či atomy tvořícími krystalovou mřížku vodiče. Přesto má tento pohyb jeden převládající směr, který je opačný ke směru intenzity elektrického pole. Průměrnou rychlost tohoto pohybu nazýváme rychlostí **driftovou (unášivou)** $\boldsymbol{v_D}$. Driftová rychlost je ve srovnání s rychlostí chaotického pohybu nepatrná.

Elektrický proud je přímo úměrný driftové rychlosti, což lze vyjádřit ve tvaru:

$$I = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = nev_d S, \qquad 3.2.\text{-}3$$

kde $\mathrm{d}Q = Snev_d\,\mathrm{d}t$ je celkový náboj, který projde průřezem vodiče S za dobu dt, je-li náboj elektronu e a počet volných elektronů v objemové jednotce n. Množství volných elektronů, které se nacházejí v jednotce objemu vodiče lze taktéž označit jako „**koncentraci nosičů náboje**“.

Součin *ne* ve vztahu 3.2.-3 je vyjadřuje **objemovou hustotu náboje**, což je zřejmé rovněž z jednotky, která přímo vyplývá z tohoto vztahu: $\mathrm{C.m^{-3}}$. Pro kladné nosiče náboje je hustota náboje kladná, pro záporné náboje je záporná.

Veličina elektrický proud popisuje úhrnný proud v celém vodiči. Aby bylo možné charakterizovat tok elektrického náboje v určitém bodě uvnitř vodiče, zavádíme vektorovou veličinu, kterou je **hustota proudu *j*** (resp. proudová hustota).

Hustota proudu je vektorová veličina, jejíž velikost je rovna proudu, který prochází elementární ploškou dS průřezu vodiče kolmou na směr pohybu částic, dělenému velikostí této plošky. Definiční vztah pro tuto veličinu je tedy:

$$j = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S}, \qquad 3.2.\text{-}4$$

Směr a orientace proudové hustoty odpovídá pohybu **kladného** elektrického náboje.

Jednotkou proudové hustoty je $\mathrm{A.m^{-2}}$.

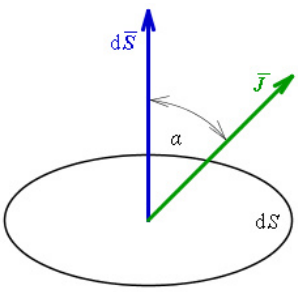
Kladné nosiče náboje se pohybují driftovou rychlostí ve směru přiloženého elektrického pole, přičemž stejnou orientaci má dle stanovené konvence také vektor proudové hustoty a v tomto směru taktéž uvažujeme o technickém směru proudu.
Vektorově lze tuto veličinu vyjádřit vztahem:

$$\boldsymbol{j} = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S}\boldsymbol{v_d^0} = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}\boldsymbol{S}} \qquad 3.2.\text{-}5$$

Skalárně:

$$j = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S}\cos\alpha, \qquad 3.2.\text{-}6$$

kde α představuje úhel svírající vektor proudové hustoty s normálou plošky (Obr. 3.2.-2).



Obr. 3.2.-2

Maximální hodnoty nabývá pravá strana rovnice tehdy, je-li cosα roven 1, což nastává v případě, kdy směr proud je rovnoběžný s vektorem **d*S*** (tedy s normálou plošky dS) . Je-li procházející proud v každém místě průřezu celého vodiče konstantní, lze vztah 3.2.-6 zjednodušit do tvaru:

$$j = \frac{I}{S} \qquad 3.2.\text{-}7$$

Elektrický proud jdoucí **konečnou plochou** S je tedy dán:

$$I = \int_S \boldsymbol{j} . \mathrm{d}\boldsymbol{S} \qquad 3.2.\text{-}8$$

Dosazením vztahu 3.2.-3 do rovnice 3.2.-5 lze získat vyjádření proudové hustoty v závislosti na driftové rychlosti vodivostních elektronů:

$$\boldsymbol{j} = ne\boldsymbol{v}_D \qquad 3.2.\text{-}9$$

Podle tvaru vodiče a průřezu, kterým náboje procházejí, rozlišujeme tři druhy proudové hustoty: **objemovou** (resp. prostorovou), **plošnou** (proudí-li náboj např. po povrchu vodiče) a **lineární** (u tzv. proudových vláken – lineárních vodičů).

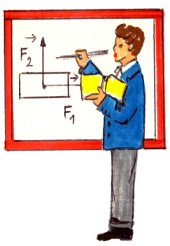
Elektrický proud lze dále rozdělit podle vzniku a jeho základních vlastností do tří skupin:

a) **Kondukční (resp.vodivostní**) elektrický proud, se kterým se lze setkat pouze ve vodičích (tedy kovech, polovodičích a elektrolytech) a v ionizovaných plynech. Tento způsob vedení proudu je spojen s makroskopickým pohybem náboje v látce, kdy dochází k přenosu náboje i látky, k vytváření magnetického pole ve vodiči a okolí a přeměně elektrické energie na teplo. Kondukční proud není obecně provázen makroskopickým pohybem látky.

b) **Konvekční** elektrický proud, který je podmíněn makroskopickým pohybem látky může vznikat jak ve vodičích tak i v izolantech. Konvekčním proudem je také pohyb nabitých částic ve vakuu (s využitím u elektronek, v urychlovačích, lze se s ním setkat i v kosmickém záření), je spojen s přenosem náboje, látky a vznikem magnetického pole. K vytváření tepla dochází až při dopadu nabité částice na překážku.

c) **Posuvný (resp. Maxwellův**) elektrický proud, jehož existence není vázaná na pohyb náboje, vzniká v důsledku časové změny vektoru elektrické indukce. V okolí se vždy vytváří magnetické pole.

KO 3.2.-1. Elektrický proud je skalární nebo vektorová veličina?
KO 3.2.-2. Jednotka elektrického proudu patří k základním nebo odvozeným jednotkám soustavy SI?
KO 3.2.-3. Technický směr proudu je stanoven dohodou, nebo se jedná o reálný výsledný tok náboje vodičem?
KO 3.2.-4. Rozdělte elektrický proud podle jeho základních vlastností do skupin.
KO 3.2.-5. Proudová hustota je veličina vektorová nebo skalární?
Vektorová.
KO 3.2.-6. Ve vztahu $j = \dfrac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S}\cos\alpha$ symbol α představuje úhel, který svírá vektor proudové hustoty s rovinou plošky průřezu vodiče?



Proud ve vodiči se mění v závislosti na čase podle rovnice I = 3+7t. Jaký náboj projde průřezem vodiče během třetí sekundy?

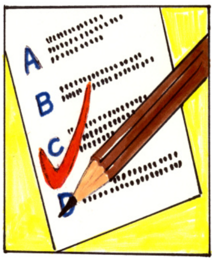
Vyjdeme z definiční rovnice elektrického proudu: $I = \dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}$.

Známe-li závislost proudu na čase, vyjádříme si závislost množství náboje, který projde vodičem (parametrem opět čas): $\mathrm{d}Q = I\,\mathrm{d}t$

Celkový náboj, který projde během třetí sekundy (tj. od konce druhé sekundy do konce třetí sekundy) je dán:

$$Q=\int_{t_1}^{t_2} I\,\mathrm{d}t=\int_{t_1}^{t_2}(3+7t)\mathrm{d}t=\left[3t+\frac{7}{2}t^2\right]_2^3=9+31{,}5-6-14=20{,}5\,\mathrm{C}$$

Vodičem během třetí sekundy projde náboj 20,5 C.



TO 3.2.-1. Co je to driftová rychlost?
a) rychlost tepelného pohybu nabitých částic ve vodiči
b) rychlost pohybu kladně nabitých částic ve vodiči
c) rychlost pohybu vodivostních elektronů ve vodiči

TO 3.2.-2. Stacionárním elektrickým proudem rozumíme:
a) elektrický proud konstantní velikosti
b) elektrický proud konstantní velikosti a stálého směru
c) elektrický proud konstantní velikosti a stálého směru i orientace

TO 3.2.-3. Stejnosměrným elektrickým proudem rozumíme:
a) elektrický proud konstantní velikosti
b) elektrický proud konstantní velikosti a stálého směru
c) elektrický proud konstantní velikosti a stálého směru i orientace

TO 3.2.-4. Vodivostní elektrony se v kovovém vodiči pohybují driftovou rychlostí?
a) ve směru intenzity vnějšího el. pole
b) proti směru intenzity vnějšího el. pole

TO 3.2.-5. Náboj, který projde průřezem vodiče závisí na čase podle rovnice: $Q = 2t^3$. Jaký proud prochází vodičem **během** třetí sekundy od začátku měření času?
a) nelze stanovit, proud není konstantní, $I = 6t^2$
b) během třetí sekundy prochází proud 54 A
c) během třetí sekundy prochází proud 27/4 A

U 3.1.-1. Jaké množství elektrického náboje projde vodičem za 10 s, je-li a) proud
I = 5A stálý, b) proud rovnoměrně roste od nuly do 3 A? Stanovte matematicky závislost proudu na čase.

U 3.1.-2. Vinutí elektrického zařízení, které je vyrobeno z kovového vodiče o průřezu S, má dodávat prou 3 A. Jaký musí mít tento vodič průřez, aby proudová hustota nepřekročila hodnotu $2{,}5.10^6$ $\mathrm{A.m^{-2}}$?

3.2.3. Elektrický odpor, Ohmův zákon

1. Definovat veličinu elektrický odpor, včetně jednotky.
2. Algebraicky odvodit závislost proudové hustoty na intenzitě elektrického pole.
3. Vyslovit a matematicky zapsat Ohmův zákon pro celý obvod i pro část obvodu.
4. Definovat vodivost, elektrický odpor, měrnou vodivost a měrný elektrický odpor, včetně jednotek.

5. Definovat teplotní závislost elektrického odporu.
6. Popsat možnosti zapojení rezistorů v elektrickém obvodu.
7. Umět stanovit výsledný odpor soustavy rezistorů zapojených v sérii nebo paralelně.

Na vedení proudu ve vodičích se podílejí volné elektrony, které se mohou ve vodivých látkách pohybovat mezi ostatními časticemi. Tyto částice „překážející“pohybu nosičů náboje ve vodiči mohou být elektricky neutrální (a tedy vnější pole na ně nepůsobí), nebo jsou pevně vázány v krystalové mřížce a brání pohybu nábojů, tedy **kladou odpor vedení elektrického proudu**. Odpor lze chápat analogicky jako pojem elektrického proudu dvěma způsoby: jako **jev** (bránění průchodu proudu) a jako fyzikální **veličinu**, která tento jev kvantitativně popisuje.

Mějme **kovový vodič** vložený do vnějšího elektrického pole intenzity $\boldsymbol{E}$. Ve vodiči vzniká **usměrněný pohyb** volných elektronů (vodivostní), neboť na nabité částice působí elektrická síla $\boldsymbol{F} = -e\,\boldsymbol{E}$. Je-li intenzita vnějšího elektrického pole $\boldsymbol{E}$ = ***konst***, potom i působící síla je konstantní. Dle 2. Newtonova pohybového zákona by se elektrony měly pohybovat s konstantním zrychlením, tj. měly by konat rovnoměrně zrychlený pohyb. Vzhledem k tomu by měl neustále narůstat i proud ve vodiči. Proud ve vodiči je však **stálý**, a to díky srážkám elektronů s ionty mřížky, při kterých dochází k odevzdání části kinetické energie. Průměrná rychlost, kterou se elektrony pohybují ve vodiči mezi srážkami je již dříve zmíněná **driftová rychlost** (kap. 3.2.2.).

Pokusme se vyjádřit vztah mezi elektrickým proudem ve vodiči (resp. proudovou hustotou) a intenzitou vnějšího elektrického pole. Uvažujme pohyb **mezi srážkami:**

- těsně po 1. srážce má elektron rychlost $v_1 = 0$
- těsně před 2. srážkou má maximální rychlost $v_2 = at$

Podle 2. Newtonova pohybového zákona je maximální rychlost před druhou srážkou elektronu s iontem mřížky dána:

$$F = ne = ma = m\frac{v_2}{t} \qquad 3.2.\text{-}10$$

a tedy: $$v_2 = \frac{eEt}{m} \qquad 3.2.\text{-}11$$

Je-li driftová rychlost považována za rychlost průměrnou mezi dvěma srážkami, potom po dosazení vztahu 3.2.-11 dostáváme:

$$v_d = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{eEt}{2m} \qquad 3.2.\text{-}12$$

Elektrický proud ve vodiči je dán vztahem 3.2.-3, jehož dosazením do předchozí rovnice 3.2.-12 získáme:

$$I = nev_d S = \frac{ne^2 t}{2m} S E \qquad 3.2.\text{-}13$$

Potom **proudová hustota**:

$$\boldsymbol{j} = \frac{ne^2 t}{2m}\boldsymbol{E} \qquad 3.2.\text{-}14$$

Proudová hustota a intenzita elektrického pole jsou tedy přímo úměrné veličiny:

$$\boldsymbol{j} = \gamma \boldsymbol{E} \qquad 3.2.\text{-}15$$

Rovnice 3.2.-14 a 3.2.-15 vyjadřují hledanou souvislost mezi proudovou hustotou a intenzitou elektrického pole ve vodiči. Tento vztah se nazývá **Ohmův zákon v diferenciálním tvaru**.

Poznámka: Diferenciální zákony charakterizují závislosti veličin v jediném místě prostoru nebo v jediném okamžiku, v tomto případě je to závislost ***průměrných*** *veličin.*

Konstanta úměrnosti γ se nazývá **měrná elektrická vodivost** daného kovu (resp. konduktivita), která závisí na počtu, náboji a hmotnosti pohybujících se nabitých částic ve vodiči.
Jednotkou měrné vodivosti je $(\Omega.\mathrm{m})^{-1}$

Slovní vyjádření Ohmova zákona v diferenciálním tvaru:
Hustota ustáleného elektrického proudu v určitém místě vodiče se rovná součinu jeho měrné vodivosti a intenzity elektrostatického pole v daném místě.

Převrácená hodnota již zmíněné měrné elektrické vodivosti je veličina, která opět charakterizuje daný materiál vodiče a nazývá se **měrný elektrický odpor** (rezistivita):

$$\frac{1}{\gamma} = \rho \qquad 3.2.\text{-}16$$

Jednotkou měrného elektrického odporu je Ω.m.

Součinitelé úměrnosti (měrný elektrický odpor i měrná vodivost) nezávisí na geometrii, ale pouze na materiálu vodičů.

Pro homogenní vodiče, které se k vedení proudu užívají nejčastěji, je vhodný integrální tvar Ohmova zákona, který lze zjednodušeně odvodit pro vodič ve tvaru válce o průřezu *S*, délky *l* a časově neproměnný ustálený elektrický proud. Dále lze vycházet ze zákona kontinuity (spojitosti) toku proudu: náboj procházející vodičem se nemůže nikde hromadit, nemůže se ve vodiči ani ztrácet. Tento zákon je analogií zákona o spojitosti toku z hydrodynamiky pro ideální nestlačitelnou kapalinu.

Je-li vnější elektrické pole homogenní ($\vec{E} = \overrightarrow{konst}$), napětí mezi konci vodiče je:

$$U = El, \qquad 3.2.\text{-}17$$

kde *l* je délka vodiče.
Dosadíme-li tento vztah do rovnice proudové hustoty 3.2.-7 a nahradíme-li měrnou vodivost měrným odporem, dostáváme vyjádření:

$$I = jS = \gamma ES = \gamma \frac{U}{l} S = \frac{1}{\rho}\frac{U}{l} S = \frac{U}{\frac{\rho\, l}{S}},$$

kde jmenovatel v posledním zlomku $\rho \frac{l}{S}$ je **elektrický odpor vodiče *R***. 3.2.-18

Úpravou poslední rovnice dostáváme **Ohmův zákon v integrálním tvaru**:

$$I = \frac{U}{R}$$ 3.2.-19

respektive vyjádřením úbytkového napětí přejde rovnice 3.2.-19 na tvar:

$$U = RI$$ 3.2.-20

Definici výše zavedené veličiny elektrický odpor vodiče (neboli rezistance) *R* lze vyjádřit z Ohmova zákona:

$$R = \frac{U}{I}$$ 3.2.-21

Jednotkou elektrického odporu je Ω (ohm), $\Omega = V.A^{-1}$, jehož rozměr je $\Omega = kg.m^2.s^{-3}.A^{-2}$.

Elektrický odpor závisí nejen na materiálu vodiče (stejně jako měrný elektrický odpor), ale také na jeho geometrii (tvaru a rozměrech).

Vztahy 3.2.-19 a 3.2.-20 vyjadřují **různé tvary Ohmova zákona**.

a) Protéká-li určitým úsekem vodiče proud *I*, musí být mezi jeho konci napětí *U* rovné součinu proudu *I* a odporu *R* vodiče.
b) Analogicky: je-li mezi konci určitého vodiče napětí *U*, protéká jím proud *I*, který se rovná podílu napětí a odporu *R*.

Čím větší je odpor *R* vodiče, tím větší napětí *U* musí být na jeho koncích, aby vodičem protékal proud *I*, a obráceně.

Vodiče, pro které přesně platí Ohmův zákon, se nazývají lineární vodiče - např. kovy udržované při konstantní teplotě. Průchodem elektrického proudu se vodič zahřívá, jeho odpor se mění a závislost mezi napětím a proudem přestává být lineární.

Součástka s definovaným odporem *R* se nazývá **rezistor a** její **schematická značka** je**:**

Převrácená hodnota elektrického odporu daného kovu představuje elektrickou vodivost:

$$\frac{1}{R} = G$$ 3.2.-22

Jednotkou elektrické vodivosti je S (siemens), $S = \Omega^{-1}$

Pozn.: Pro představu o řádovém rozpětí velikosti měrného elektrického odporu pro vodiče, dielektrika a polovodiče lze uvést následující tabulku:

a) Vodiče: $\rho = 10^{-8} – 10^{-6}$ Ωm
b) Izolanty: $\rho = 10^{7} – 10^{19}$ Ωm
c) Polovodiče: $\rho = 10^{-5} – 10^{5}$ Ωm

<u>Teplotní závislost elektrického odporu:</u>

Jak již bylo dříve zmíněno, elektrický odpor kovového vodiče nezávisí pouze na jeho materiálu, rozměrech a tvaru, ale také na teplotě. Se zvýšením teploty materiálu dochází současně ke zvětšení amplitud kmitů krystalové mřížky, což má za následek vyšší pravděpodobnost srážky vodivostních elektronů s ionty v uzlových bodech mřížky.zkracuje se doba mezi dvěma srážkami a tedy klesá proud a naopak narůstá odpor vodiče.

Závislost odporu kovů na teplotě je přibližně lineární (stanoveno experimentálně) a v oboru běžných teplot od 0 °C do 100 °C platí:

$$R_T = R_0\left[1+\alpha\left(T-T_0\right)\right] = R_0\left(1+\alpha\Delta T\right), \qquad 3.2.\text{-}23$$

kde R_0 je odpor látky při referenční teplotě T_0 a ΔT je celková změna teploty, které byl vodič vystaven a R_T je odpor látky při teplotě T.

Dojde-li tedy k elementární změně teploty $\mathrm{d}T$, tato změna vyvolá změnu elektrického odporu o hodnotu:

$$\mathrm{d}R = \alpha R_0 \mathrm{d}T \qquad 3.2.\text{-}24$$

Koeficient α, který se objevuje v obou vztazích 3.2.-23 i 3.2.-24 se nazývá **teplotní součinitel elektrického odporu**:

$$\alpha = \frac{1}{R}\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}T} \qquad 3.2.\text{-}25$$

Jednotkou teplotního součinitele elektrického odporu je K^{-1}.

V předchozích vztazích vycházíme z předpokladu, že teplotní součinitel α je v uvažovaném intervalu teplot $\Delta T = T - T_0$ konstantní.

Teplotní součinitel je u kovů vždy kladný (u polovodičů záporný) a jeho hodnota je u většiny čistých kovů při běžných teplotách blízká hodnotě:

$\alpha \cong 4.10^{-3}\ K^{-1} \cong 1/273\ K^{-1}$,

což je hodnota součinitele roztažnosti plynů.

Analogický vztah platí i pro měrný elektrický odpor, tedy:

$$\rho = \rho_0\,(1+\alpha\Delta T), \qquad 3.2.\text{-}26$$

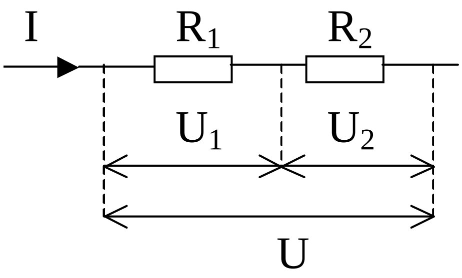
Odpor některých kovů (např. cín, olovo, zinek, hliník, rtuť) v blízkosti absolutní nuly začne prudce klesat a stává se téměř nulovým. Tento stav se nazývá **supravodivost**, který byl prokázán experimentálně Onnesem v roce 1911.

Spojování rezistorů

V případě řešení elektrických obvodů, ať už jednoduchých, nebo složitějších elektrických sítí, se budeme setkávat se zapojením velkého počtu elektrických součástek, které budou charakterizovány mnoha parametry, přičemž jedním z nich může být elektrický odpor. Tyto prvky mohou být v obvodech zapojeny v mnoha kombinacích, avšak vždy lze tyto soustavy vyřešit postupně – pomocí souboru rezistorů zapojených vůči sobě tzv. **sériově** nebo **paralelně**.

a) sériové zapojení rezistorů (tzv. za sebou)**:**

Příklad zapojení je na následujícím obrázku (jedná se jen o část obvodu, bez znázornění připojení ke zdroji elektrického pole ve vodičích):



Obr. 3.2.-3.

Při sériovém zapojení je proud jdoucí jednotlivými rezistory stejný a součet napětí na jednotlivých rezistorech je roven napětí na celé soustavě rezistorů. Tuto skutečnost lze matematicky zapsat následujícím způsobem:

$U = U_1 + U_2$ 3.2.-27

$I = I_1 = I_2$

Pro každý z rezistorů této řady platí **Ohmův zákon** (napětí na jednotlivých rezistorech je úměrné jejich odporu):

$U_1 = R_1 I, \quad U_2 = R_2 I$ 3.2.-28

Celkové napětí na sérii je tedy:

$U = U_1 + U_2$, tj. $U = (R_1 + R_2)I$ 3.2.-29

Označíme-li R celkový odpor série, dostaneme podle Ohmova zákona

$U = R I,$ 3.2.-30

z čehož porovnáním s předchozím vztahem 3.2.-29 získáváme:

$R = R_1 + R_2$ 3.2.-31

Pro sériové zapojení dvojice rezistorů tedy platí, že napětí na těchto rezistorech je ve stejném poměru jako jejich elektrické odpory:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$ 3.2.-32

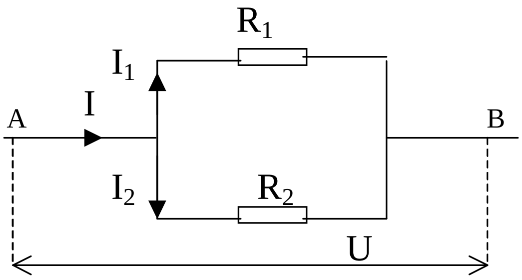
Obecně pro *n*- rezistorů v sérii platí zobecněný vztah 3.2.-31:

$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n,$ 3.2.-33

neboli $R = \sum_{j=1}^{n} R_j$

b) paralelní zapojení rezistorů (tzv. vedle sebe)**:**

Příklad zapojení dvojice rezistorů je na následujícím Obr. 3.2.-4:



Obr. 3.2.-4.

Nyní provedeme analogické úvahy jako v předchozím případě. Tyto rezistory mají odlišný elektrický odpor, avšak je na nich stejné napětí, neboť jsou připojeny v obvodu v místech A, B, jejichž potenciál je konstantní, a tedy je mezi nimi stálý potenciálový spád $\varphi_A - \varphi_B = U$.

$U = U_1 = U_2$ 3.2.-34

Proud jdoucí každým rezistorem však může být odlišný, nicméně v součtu musí platit:

$I = I_1 + I_2$, 3.2.-35

neboť elektrický proud nemůže nikde „zmizet“, náboj se nemůže v žádném místě hromadit (vycházíme z platnosti zákona kontinuity pro proudící elektrický náboj ve vodiči).

Analogicky 3.2.-28 pro každý z rezistorů této řady platí **Ohmův zákon** (napětí na jednotlivých rezistorech je úměrné jejich odporu):

$U = R_1 I_1, \quad U = R_2 I_2$ 3.2.-36

Po dosazení do vztahu 3.2.-35 dostaneme:

$$I = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$ 3.2.-37

Označíme-li R celkový odpor paralelního zapojení, dostaneme podle Ohmova zákona

$$I = \frac{U}{R},$$ 3.2.-38

z čehož porovnáním s předchozím vztahem 3.2.-37 získáváme:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$ 3.2.-39

Pro paralelní zapojení dvojice rezistorů tedy platí, že napětí na těchto rezistorech je v převráceném poměru jejich elektrických odporů:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$ 3.2.-40

Obecně pro *n*- rezistorů zapojených vedle sebe (paralelně) platí zobecněný vztah 3.2.-31:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n},$$ 3.2.-41

neboli $\displaystyle \frac{1}{R} = \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{R_j}$ 3.2.-42

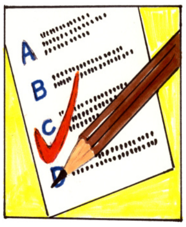
KO 3.2.-7. Definujte závislost intenzity elektrického pole a proudové hustoty?

KO 3.2.-8. Jaká je jednotka měrné vodivosti? Jedná se o jednotku odvozenou, má svůj vlastní název?

KO 3.2.-9. Měrná vodivost a měrný odpor jsou veličiny nebo konstanty?

KO 3.2.-10. Platí pro sériové i paralelní zapojení rezistorů Ohmův zákon?

KO 3.2.-11. Co je to supravodivost?



TO 3.2.-6. Siemens je jednotka:

a) vodivosti b) el.odporu c) měrné vodivosti d) měrného el. odporu

TO 3.2.- 7. Jak se mění odpor kovových vodičů s rostoucí teplotou?

a) elektrický odpor exponenciálně narůstá,
b) elektrický odpor exponenciálně klesá,
c) elektrický odpor lineárně narůstá,
d) elektrický odpor lineárně klesá.

TO 3.2.-8. Která rovnice představuje Ohmův zákon v integrálním tvaru?

a) $\boldsymbol{j} = \gamma \boldsymbol{E}$

b) $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$

c) $\rho = \rho_0\,(1+\alpha\Delta T)$

d) $U = R\,I$

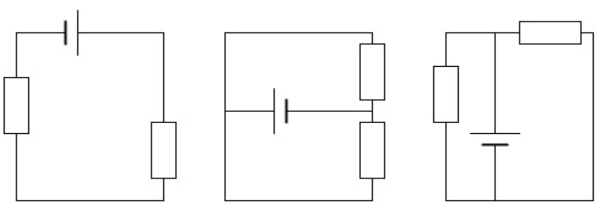
TO 3.2.-9. Při paralelním zapojení rezistorů je na každém rezistoru stejné:

a) napětí
b) proud
c) vnitřní odpor
d) náboj

TO 3.2.-10. Při paralelním zapojení rezistorů je na každém rezistoru stejné:

a) napětí
b) proud
c) vnitřní odpor
d) náboj

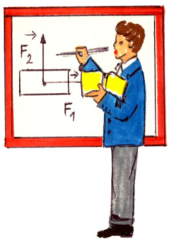
TO 3.2.-11. Výsledný odpor soustavy dvou rezistorů na následujících obrázcích 3.2.-5 (I. – III.) je:



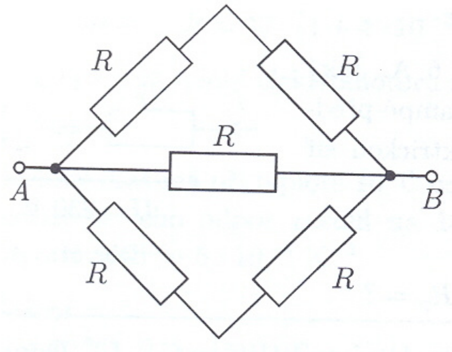
I. II. III.

Obr. 3.2.-5.

a) shodný pro všechny typy zapojení
b) různý pro všechny typy zapojení
c) shodný pro zapojení I. a II.
d) shodný pro zapojení I. a III.
e) shodný pro zapojení II. a III.

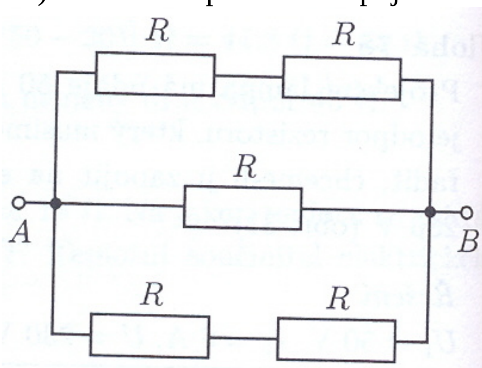


Vypočtěte výsledný odpor obvodu na Obr. 3.2.-6, jestliže každý rezistor v obvodu má elektrický odpor 2 Ω?



Obr. 3.2.-6.

Uvedený obvod lze překreslit do schématu na Obr. 3.2.-7, ze kterého vyplývá, že dvě dvojice rezistorů jsou vůči sobě sériově a následně po jejich nahrazení rezistorem jediným)o odporu 2*R*) získáme tři paralelně zapojené rezistory:



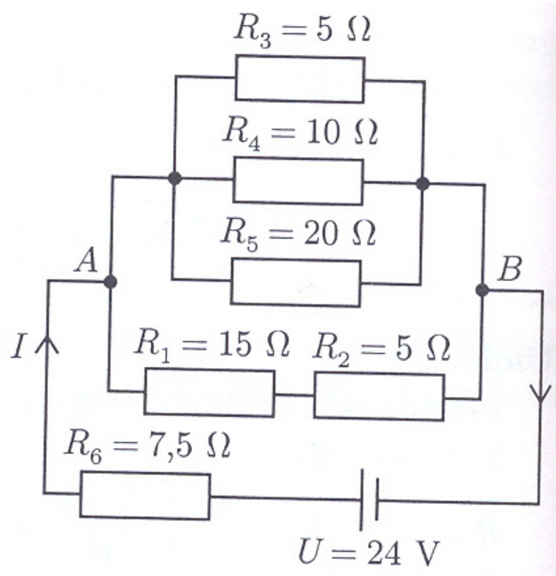
Obr. 3.2.-7.

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{2R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{2R} = \frac{4}{2R} = \frac{2}{R}$$

Odsud vyplývá, že výsledný odpor obvodu je:

$R_{AB} = \frac{R}{2}$, po číselném dosazení 1 Ω.

U 3.2.-3. Vypočtěte výsledný odpor obvodu s rezistory zapojenými dle obrázku 3.2.-8. Jaký proud prochází rezistorem o odporu R_4?



Obr. 3.2.-8.

U 3.2.-4. Příčným průřezem vodiče projde každou sekundu $6{,}25.10^{12}$ elektronů. Určete proud procházející vodičem.

U 3.2.-5. Měděný drát o průměru 2 mm máme nahradit hliníkovým drátem, který má stejnou délku i odpor. jaký musí být jeho průměr? Rezistivita hliníku je 0,027 μΩ.m, rezistivita mědi je 0,017 μΩ.m.

U 3.2.-6. Měděné vedení má při teplotě 15 °C odpor 21 Ω. jaký bude mít odpor při teplotě větší o 15 °C? jaký odpor bude mít, změní-li se jeho teplota o 15 K?

U 3.2.-7. Dvě tyčinky stejného průměru jsou zapojeny za sebou, jedna je uhlíková s měrným odporem 4.10^{-5} Ω.m a teplotním součinitelem odporu -8.10^{-3} K^{-1}, druhá je železná s měrným odporem 12.10^{-8} Ω.m a teplotním součinitelem odporu 6.10^{-3} K^{-1}. Při jakém poměru délek odpor této kombinace nezávisí na teplotě?

3.2.4. Elektromotorické napětí

1. Charakterizovat zdroj elektrického napětí.
2. Popsat vtištěné elektromotorické síly.
3. Definovat elektromotorické a svorkové napětí.
4. Odvodit Ohmův zákon pro jednoduchý elektrický obvod.
5. Popsat vybrané zdroje elektromotorického napětí – galvanické články a akumulátory.

Uspořádaný pohyb náboje (elektrický proud), je podmíněn přítomností elektrického pole ve vodiči a elektrický proud trvá jen tak dlouho, dokud toto pole nezanikne. Aby bylo možné pole ve vodiči udržet, je nezbytné stále oddělovat náboj, který by se díky elektrické indukci hromadil na koncích vodiče, k čemuž slouží tzv. zdroj napětí (lze označovat také jako zdroj proudu). Zdrojem elektrického napětí tedy rozumíme každé zařízení, které na svorkách (výstupech) udržuje i při zapojení do obvodu stálý potenciálový spád (rozdíl).

Při spojení dvou vodičů (označme např. A, B - svorky zdroje) o různých potenciálech přechází kladný náboj z míst o vyšším potenciálu (A) do míst nižšího potenciálu (B), čímž dochází k vyrovnávání potenciálů a elektrický proud slábne. P**ro zajištění stálého elektrického proudu** ve spojovacím vodiči je tedy nutné udržovat na vodičích A, B stálé potenciály, tedy je nezbytné na vodič A neustále přivádět stejný náboj, jaký přijal vodič B. to znamená, že na cestě B – A (tj uvnitř zdroje) působí speciální druh sil, tzv. **elektromotorické síly** (vtištěné síly**),** které jsou **neelektrické povahy** a překonávají síly elektrického pole mezi náboji na pólech. Napětí, které vtištěné síly udržují na pólech zdroje nazýváme **elektromotorické napětí.**

Veličinu nazvanou elektromotorické napětí ozn. U_e lze tedy definovat následujícími způsoby:
A) Elektromotorické napětí je číselně rovno práci, kterou vykonávají elektromotorické síly při přemisťování kladného jednotkového náboje uvnitř mezi póly zdroje.

B) Elektromotorické napětí se rovná rozdílu potenciálů na pólech nepracujícího (otevřeného, nezatíženého) zdroje.

Algebraický zápis těchto definic je tedy ve tvaru:

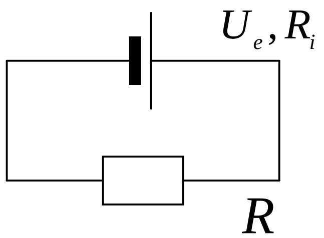
$$U_e = \frac{\mathrm{d}W_e}{\mathrm{d}Q} = \int \vec{E}\,\mathrm{d}\vec{r} \qquad 3.2.\text{-}43$$

Jednotkou elektromotorického napětí je V (volt).

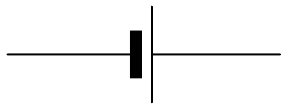
Elektrická práce zdroje napětí v jednoduchém elektrickém obvodu lze vyjádřit pomocí vztahu z předchozí kapitoly 3.1.-52:

$$W_e = QU_e \qquad 3.2.\text{-}44$$

Mějme jednoduchý elektrický obvod (podle Obr. 3.2.-9), který se skládá z vnitřní a vnější části obvodu. Vnitřní část obvodu představuje zdroj napětí se stálým elektromotorickým napětím U_e a z vodiče o odporu R, který je připojen ke svorkám zdroje a je pro nás vnější částí obvodu.



Obr. 3.2.-9.

Zdroji elektromotorického napětí přísluší symbolická značka 

Na svorkách zdroje je tedy největší napětí tehdy, pokud nedochází k pohybu elektronů a svorky zdroje nejsou vodivě spojeny. Takovému zdroji říkáme **otevřený**, resp. **nezatížený**. Napětí na svorkách zdroje je rovno elektromotorickému napětí U_e.

Pokud uvedeným obvodem prochází elektrický proud (hovoříme o tzv. uzavřeném elektrickém obvodu), prochází elektrický proud také samotným zdrojem. Ovšem i tato součást

elektrického obvodu klade průchodu proudu jistý odpor. Tento odpor je ozn. R_i a nazývá se **vnitřní odpor zdroje** elektromotorického napětí. Na svorkách zdroje je napětí U, které se nazývá **svorkové napětí zdroje**.
Vnitřní odpor zdroje R_i je v sérii s vnějším odporem R.

Pro celý obvod tedy platí, že elektromotorické napětí na zdroji je rovnou součtu napětí svorkového a napětí U_i, které představuje úbytek napětí na vnitřním odporu zdroje.

$$U_e = U + U_i \qquad 3.2.\text{-}45$$

Vztah 3.2.-45 lze slovně vyjádřit také tímto způsobem: „Svorkové napětí se rovná elektromotorickému napětí zdroje, zmenšenému o ohmický úbytek napětí na vnitřním odporu zdroje.“

Budeme-li předpokládat, že obvodem prochází stálý proud I, potom tedy z Ohmova zákona vyplývá úprava předchozí rovnice 3.2.-45:

$$U_e = U + U_i = (R + R_i)I \qquad 3.2.\text{-}46$$

resp. $I = \dfrac{U_e}{R + R_i}$ 3.2.-47

Poslední dva vztahy jsou tedy matematickým vyjádřením **Ohmova zákona pro jednoduchý elektrický obvod.**

V případě tzv. **zkratu** (neboli spojení nakrátko) prochází obvodem největší proud, neboť R = O a $U \cong 0$. Proud je tedy dán:

$$I = \frac{U_e}{R_i} \qquad 3.2.\text{-}48$$

<u>Spojování zdrojů elektromotorického napětí</u>

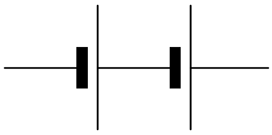
Analogicky k možnostem zapojení většího počtu rezistorů v jediném obvodu resp. elektrické síti existuje i v případě zdrojů elektromotorického napětí jejich sériové nebo paralelní zařazení v obvodech.

a) sériové zapojení zdrojů elektromotorického napětí:
Mají-li zdroje různá elektromotorická napětí a různé vnitřní odpory, potom pro výsledné hodnoty veličin U_e a R_i platí:

$$U_e = \sum_{k=1}^{n} U_{ek}\,, \quad R_i = \sum_{k=1}^{n} R_{ik} \qquad 3.2.\text{-}49$$

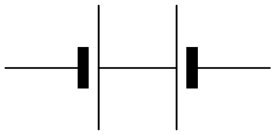
Slovně lze tyto vztahy vyjádřit:
- Výsledné elektromotorické napětí všech n sériově zapojených zdrojů je rovno **algebraickému** součtu dílčích elektromotorických napětí. Algebraický součet znamená, že napětí na jednotlivých zdrojích U_{ek} dosazujeme do daného vztahu včetně znamének!
- Výsledný vnitřní odpor série zdrojů je roven součtu dílčích vnitřních elektrických odporů.

Příklad výpočtu elektromotorického napětí pro dvojici různě zapojených zdrojů jsou na následujících obrázcích 3.2.-10 a 3.2.-11:



$$U_e = U_{e1} + U_{e2}$$

Obr. 3.2.-10.



$$U_e = \left| U_{e1} - U_{e2} \right|$$

Obr. 3.2.-11.

Sériové spojení záporného pólu jednoho zdroje s kladným pólem následujícího se v případě *k* stejných zdrojů s výhodou používá ke zvýšení elektromotorického napětí tehdy, je-li:

$$R \succ\succ kR_i$$

b) paralelní zapojení zdrojů elektromotorického napětí:

Uvažujme paralelní zapojení *k* stejných zdrojů, při kterém dochází ke spojení kladných a záporných svorek. Výsledná baterie má stejné elektromotorické napětí jako každý jednotlivý zdroj, přičemž dojde ke zmenšení vnitřního odporu baterie R_i / k :

$$\frac{1}{R_i} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{R_{ik}} \qquad 3.2.\text{-}50$$

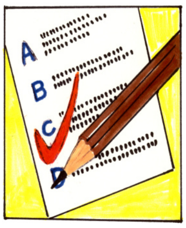
Pro $R \prec\prec \frac{R_i}{k}$ je elektrický proud *k*-krát větší než dodává každý jednotlivý zdroj, který je součástí této baterie.

KO 3.2.-12. Vtištěné síly pracují uvnitř vodičů, uvnitř zdrojů nebo ve všech vodičích elektrického obvodu?

KO 3.2.-13. Vtištěné síly jsou elektrické povahy?

KO 3.2.-14. Může reálně existovat zdroj o nulovém vnitřním odporu?

KO 3.2.-15. Při spojení nakrátko prochází dočasně obvodem minimální proud?



TO 3.2.-12. Elektromotorické napětí má zdroj:

a) zatížený b) nezatížený c) záleží na daném zapojení

TO 3.2.- 13. Elektromotorické napětí baterie je větší než svorkové:

a) vždy b) u zatíženého zdroje c) u nezatíženého zdroje d)různé dle zapojení

TO 3.2.-14. Elektromotorické napětí akumulátoru je 2 V, jeho vnitřní odpor je 0,5 Ω a odpor vnější části obvodu 2 Ω. určete svorkové napětí akumulátoru.

a)16 V b) 8 V c) 1,6 V d) 0,8 V

U 3.2.-8. Jaký odpor je zapojen na svorky elektrického zdroje s napětím naprázdno U_0 = 1,4V a s vnitřním odporem R_i = 0,8Ω, prochází-li obvodem proud I = 0,7A?

U 3.2.-9. Stanovte vnitřní odpor galvanického článku s elektromotorickým napětím (naprázdno) 1,5V, má-li při zatížení odporem 7Ω svorkové napětí 1,3V.

3.2.5. Práce a výkon elektrického proudu

1. Definovat práci vykonanou procházejícím elektrickým proudem v obvodu.
2. Znát vztah pro výkon v elektrickém poli.
3. Umět vyslovit a matematicky zapsat Joule-Lenzův zákon.
4. Využít Joule-Lenzův zákon pro výpočet vyvinutého tepla při průchodu proudu obvodem.
5. Určit rozdíl mezi jednotkami watt a watthodina.

Kapitola 3.1.5 byla věnována stanovení práce, kterou musí vykonat elektrické síly při přemístění nabité částice v elektrostatickém poli. O pohybu nabitých částic v elektrostatickém poli však můžeme hovořit i v případě elektrického proudu! Jedná se o uspořádaný pohyb náboje, který je podmíněn přítomností elektrického pole.

Je-li *U* stálý rozdíl potenciálů mezi dvěma různými průřezy vodiče, potom vykonají síly elektrického pole při přenesení náboje *Q* tímto potenciálovým rozdílem **práci**:

$$W = Q(\varphi_1 - \varphi_2) = QU \qquad 3.2.\text{-}51$$

Zdroj elektromotorického napětí, který udržuje ve vodiči stálé napětí *U*, odevzdá volným nabitým částicím energii *E*, která je rovna vykonané práci těmito částicemi *W*.

Pokud je procházející elektrický **proud** vodičem **konstantní**, průřezem vodiče projde za dobu *t* elektrický náboj $Q = I\,t$. Dosadíme-li tento vztah do rovnice 3.2.-51, dostáváme vztah pro vykonanou práci ve tvaru:

$$W = QU = UIt \qquad 3.2.\text{-}52$$

Má-li vodič definovaný odpor *R*, z Ohmova zákona vyplývá také:

$$W = UIt = RI^2t = \frac{U^2}{R}t \qquad 3.2.\text{-}53$$

Jednotkou pro práci v mezinárodní soustavě jednotek SI je J (joule), přesto se pro práci (resp. množství spotřebované energie) užívá v elektrotechnice častěji jednotka kWh (kilowatthodina).

Platí převodní vztah: 1 kWh = 3,6 .10^6 J

Zdroj elektromotorického napětí U_e koná práci na nosičích elektrického náboje tvořících proud *I*, přenáší tedy energii ze svého vlastního zdroje energie (jako např. chemický zdroj energie uvnitř baterie) na nosiče náboje. Elektrická práce, kterou vykoná tento zdroj je dána vztahem:

$$W_e = U_e I t \qquad 3.2.\text{-}54$$

Protože každý reálný zdroj elektromotorického napětí má svůj vnitřní odpor, část energie zdroje se ztrácí přímo uvnitř zdroje (je tzv. disipována).

Výkon elektrického proudu

Výkon je skalární fyzikální veličina, která přímo souvisí s prací a energií. V tomto případě je výkon definován jako rychlost přenosu elektrické energie.

a) Výkon elektrického proudu ve **vnější části** obvodu (resp. spotřebiči):

$$P = \frac{W}{t} = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} \qquad 3.2.\text{-}55$$

Slovně lze vztah 3.2.-55 formulovat takto: „Výkon stálého stejnosměrného proudu ve vodiči (spotřebiči) je roven součinu napětí na koncích vodiče (spotřebiče) a proudu, který vodičem (spotřebičem) prochází.“
Výkon přiváděný elektrickým proudem do určitého zařízení se nazývá **příkon spotřebiče.**

b) Výkon **zdroje** elektromotorického napětí U_e je tedy dán analogicky:

$$P_e = \frac{W_e}{t} = U_e I \qquad 3.2.\text{-}56$$

Jednotkou výkonu zdroje i spotřebiče je W (watt), což je jednotka známá již z mechaniky hmotných bodů. Tuto jednotku lze podle rovnice 3.2.-56 vyjádřit také jako V.A (voltampér).

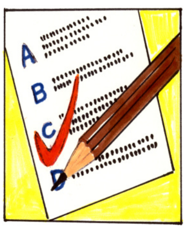
Pohybující se nabité částice ve vodiči narážejí na jiné částice vodiče (např. elektrony na částice v krystalové mřížce) a při těchto srážkách jim předávají část své kinetické energie (viz. kap. 3.2.2. o driftové rychlosti). Těmito srážkami se mění kinetická energie uspořádaného pohybu nabitých volných částic na kinetickou energii neuspořádaného pohybu částic látky, tj. na teplo. Vodič se tedy průchodem proudu **zahřívá**! Teplo, které se při průchodu proudu vodičem vytvoří, je rovno práci elektrického proudu:

$$Q = UIt = RI^2 t \qquad 3.2.\text{-}57$$

Vztah 3.2.-57 vyjadřuje tzv. **Joulův – Lenzův zákon**.

Tento jev má v praxi velký **pozitivní** význam, zejména pro ohřev v odporových pecích, při sušení, topení apod. V každodenním životě nám tento jev přináší zdroj světla v podobě rozžhavených vláken žárovek. Kromě těchto výhod je třeba zmínit i **negativní** důsledky, jako zejména značné ztráty elektrické energie, resp. nutnost zajistit odvod tepla u mnohých elektrických spotřebičů.

KO 3.2.-16. Výkon elektrického proudu v obvodu je veličina vektorová nebo skalární?
Skalární je určena pouze číselnou hodnotou a jednotkou. Analogicky jako v mechanice.
KO 3.2.-17. Jednotka kWh se užívá v elektrotechnice pro práci nebo výkon elektrického proudu?
Jedná se o jednotku práce (resp. množství spotřebované energie).

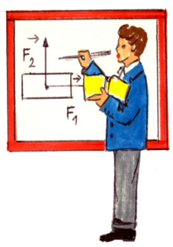


TO 3.2.-15. Jak se nazývá zákon vyjadřující množství tepla, které se vytváří průchodem proudu ve vodiči?
a) Ohmův b) Joule-Lenzův c) Wattův d) Kirchhoffův
b) Joule-Lenzův

TO 3.2.-16. Které vyjádření vyjadřuje množství tepla vytvořeného v uzavřeném el. obvodu?

a) $Q = UIt$ b) $Q = RI^2 t$ c) $Q = RIt$ d) $Q = UI^2 t$

a) b)



Odpor spirály vařiče je R =16 Ω. určete čas potřebný k přivedení m = 600 g vody k varu, má-li původní teplotu t_1 = 10°C, je-li účinnosti vařiče η = 60 %. Napětí v elektrické síti je 120 V.

Vodu je potřeba ohřát z teploty 10 °C na 100 °C, což představuje změnu teploty o 90 °C (resp. 90 K).

Při stoprocentní účinnosti vařiče bychom na ohřev potřebovali teplo:

$$Q = m\,c\,\Delta t\,,$$

kde c je měrná tepelná kapacita vody 4186 $\mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}$.

Je-li účinnost vařiče jen 60 %, celkové teplo dodané vařičem musí být větší, a to:

$$Q_c = \frac{Q}{\eta} = \frac{mc\Delta t}{\eta}\,.$$

Podle Joule-Lenzova zákona pro celkové dodané teplo platí:

$$Q = UIt = U\frac{U}{R}t = \frac{U^2}{R}t$$

Porovnáme-li tato dvě vyjádření celkového dodaného tepla, dostaneme:

$$\frac{mc\Delta t}{\eta} = \frac{U^2}{R}t\,,$$

odkud lze vyjádřit hledanou veličinu:

$$t = \frac{m\,c\,\Delta t\,R}{\eta\,U^2}\,.$$

Po číselném dosazení: čas potřebný k přivedení vody do varu je 419 s.

U 3.2.-10. Odpor vlákna svítící žárovky připojené na napětí 120 V o výkonu 100 W je 10-krát menší, než při teplotě 0 °C. jaký je odpor žárovky při teplotě 0 °C a jaký je teplotní součinitel odporu, je-li teplota rozžhaveného vlákna 2000 °C?

U 3.2.-11. Dvě žárovky na 120 V o příkonech 60 W a 40 W jsou zapojeny sériově ke zdroji, který má napětí 230 V. jaké bude napětí na obou žárovkách?

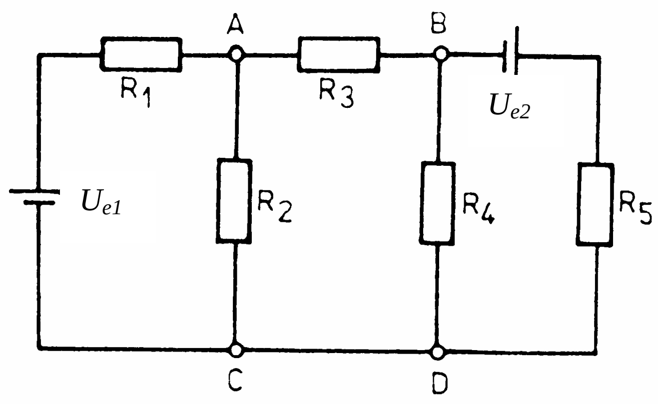
U 3.2.-12. Dvě topné spirály, které mají shodný elektrický odpor R, připojíme k elektrické síti nejprve sériově, pak paralelně. Určete poměr tepel, která spirály při těchto zapojeních předají za stejnou dobu do okolí.

U 3.2.-13. Jaký proud prochází vařičem, jestliže se na něm 10 l vody ohřeje z 20 °C na 100 °C za 30 min? Účinnost vařiče je 75 %, napětí v síti 230 V.

3.2.6. Kirchhoffovy zákony

1. Vyslovit a matematicky zapsat oba Kirchhoffovy zákony.
2. Umět Kirchhoffovy zákony využít při řešení složitějších elektrických sítí.
3. Znát pojmy charakterizující elektrické obvody a sítě.

Ohmův zákon v obou tvarech (jak diferenciální, tak integrální), se kterým jsme se již setkali, je velmi užitečnou pomůckou pro výpočet veličin charakteristických pro jednoduché elektrické obvody, resp. jejich části. Při **řešení** složitějších **elektrických obvodů a sítí** (viz např. Obr. 3.2.-8) je vhodnější využít tzv. Kirchhoffovy zákony. Rozvětvený elektrický obvod se nazývá elektrická síť, elektrická síť je soustava zdrojů elektromotorických napětí propojených vodiči (s definovanými odpory).



Obr. 3.2.-8.

Abychom se v elektrických sítích mohli jednoduše orientovat, zaveďme následující pojmy:

- **Uzel**: místo vodivého spojení, ve kterém se setkávají alespoň tři vodiče (proud se rozděluje do jednotlivých větví).
- **Větev**: část obvodu mezi dvěma uzly, sériová kombinace vodičů a zdrojů elektomotorického naptí na úseku mezi dvěma uzly sítě.
- **Jednoduchý uzavřený elektrický obvod** (uzavřená smyčka vybraná z rozvětvené sítě) – od jednoduchých elektrických obvodů se liší tím, že v různých jejich větvích jsou obecně různé elektrické proudy.
- **Síť** (soustava jednoduchých elektrických obvodů).

1. Kirchhoffův zákon

Jestliže obvodem prochází **ustálený proud** (v libovolném místě vodiče má stejnou hodnotu), částice s nábojem se **nemohou hromadit**, každé místo musí mít trvale **stejný potenciál**, z čehož tedy plyne:

„Algebraický součet proudů v libovolném uzlu elektrického obvodu se rovná nule.“

NEBO

„Součet proudů do uzlu vstupujících se musí rovnat součtu proudů z uzlu vystupujících.“

Algebraicky lze tento zákon vyjádřit ve tvaru:
$I_1 + I_2 + I_3 + \ldots = 0$,

resp. $\sum_{k=1}^{n} I_k = 0$ 3.2.-58

Pozn.: Proudy do uzlu vstupující považujeme za kladné, proudy z uzlu vystupující za záporné. Jedná se o tzv. znaménkovou dohodu.

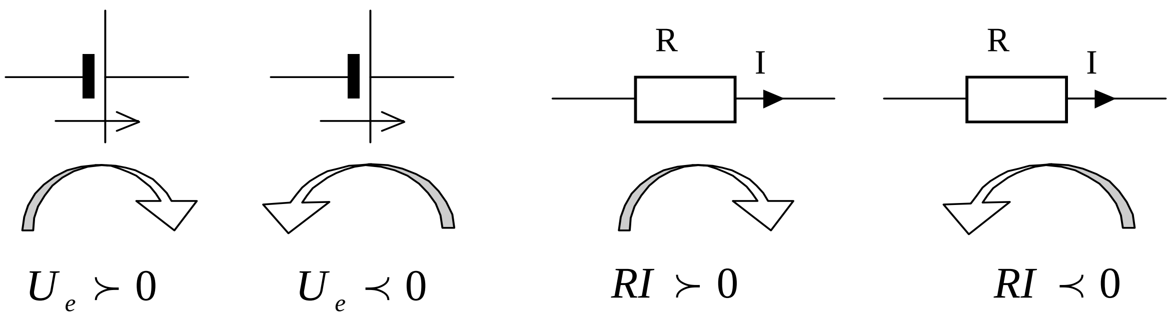
2. Kirchhoffův zákon (pro jednoduché uzavřené obvody)

„V libovolném uzavřeném obvodu, který je součástí elektrické sítě, je algebraický součet úbytků napětí na jednotlivých rezistorech $R_j I_j$ roven algebraickému součtu elektromotorických napětí U_{ek} v příslušném obvodu."
Matematicky zapsáno:

$$\sum_{k=1}^{n} U_{ek} = \sum_{j=1}^{m} R_j I_j \qquad 3.2.\text{-}59$$

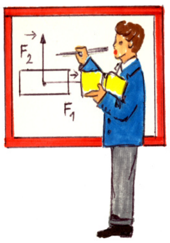
Při řešení elektrických sítí použitím 1. a 2. Kirchhoffova zákona je třeba dodržovat některé zásady a postupy výpočtů:

- **počet** rovnic pro řešení elektrické sítě je dán počtem větví,
- rovnice vybíráme tak, aby byly **nezávislé,**
- zvolit předpokládané **směry proudů** v jednotlivých větvích (tento směr volíme libovolně, nesmíme ho však v průběhu řešení obvodu měnit),
- zvolit **směr postupu** v jednotlivých vybraných smyčkách (tento směr volíme libovolně, nesmíme ho však v průběhu řešení obvodu měnit),
- vyznačíme směr od záporného ke kladnému pólu ve zdrojích napětí (tj. ve směru růstu potenciálu),
- EMN a úbytková napětí dosazujeme do rovnic včetně znamének podle následujícího obrázku 3.2.-9:

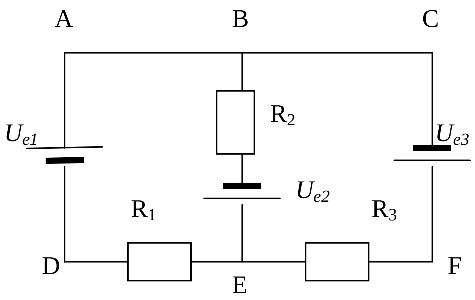


Obr. 3.2.-9.

Směry proudů v jednotlivých uzlech a větvích nemusí být vždy předem známé, proto si tyto směry volíme náhodně a dbáme pouze na to, aby z každého uzlu nějaký proud odtékal a nějaký do něj vtékal. Po vyřešení úlohy mohou vyjít některé proudy záporné, což znamená, že mají opačný směr, než byl předpokládaný! Proudy, které vyšly s kladným znaménkem, mají souhlasný směr s předpokládaným směrem.



Vypočítejte proudy v jednotlivých větvích elektrického obvodu podle obr. 3.2.-10., jestliže je dáno elektromotorické napětí zdrojů a hodnoty odporu jednotlivých rezistorů. Uvažujme zdroje napětí o zanedbatelném vnitřním odporu. U_{e1} = 10 V, U_{e2} = 6 V, U_{e2} = 8 V, R_1 = 18 Ω, R_1 = 6 Ω, R_1 = 12 Ω.

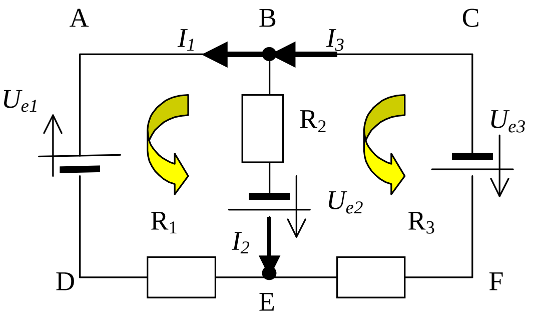


Obr. 3.2.-10.

Při řešení se držte následující osnovy:

a) označte směry napětí
b) zvolte směry proudů ve větvích
a) označte kladný směr pro proudy
b) směr postupu jednotlivými smyčkami
d) napište 1. Kirchhoffův zákon pro uzel B (bude shodný s vyjádřením pro uzel F)
e) napište 2. Kirchhoffův zákon pro částečné obvody
- A B E F
- B C D E

Postupně po zakreslení požadovaných symbolů do obvodu získáme následující obr. 3.2.-11, kde na každém zdroji je vyznačen směr růstu potenciálu, žluté šipky uvnitř smyček naznačují směr, který při postupu budu dodržovat a vůči němu budu uvažovat znaménka proudů a napětí.



Obr. 3.2.-11.

Nyní sestavme soustavu tří rovnic o třech neznámých proudech I_1, I_2 a I_3:

$I_3 - I_2 - I_1 = 0$

$- U_{e1} - U_{e2} = I_1 R_1 - I_2 R_2$

$U_{e2} - U_{e3} = I_2 R_2 + I_3 R_3$

Dosadíme numerické hodnoty a řešíme soustavu rovnic:

$I_3 - I_2 - I_1 = 0$

$-10 - 6 = 18\, I_1 - 6 I_2$

$6 - 8 = 6\, I_2 + 12\, I_3$

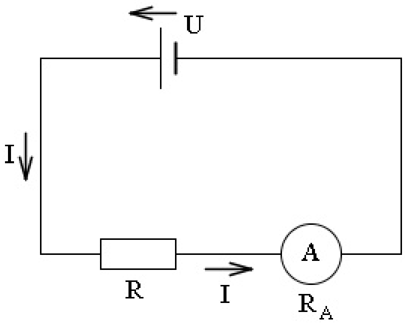
Řešením této soustavy je: I_1 = -4/11 A, I_2 = 13/33 A, I_3 = -25/33 A.
Proudy I_1 a I_3 tedy mají opačnou orientaci, než byla zvolena v obrázku.

Měření proudů a napětí v elektrickém obvodu

Napětí v elektrickém obvodu se měří voltmetry, proudy pomocí ampérmetrů, k měření obzvláště nízkých proudů volíme galvanometry. Přístroje tohoto druhu, které jsou běžně v praxi používány, jsou založeny na silových **účincích magnetického pole**, které je vyvoláno průchodem elektrického proudu přes cívku daného přístroje. Každé zařízení má svůj určitý **vnitřní odpor**, proto je třeba, aby měřicí přístroj při zapojení do obvodu způsobil co nejmenší změny proti původnímu stavu.

A) Zapojení ampérmetru do obvodu:

Aby bylo možné změřit proud I, který protéká určitou větví obvodu, je nutné, aby tento proud protékal také ampérmetrem I_A. Proto tento přístroj musí být vždy zařazen v **sérii** s měřenou větví obvodu podle Obr. 3.2.-12



Obr. 3.2.-12

Ampérmetr má svůj vnitřní odpor R_A, na kterém dochází k úbytku ohmického napětí, celkový odpor obvodu se zvýší a při stálé hodnotě svorkového napětí zdroje se sníží i proud jdoucí obvodem. Aby byl pokles proudu v obvodu po zařazení ampérmetru co nejnižší, musí vnitřní odpor ampérmetru být co možná nejnižší, ale určitě mnohem menší než odpor vnější části obvodu $R_A << R$.

Pro měření větších proudů, než ukazuje stupnice a udaný rozsah ampérmetru, lze **rozšířit rozsah** přidáním určitého rezistoru paralelně k jeho svorkám. Tento rezistor nazýváme **bočník.** Proud jdoucí bočníkem ozn. I_B, potom z 1. Kirchhoffova zákona vyplývá:

$$I_A + I_B = I \qquad 3.2.\text{-}60$$

a pro poměr proudů jdoucích ampérmetrem a přidaným bočníkem platí:

$$\frac{I_B}{I_A} = \frac{R_A}{R_B} \qquad 3.2.\text{-}61$$

Řešením těchto dvou rovnic dostaneme vztah mezi měřeným proudem a proudem, který udává ampérmetr:

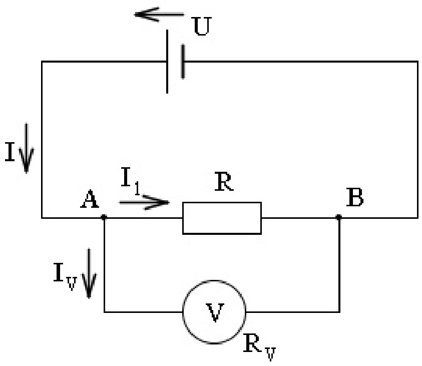
$$I = I_A\left(1 + \frac{R_A}{R_B}\right) \qquad 3.2.\text{-}62$$

Chceme-li rozsah ampérmetru zvětšit *n*-krát, požadujeme-li tedy $I_A = I/n$, potom:

$$R_B = \frac{R_A}{n-1} \qquad 3.2.\text{-}63$$

B) Zapojení voltmetru do obvodu:

Napětí je rozdíl potenciálů mezi dvěma body obvodu, proto je nutné voltmetru připojit do obvodu ke dvěma místům vodiče odporu R s různými potenciály, tedy vždy paralelně k větvi, na jejíchž koncích napětí měříme (viz Obr. 3.2.-13).



Obr. 3.2.-13

Aby připojení voltmetru do obvodu nezpůsobilo znatelnou změnu v obvodu, musí být vnitřní odpor voltmetru co největší! $R_V >> R$.

Analogicky jako u ampérmetru lze zvětšit rozsah voltmetru připojením předřadného odporu R_p, který se připojí do série s vnitřním odporem voltmetru R_V. Měřené napětí U se tedy rozdělí na napětí U_p a U_V:

$$U = U_p + U_V \qquad 3.2.\text{-}64$$

Pro poměr napětí potom platí:

$$\frac{U_p}{U_V} = \frac{R_p}{R_V} \qquad 3.2.\text{-}65$$

Spojením těchto rovnic dostaneme vztah mezi měřeným napětím a údajem, který je na voltmetru:

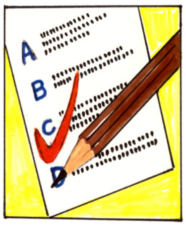
$$U = U_V\left(1 + \frac{R_p}{R_V}\right) \qquad 3.2.\text{-}66$$

Chceme-li rozsah ampérmetru zvětšit *n*-krát, požadujeme-li tedy $U_A = U/n$, potom:

$$R_p = R_V\left(n-1\right) \qquad 3.2.\text{-}67$$

KO 3.2.-18. Vyslovte a matematicky zapište oba Kirchhoffovy zákony.
KO 3.2.-19. Uzel je místo v obvodu, kde se vodivě setkávají alespoň dva vodiče?
KO 3.2.-20. Každá větev v elektrickém obvodu musí obsahovat jen jediný prvek daného druhu, tj. jeden rezistor, jeden kondenzátor, jeden zdroj…

KO 3.2.-21. Při měření proudu v obvodu používáme ampérmetr, který řadíme do série s měřenou větví? A proč?
KO 3.2.-22. Jakým způsobem se provádí zvětšení rozsahu voltmetru?



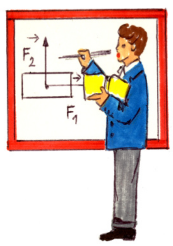
TO 3.2.-17. Pokud jsou v elektrickém obvodu dva uzly, kolik rovnic pro algebraický součet proudů v uzlu (1. Kirchhoffův zk.) potřebujeme?
a) jednu b) dvě c) tři

TO 3.2.- 18. Vyjde-li nám při řešení elektrických sítí proud v některé větvi záporný, co to znamená?

a) špatně sestavená soustava rovnic na základě Kirchhoffových zákonů
b) chybné matematické úpravy při řešení správně sestavených rovnic
c) opačná skutečná orientace proudu v obvodu
d) skutečná hodnota proudu je převrácenou hodnotou vypočítaného proudu

TO 3.2.-19. K čemu se v elektrických obvodech využívá bočník?

a) změna rozsahu voltmetru
b) změna rozsahu ampérmetru
c) k měření driftové rychlosti nabitých částic ve vodiči
d) k měření tepla vytvořeného při rpůchodu proudu vodičem na základě Joule-Lenzova zákona



Voltmetr s vnitřním odporem R_V = 25 kΩ do U_m = 25V má sloužit k měření napětí do $U_m{}'$ = 250 V. Jakou úpravu provedeme?

Do obvodu je nutné připojit předřadný odpor tak, aby byl v sérii s vnitřním odporem voltmetru. Tím se měřené napětí $U_m{}'$rozdělí na napětí na voltmetru U_m a zbytek na napětí na předřadném odporu R_p.
Bude tedy platit:

$$U_m{}' = U_m + I \cdot R_P \,,$$

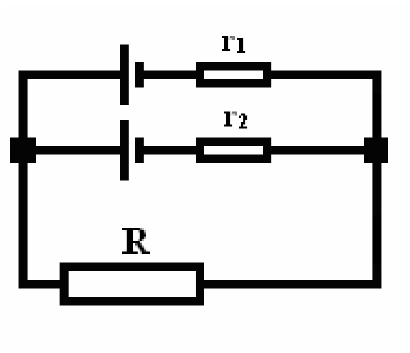
kde $U_m = I \cdot R_V$

Porovnáním těchto vztahů dostaneme rovnici pro hledaný odpor přídavného rezistoru:

$$R_P = \left(U_m{}' - U_m\right) \cdot \frac{R_V}{U_m}$$

Po číselném dosazení: R_P = 225 kΩ

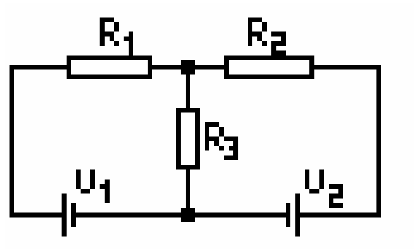
U 3.2.-14. Určete, jak velký proud dodávají do reostatu o ohmickém odporu 10Ω dva paralelně spojené zdroje o stejném elektromotorickém napětí (EMN) 6V, ale s různým vnitřním odporem 2Ω a 3Ω (viz Obr.3.2.-14.).



Obr. 3.2.-14.

Poznámka: Nechť např. do levého uzlu vstupuje proud I a proudy I_1, I_2 z něj vystupují; přičemž I_1 proud prochází zdrojem o EMN U_{e1} a vnitřním odporu r_1, proud I_2 prochází zdrojem o EMN U_{e2} a vnitřním odporu r_2. Směr postupu v obou smyčkách je např. kladný, tj. proti směru hodinových ručiček.

U 3.2.-15. Vypočtěte proud I_3 procházející rezistorem o odporu R_3 v síti vodičů podle Obr. 3.2.-15.Hodnoty napětí a odporů jsou: U_1 = 20V, U_2 = 30V, R_1 = 200Ω, R_2 = 50Ω, R_3 = 100Ω.



Obr. 3.2.-15.

U 3.2.-16. Jaký odpor musíme předřadit miliampérmetru do I_a = 100mA, má-li se s ním měřit při napětí do U = 300V, je-li odpor cívky přístroje R_a = 50Ω ?

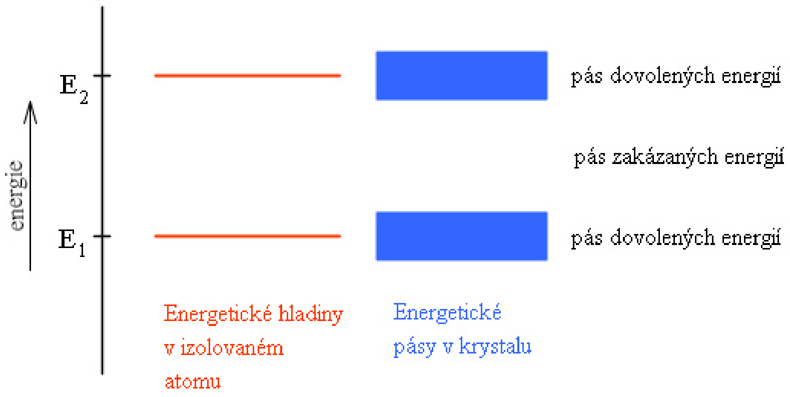
U 3.2.-17. Máme použít miliampérmetr, který má rozsah I_m = 100mA a odpor cívky R_a = 2,9 Ω, a to k měření proudů do $I_m´$= 3A. jakým způsobem to lze provést a jakou součástku k tomu musíme využít?

3.2.7. Termoelektrické jevy

1. Definovat základní energetické hladiny a pásy v osamoceném atomu a v krystalech.
2. Znát rozdíl v pásových diagramech vodičů a dielektrik.
3. Určit rozdíl mezi energetickými hladinami a energetickými pásy.
4. Definovat Fermiho hladinu.
5. Znát pojmy: dynamická rovnováha, kontaktní rozdíl potenciálů.
6. Charakterizovat jevy: Seebeckův, Peltiérův a Thomsonův.

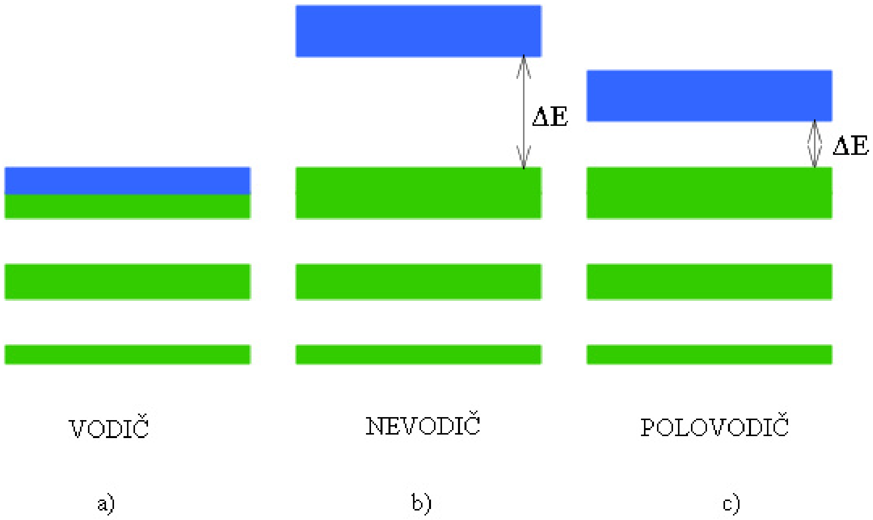
Pásový model pevných látek

Teplotní závislost odporu kovů a vznik tepla při průchodu proudu kovy potvrzují představy o tzv. elektronovém plynu, který je tvořen volnými elektrony kovech. Přestože vodivostní elektrony v kovu jsou volné a mají určitou kinetickou energii, za normálních podmínek při běžných teplotách však nelez pozorovat, že by tyto elektrony z kovu samostatně vystupovaly do vakua.. U povrchu kovu tedy existuje elektrické pole, které elektrony vrací zpět do kovu – elektrony se v látce nacházejí v poli kladných jader atomů. Elektrony mají v tomto poli zápornou potenciální energii. Protože je jejich kinetická energie menší než potenciální, je celková energie elektronů záporná. Energie elektronů je **kvantována**, proto v osamoceném atomu tvoří oddělené (diskrétní) energetické hladiny. V pevných látkách (kdy dochází k interakci více atomů) se tyto hladiny rozpadají do pásů tvořených velkým počtem velmi blízkých hladin energie (Obr. 3.2.-16).



Obr. 3.2.-16

Obrázek 3.2.-17 představuje tzv. pásový **diagram** (resp. pásový **model**) pevných látek. Tento diagram je pro vodiče, polovodiče a dielektrika velmi odlišný, zejména oním zakázaným pásem, který představuje potenciálovou bariéru (Obr. 3.2.-15). Pásový diagram u kovů je tvořen překrývajícím se vodivostním a valenčním pásem, což způsobuje velmi dobrou vodivost kovů. Způsob obsazení energetických hladin závisí na teplotě dané látky. U kovů při teplotách blízkých 0 K se nejvyšší obsazená hladina ve vodivostním pásu označuje jako Fermiho hladina. U izolantů a polovodičů prochází hladina Fermiho energie středem zakázaného pásu.



Obr. 3.2.-17.

Práce spojená s překonáním zakázaného pásu elektronem se nazývá výstupní práce. Elektron může opustit kov pouze tehdy, má-li kinetickou energii rovnající se alespoň potřebné výstupní práci odpovídající energii zakázaného pásma Δ*E*.

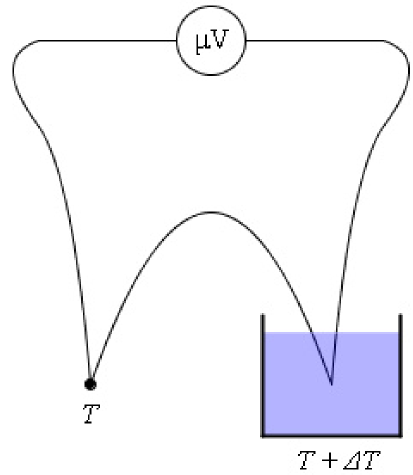
Kontaktní (dotykový) rozdíl potenciálů

Různé kovy mají různé hodnoty výstupní práce elektronů z kovu, přičemž při dotyku těchto kovů vzniká tzv. **kontaktní potenciál**. Elektrony přecházejí z kovu o menší výstupní práci do kovu s větší výstupní prací, díky tomu se kov s menší výstupní prací nabíjí **kladně** a kov s větší výstupní prací se nabíjí **záporně**. Rozdíl jejich potenciálů se nazývá **kontaktní napětí**. Velikost kontaktního rozdílu potenciálů závisí na teplotě. Spojíme-li vodivě dva různé kovy, začnou společným rozhraním přecházet tepelným pohybem elektrony z jednoho kovu do druhého. Oba kovy se nabijí opačně. Tím vznikne na rozhraní dvou kov elektrické pole, které pak již zabraňuje dalšímu zvyšování rozdílu náboje. Ustaví se **dynamická rovnováha**, při níž prochází rozhraním v obou směrech stejný počet elektronů.

Při různých teplotách dvou styčných míst dvou různých kovů se v každém spoji utvoří dynamická rovnováha při rozdílných hodnotách kontaktních napětí. Uzavřeme-li takový obvod, součet napětí bude různý od nuly, v obvodu vznikl zdroj elektromotorického napětí. tento jev nazýváme **termoelektrický. Termočlánkem** nazýváme dva různé kovy A a B spojené na dvou místech udržovaných při různých teplotách (viz Obr. 3.2.-18). Tento jev objeven r. 1821 se nazývá **Seebeckův jev**. Termoelektrický proud v uzavřeném obvodu je způsoben termoelektrickým napětím v důsledku rozdílných teplot spojů – velikost závisí na materiálu a na teplotním rozdílu mezi spoji. Přibližně platí:

$$U = k\Delta T\,, \qquad 3.2.\text{-}68$$

kde konstanta úměrnosti k závisí na dvojici kovů.

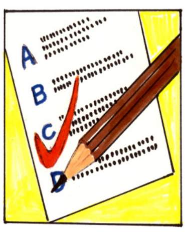


Obr. 3.2.-18.

Inverzním jevem k Seebeckovu je tzv. **Peltiérův jev**, který byl objeven r. 1834. Při průchodu proudu spojem dvou kovů se uvolňuje teplo ze spoje (spoj se ohřívá), anebo se z okolí teplo pohlcuje (spoj se ochlazuje).

W. Thomson v roce 1851 zjistil, že při vyvolání teplotního spádu na vodiči jednoho druhu vznikne na koncích nepatrné termoelektrické napětí, které však nemá praktický význam. Elektrické pole ve vodiči směřuje od teplejšího konce ke studenějšímu. Intenzita vtištěných sil vyvolaná teplotním spádem způsobující přemístění elektronů má směr opačný. Hovoříme o tzv. **Thomsonově jevu**.

KO 3.2.-23. Co je to dynamická rovnováha?
KO 3.2.-24. Na čem závisí hodnota termoelektrického napětí na spoji dvou vodičů o různých teplotách?
KO 3.2.-25. Čím se liší energetické oblasti dovolených a zakázaných energií u izolovaných atomů a krystalů?



TO 3.2.-20. Vodivostní a valenční pás se překrývají u:
a) vodičů b) dielektrik c) polovodičů

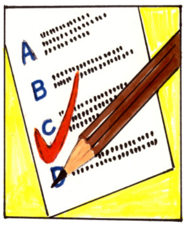
TO 3.2.-21. Jakou energii mají elektrony v poli atomových jader?
a) vždy kladnou
b) vždy zápornou
c) kladnou nebo zápornou, podle druhu atomů v krystalové mříži
d) vždy nulovou

TO 3.2.-22. Které dva termoelektrické jevy jsou k sobě vzájemně inverzní?
a) Thomsonův a Peltiérův
b) Thomsonův a Seebeckův
c) Joulův a Seebeckův
d) Seebeckův a Peltiérův

- Elektrický proud je uspořádaným pohybem elektricky nabitých částic.
- Okamžitý elektrický proud je skalární veličina: $I = \dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}$
- Technický směr proudu je směr pohybu kladných nábojů. Stanoveno dohodou.
- Závislost elektrického proudu na driftové rychlosti nabitých částic: $I = nev_d\, S$
- Proudová hustota je vektorová veličina daná vztahem: $\boldsymbol{j} = \dfrac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}\boldsymbol{S}}$
- Souvislost mezi proudovou hustotou a driftovou rychlostí: $\boldsymbol{j} = ne\boldsymbol{v}_{\boldsymbol{D}}$
- Ohmův zákon v diferenciálním tvaru: $\boldsymbol{j} = \gamma \boldsymbol{E}$
- Ohmův zákon v integrálním tvaru: $I = \dfrac{U}{R}$
- Elektrický odpor vodiče: $\rho \dfrac{l}{S}$
- Teplotní závislost elektrického odporu: $R_T = R_0 \left(1 + \alpha \Delta T\right)$
- Sériové zapojení rezistorů: $R = \sum\limits_{j=1}^{n} R_j$
- Paralelní zapojení rezistorů: $\dfrac{1}{R} = \sum\limits_{j=1}^{n} \dfrac{1}{R_j}$
- Elektromotorické napětí – napětí nezatíženého zdroje: $U_e = \dfrac{\mathrm{d}W_e}{\mathrm{d}Q} = \int \vec{E}\, \mathrm{d}\vec{r}$
- Ohmův zákona pro jednoduchý elektrický obvod: $U_e = \left(R + R_i\right) I$
- Výkon elektrického proudu ve vodiči: $P = U I = R I^2 = \dfrac{U^2}{R}$
- Joule – Lenzův zákon:
- 1. Kirchhoffův zákon: $\sum\limits_{k=1}^{n} I_k = 0$
- 2. Kirchhoffův zákon: $\sum\limits_{k=1}^{n} U_{ek} = \sum\limits_{j=1}^{m} R_j I_j$
- Zvětšení rozsahu ampérmetru bočníkem: $I = I_A \left(1 + \dfrac{R_A}{R_B}\right)$
- Zvětšení rozsahu voltmetru předřadným odporem: $U = U_V \left(1 + \dfrac{R_p}{R_V}\right)$
- Termoelektrické napětí u Seebeckova jevu: $U = k \Delta T$

KLÍČ

KO 3.2.-1. Skalární.
KO 3.2.-2. A – ampér, základní jednotka soustavy SI.
KO 3.2.-3. Žádný výsledný tok náboje neexistuje, současně ve stejném množství a ve stejném směru „teče“ kladný i záporný náboj. Technický směr proudu je stanoven dohodou.
KO 3.2.-4. Kondukční, konvekční, posuvný. Nebo také: stejnosměrný, střídavý, stacionární. (Více v textu obou prvních kapitol.)
KO 3.2.-5. Vektorová.
KO 3.2.-6. Ne, je to úhel svírající vektor hustoty proudu s normálou této plošky.
KO 3.2.-7. Proudová hustota je přímo úměrná intenzitě, viz vztah 3.2.-15 – Ohmův zákon v diferenciálním tvaru.
KO 3.2.-8. $(\Omega.\mathrm{m})^{-1}$, vlastní název nemá.
KO 3.2.-9. Jedná se o tzv. materiálové konstanty, které jsou pro každou látku jiné, avšak daná látka při běžných teplotách tyto hodnoty nemění.
KO 3.2.-10. Ano.
KO 3.2.-11. Stav, při kterém odpor některých kovů klesá k nule.
KO 3.2.-12. Pouze uvnitř zdrojů.
KO 3.2.-13. Ne, mohou být povahy chemické, mechanické apod.
KO 3.2.-14. Ne.
KO 3.2.-15. Ne, maximální.
KO 3.2.-16. Skalární, je určena pouze číselnou hodnotou a jednotkou. Analogicky jako v mechanice.
KO 3.2.-17. Jedná se o jednotku práce (resp. množství spotřebované energie).
KO 3.2.-18. Odpověď přímo v textu: 3.2.-58 a 3.2.-59
KO 3.2.-19. Alespoň tři!
KO 3.2.-20. Ne, v dané větvi může být libovolná kombinace těchto prvků.
KO 3.2.-21. Ano, aby tímto prvkem procházel stejný proud jako danou větví.
KO 3.2.-22. Pomocí předřadného odporu zapojeného sériově s voltmetrem.
KO 3.2.-23. Stav, kdy na rozhraní dvou různých kovů vznikne el. pole, které umožňuje prostup stejného počtu elektronů v obou směrech.
KO 3.2.-24. Napětí je přímo úměrné teplotnímu rozdílu vodičů a závisí také na materiálu vodičů.
KO 3.2.-25. V případě osamocených atomů jsou to energetické hladiny, které v případě krystalů přecházejí v pásy tvořené velkým počtem blízkých hladin.



TO 3.2.-1. b)c)
TO 3.2.-2. c)
TO 3.2.-3. b)
TO 3.2.-4. b)
TO 3.2.-5. a) nelze stanovit, proud není konstantní, $I = 6t^2$
TO 3.2.-6. a)
TO 3.2.- 7. c)
TO 3.2.-8. d)
TO 3.2.-9. a)
TO 3.2.-10. b)
TO 3.2.-11. e)
TO 3.2.-12. b) nezatížený
TO 3.2.-13. a) vždy
TO 3.2.-14. c) 1,6 V
TO 3.2.-15. b) Joule-Lenzův
TO 3.2.-16. a) b)
TO 3.2.-17. a) jednu
TO 3.2.-18. c)
TO 3.2.-19. b)
TO 3.2.-20. a) vodičů
TO 3.2.-21. b) vždy zápornou
TO 3.2.-22. d) Seebeckův a Peltiérův

U 3.1.-1. a) 50 C, b) 15 C, $I = 0{,}3\ t$
U 3.1.-2. S = 1,22 mm^2
U 3.2.-3. 10 Ω, 0,6 A
U 3.2.-4. 1 μA
U 3.2.-5. 2,5 mm
U 3.2.-6. 22,23 Ω (v obou případech)
U 3.2.-7. Železná tyčinka musí být 444-krát delší než uhlíková.
U 3.2.-8. 1,2 Ω
U 3.2.-9. 1,07 Ω
U 3.2.-10. 14,4 Ω, $4{,}5.10^{-3}\ K^{-1}$
U 3.2.-11. 92 V a 138 V
U 3.2.-12. 1:4

U 3.2.-13. 11 A
U 3.2.-14. I = - 0,535 A. Mínus znaménko ve výsledku velikosti proudu znamená, že původně zvolený směr proudu ve schématu musíme opravit na směr opačný (platí pro ty, kdo se drželi poznámky a postupovali podle nápovědy!)
U 3.2.-15. 0,2 A
U 3.2.-16. 2950 Ω
U 3.2.-17. bočník, 0,1 Ω