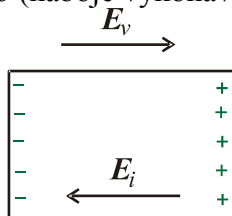


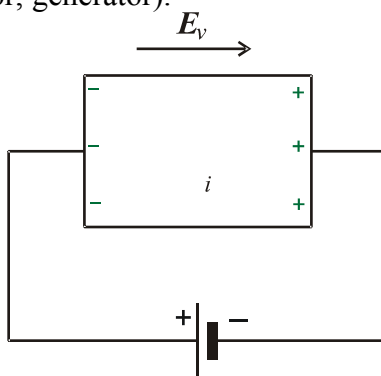
## Stejnoseměrný proud I

Dosud jsme se při studiu elektrického pole zabývali **elektrostatikou**, která studuje elektrické náboje v klidu. V dalších kapitolách budeme studovat pohybující se náboje – elektrický proud. Při diskusi o elektrickém poli ve vodiči bylo dokázáno, že vložíme-li vodič do vnějšího elektrického pole (obr. 9.1), ve vodiči se indukují náboje, které vytvoří indukované elektrické pole stejně velké a opačně orientované. Výsledná intenzita ve vodiči je nulová a náboje nevykonávají žádný usměrněný pohyb (náboje vykonávají pouze náhodný tepelný pohyb).



Obr. 9.1: Elektrické pole ve vodiči je nulové

Nemají-li se ve vodiči indukovat náboje, připojme na protilehlé strany přístroje zařízení (obr. 9.2), které bude z levé strany vodiče odebírat záporný náboj (nebo přidávat kladný, který se s indukovaným záporným vyruší) a přidávat ho na pravou stranu (kde se vyruší s indukovaným kladným nábojem). Takovému zařízení říkáme **zdroj elektrického napětí** (může to být baterie, akumulátor, generátor).



Obr. 9.2: Vodič připojený ke zdroji elektrického napětí

Zdroj na svých svorkách udržuje konstantní potenciálový rozdíl – napětí. Zdroj značíme dvěma rovnoběžnými úsečkami (obr. 9.2), kde kratší široká značí záporný pól a delší tenká kladný pól zdroje.

## Elektrický proud

V obvodu na obrázku 9.2 udržuje zdroj ve vodiči konstantní elektrické pole. Volné náboje se v tomto elektrickém poli pohybují. To znamená, že libovolným průřezem vodiče prochází elektrický náboj. Takový pohyb náboje se nazývá elektrický proud.

**Elektrický proud** je skalární veličina, která vyjadřuje množství náboje prošlého průřezem vodiče za jednotku času.

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (9.1)$$

Jednotkou elektrického proudu je ampér – značka A. Ampér je základní jednotkou SI.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem  
a státním rozpočtem České republiky



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

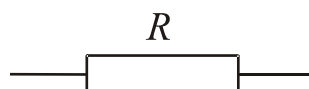
Směr elektrického proudu definujeme jako směr pohybu kladného náboje. Ve skutečnosti jsou v kovech za vedení proudu zodpovědné záporné elektrony a směr proudu je docela nelogicky opačný než směr pohybu elektronů. Je to důsledkem toho, jak nešťastně Benjamin Franklin (1706-1790) definoval náboje skleněné a ebonitové tyče (že existují elektrony bylo zjištěno až sto let po jeho smrti, tak se na něj nemůžeme zlobit).

Připojíme-li stejný zdroj k různým vodičům, naměříme různý proud, protože každý vodič vede proud jinak dobře. Veličinou charakterizující, jaký odpor klade vodič elektrickému proudu, nazýváme **elektrický odpor** nebo také rezistance. Odpor je definován vztahem

$$R = \frac{U}{I}. \quad (9.2)$$

Jednotkou elektrického odporu je ohm – značka  $\Omega$ .

Součástka, která má elektrický odpor, se nazývá **rezistor** a schematicky se zakresluje podle obr. 9.3.



Obr. 9.3: Rezistor

Převrácenou hodnotou odporu je **vodivost**  $G = 1/R$ . Jednotkou vodivosti je siemens – značka  $S = \Omega^{-1}$ .

Odpor je vlastností součástky a závisí jednak na materiálu, ze kterého je vyrobena, jednak na jejích rozměrech.

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (9.3)$$

kde  $\rho$  je materiálová charakteristika, která se nazývá **rezistivita**,  $l$  je délka vodiče a  $S$  plocha jeho průřezu.

V názvosloví této části fyziky je docela zmatek. Pro odpor se můžeme setkat s označením rezistance, rezistor se často nazývá odpor, a místo rezistivita se můžeme setkat s názvy měrný odpor nebo specifický odpor. My se přidržujeme názvosloví, které použili překladatelé učebnice Halliday et al. – Fyzika.

## Ohmův zákon

Vztah (9.2) definuje elektrický odpor, ale neříká nic o tom, jestli odpor závisí na napětí, které je na rezistor přivedeno. Ohmův zákon klade další omezení na (9.2).

### Ohmův zákon

Napětí ve vodiči je přímo úměrné procházejícímu proudu.

$$U = RI. \quad (9.4)$$

Ohmův zákon platí jen pro některé materiály, neplatí například pro proud tekoucí v kapalinách nebo plynech. Materiálům, které se řídí Ohmovým zákonem, říkáme **ohmické**. Ohmické jsou pevné látky, zejména kovy. Přísně vzato Ohmův zákon neplatí ani pro kovy, protože se zvyšujícím se proudem se zvyšuje teplota materiálu a s rostoucí teplotou rezistivita kovu roste.

### Ohmův zákon v integrálním tvaru

Tak, jak je Ohmův zákon zapsán (9.4), se nazývá **Ohmův zákon v integrálním tvaru**. Pojem integrální by se možná dal přeložit jako celkový – tím je míněno, že celkové napětí na rezistoru je dáno součinem celkového jeho odporu a celkového proudu, který jím protéká. Bez

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem  
a státním rozpočtem České republiky



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

ohledu na to, že rezistor může mít v různých místech různou rezistivitu a různými místy tak teče různý proud a je na nich různé napětí.

### Ohmův zákon v diferenciálním tvaru

V předchozí kapitole jsme řekli, že vztah (9.4) platí pro vodič jako celek. Ohmův zákon v diferenciálním tvaru se zabývá napětím a proudem v určitém místě vodiče. Proud, který teče určitým místem vodiče, lze charakterizovat **hustotou proudu  $j$** :

$$j = \Delta I / \Delta S = dI / dS. \quad (9.5)$$

V mikroskopickém pohledu lze přiřadit nábojům v daném místě vodiče směr pohybu. Směr vektoru  $j$  definujeme jako směr pohybu kladných nábojů.

Uvažujme v mikroskopickém pohledu, na čem závisí náboj, který projde za jednotku času průřezem vodiče. Náboj  $dQ$ , který projde průřezem vodiče je úměrný rychlosti  $v$  se kterou se nositelé náboje (většinou elektrony) pohybují, počtu nositelů náboje v jednotce objemu vodiče  $n$ , náboji jednoho nositele (většinou náboj elektronu)  $e$ , plochou průřezu vodiče  $S$  a dobou po kterou pohyb nábojů sledujeme  $dt$ :

$$dQ = v \cdot S \cdot n \cdot e \cdot dt .$$

$$I = dQ/dt = v \cdot S \cdot n \cdot e .$$

Rovnici vydělíme plochou průřezu vodiče  $S$  a zapíšeme vektorově s tím, že hustota proudu má stejný směr jako rychlost:

$$j = n \cdot e \cdot v. \quad (9.6)$$

Počet nositelů náboje v jednotce objemu i náboj jednoho nositele jsou konstanty. Zbývá určit střední rychlost nositelů. Nositelé náboje o hmotnosti  $m$  jsou urychlovány elektrickým polem o intenzitě  $E$ , které na ně působí silou  $F = eE$  a uděluje jim zrychlení  $a = F/m = eE/m$ . Nositelé se při svém pohybu srážejí s ostatními nositeli a atomy krystalové mřížky. Označíme-li střední dobu mezi srážkami  $\tau$ , střední rychlost bude  $v = at = eE\tau/m$ . Tuto rychlost nyní dosadíme do (9.6):

$$j = \frac{ne^2\tau}{m} E . \quad (9.7)$$

Dosadíme-li do Ohmova zákona (9.4) za odpor (9.3)

$$U = RI = \rho \frac{l}{S} I$$

a uvědomíme si, že  $j = I/S$  a  $E = U/l$ , lze Ohmův zákon napsat jako

$$j = \frac{1}{\rho} E . \quad (9.8)$$

To je **Ohmův zákon v diferenciálním tvaru**. Srovnáním s (9.7)

$$\frac{1}{\rho} = \frac{ne^2\tau}{m} . \quad (9.9)$$

Podarilo se nám navíc najít vztah mezi makroskopickou veličinou  $\rho$  a mikroskopickými veličinami  $n$ ,  $e$ ,  $t$  a  $m$ .

### Spojování rezistorů

Mějme dva rezistory o odporech  $R_1$  a  $R_2$ . Budeme se zabývat otázkou, jaký odpor bude mít tato dvojice při různých způsobech zapojení.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem  
a státním rozpočtem České republiky



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## Sériové zapojení

Zapojení součástek podle obr. 9.4 nazýváme sériové nebo také za sebou. Při tomto zapojení se napětí přivedené na soustavu rozdělí mezi jednotlivé součástky, platí

$$U = U_1 + U_2. \quad (9.10)$$

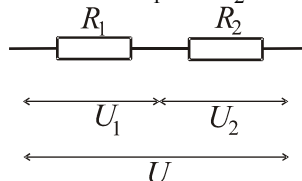
Proud, který teče rezistorem  $R_1$ , musí téct i rezistorem  $R_2$

$$I = I_1 = I_2. \quad (9.11)$$

Do (9.10) dosadíme za napětí (9.4)  $U = R \cdot I$

$$RI = R_1I_1 + R_2I_2,$$

s uvážením (9.11) pak

$$R = R_1 + R_2. \quad (9.12)$$


Obr. 9.4: Sériové zapojení rezistorů

## Paralelní zapojení

Zapojení součástek podle obr. 9.5 nazýváme paralelní nebo také vedle sebe. Při tomto zapojení se proud přivedený na soustavu rozdělí mezi jednotlivé součástky, platí

$$I = I_1 + I_2. \quad (9.13)$$

Napětí na obou rezistorech je stejné

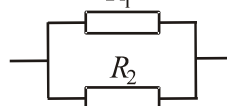
$$U = U_1 = U_2. \quad (9.14)$$

Vyjádríme z (9.4) proud  $I = U/R$  a dosadíme do (9.13)

$$\frac{U}{R} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2}. \quad (9.15)$$

s uvážením (9.14) pak

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (9.16)$$



Obr. 9.5: Paralelní zapojení rezistorů

## Elektrické měřicí přístroje

Elektrické měřicí přístroje slouží k měření fyzikálních veličin v elektrických obvodech.

### Galvanometr

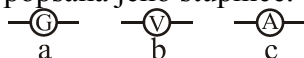
Základním měřicím přístrojem je galvanometr, který se schematicky značí podle obr. 9.6a. Galvanometr byl konstruován jako cívka protékaná proudem v magnetickém poli. Galvanometr je velmi citlivý ampérmetr, jehož základními charakteristikami jsou maximální proud  $I_{max}$  (proud, při kterém ručička ukáže maximální výchylku) a vnitřní odpor  $R_G$  (v podstatě odpor cívky). V současné době byly ručičkové přístroje nahrazeny digitálními,

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem  
a státním rozpočtem České republiky



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

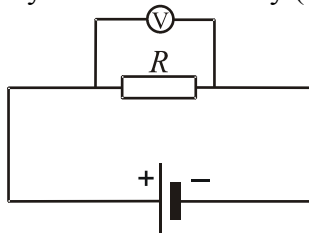
jejichž základem je AD (analogově-digitální) převodník. Základními charakteristikami jsou maximální napětí  $U_{max}$  a vnitřní odpor  $R_G$ . Mezi starým a novým principem měření ale není rozpor, protože i galvanometru můžeme přiřadit maximální napětí  $U_{max} = R_G I_{max}$  a naopak převodníku maximální proud. Lze tedy napsat, že galvanometr je citlivý ampérmetr nebo voltmetr v závislosti na tom, jak je popsána jeho stupnice.



Obr. 9.6: Značka galvanometru (a), voltmetru (b) a ampérmetru (c)

### Voltmetr

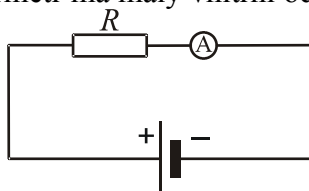
Voltmetr je přístroj sloužící k měření elektrických napětí, schematicky se značí podle obr. 9.6b. Voltmetr se zapojuje do obvodu paralelně k součástce, na níž měříme napětí (obr. 9.7) (při paralelním zapojení je na voltmetru a součástce stejné napětí). Ideální voltmetr má nekonečně velký vnitřní odpor, reálný voltmetr má velký (ale konečný) vnitřní odpor.



Obr. 9.7: Zapojení voltmetru do obvodu

### Ampérmetr

Ampérmetr je přístroj sloužící k měření elektrických proudů, schematicky se značí podle obr. 9.6c. Ampérmetr se zapojuje do obvodu sériově se součástkou, jejíž proud měříme (obr. 9.8) (při sériovém zapojení teče součástkou a ampérmetrem stejný proud). Ideální ampérmetr má nulový vnitřní odpor, reálný ampérmetr má malý vnitřní odpor.

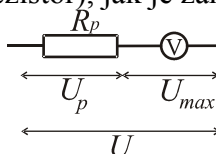


Obr. 9.8: Zapojení ampérmetru do obvodu

## Změna rozsahu elektrických měřicích přístrojů

### Voltmetr

Předpokládejme, že máme voltmetr (nebo galvanometr) s rozsahem do  $U_{max} = 10$  V a vnitřním odporem  $R_V = 100 \Omega$ . Je třeba měřit napětí do  $U = 1000$  V. Kdybychom tento voltmetr připojili přímo na 1000 V, poškodil by se. Je třeba zapojit voltmetr tak, aby na něm při napětí 1000 V bylo jen 10 V. Napětí se rozdělí, jsou-li součástky zapojeny sériově. Zapojme tedy před voltmetr rezistor  $R_p$  (předřadný rezistor), jak je zakresleno na obr. 9.9.



Obr. 9.9: Změna rozsahu voltmetru

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

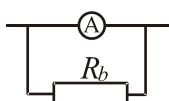
Napětí  $U$  se rozdělí na  $U_p$  a  $U_{max}$ . Přitom oběma součástkami teče stejný proud  $I = U_{max} / R_V$ . Předřadný rezistor musí mít takový odpor, aby na něm při proudu  $I$  bylo napětí  $U_p = U - U_{max}$ .

$$R_p = \frac{U_p}{I} = \frac{U - U_{max}}{\frac{U_{max}}{R_V}} = R_V \frac{U - U_{max}}{U_{max}} \quad (9.17)$$

Dosadíme-li číselně,  $R_p = 9900 \Omega$ .

### Ampérmetr

Předpokládejme, že máme ampérmetr (nebo galvanometr) s rozsahem do  $I_{max} = 0,001 \text{ A}$  a vnitřním odporem  $R_A = 10 \Omega$ . Je třeba měřit proud do  $I = 10 \text{ A}$ . Proud  $10 \text{ A}$  nemůžeme do ampérmetru pustit. Ampérmetr se musí zapojit tak, aby při proudu  $10 \text{ A}$  ampérmetrem teklo jen  $0,001 \text{ A}$ . Proud je nutno rozdělit. Proud se rozdělí, jsou-li součástky zapojeny paralelně (obr 9.10).



Obr. 9.10: Změna rozsahu ampérmetru

Připojíme proto paralelně k ampérmetru rezistor  $R_b$ , nazývaný bočník a necháme jím téct přebytek proudu. Napětí na obou součástkách je stejné. Na ampérmetru s odporem  $R_A$ , kterým teče proud  $I_{max}$ , je napětí  $U = R_A I_{max}$ . Bočníkem musí při napětí  $U$  téct proud  $I_b = I - I_{max}$ .

$$R_b = \frac{U}{I_b} = \frac{R_A I_{max}}{I - I_{max}} \quad (9.18)$$

Po dosazení  $R_b = 0,001 \Omega$ .

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem  
a státním rozpočtem České republiky



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ