2. USTÁLENÝ ELEKTRICKÝ PROUD

V elektrostatice jsme předpokládali, že elektrické náboje jsou ve zvolené souřadné soustavě nehybné. S pohybem elektricky nabitých částic jsou spojené kvalitativně nové, elektrodynamické jevy, zejména elektrický proud a elektromagnetické pole. Časově neproměnné elektrické pole je zvláštním případem pole elektromagnetického, které vzniká jestliže jsou elektrické náboje v klidu. Elektricky nabité částice, které se pohybují, vytvářejí vedle elektrického pole také pole magnetické. Obecně existuje v prostoru kolem elektrických nábojů v pohybu elektromagnetické pole. Při ustáleném pohybu nábojů je toto pole stejné jako elektrostatické pole k němuž se přičítá ještě magnetické pole. To odpovídá velmi speciální situaci, kdy rozložení nábojů v prostoru je stále stejné, ale náboje se rovnoměrným pohybem stále přemisťují. Tomuto typu pole říkáme stacionární elektromagnetické pole, skládá se z elektrického pole totožného s polem elektrostatickým a stálého magnetického pole vznikajícího v důsledku ustáleného pohybu elektrických nábojů.

V této kapitole budeme zkoumat zákonitosti, které souvisejí s pohybem elektricky nabitých částic, ale zatím si nebudeme všímat magnetického pole, které je důsledkem tohoto pohybu. Pokud studujeme jen elektrickou část stacionárního elektromagnetického pole mluvíme obvykle o stacionárním elektrickém poli. Znovu připomínáme, že v dalším budeme místo přesného vyjadřování "pohyb elektricky nabitých částic", "vzájemné působení nabitých částic" apod. mluvit z důvodu stručnosti pouze o "pohybu nábojů" apod.

Uspořádaný pohyb elektrických nábojů nazýváme elektrický proud. Pokud je realizován pohybem nabitých těles (na př. pohybem nabitého pásu Van der Graaffova generátoru), nazýváme tento prou konvekčním. Obvykle jde o pohyb elektricky nabitých částic uvnitř látek. Tento typ proudu nazýváme kondukčním.

2.1 Vznik a základní charakteristiky elektrického proudu

Zatím jsme se zabývali silami mezi náboji a rozmístěním nábojů v důsledku působení těchto sil ve vodičích. Nyní ¨budeme studovat pohyb náboje ve vodiči, je-li uvnitř vodiče udržováno elektrické pole. Jak jsme již uvedli, nazýváme vodičem takovou látku, v níž jsou volné elektricky nabité částice. Tyto částice se pohybují náhodným pohybem jehož střední rychlost je určena teplotou vodiče, přičemž jsou všechny směry zastoupeny stejně. Volné nabité částice v kovech jsou elektrony, v elektrolytech kladné a záporné ionty. Také plyn může být za určitých okolností vodičem s volnými náboji obojího znaménka. V dalším se budeme zabývat pouze kovovými vodiči, v nichž jsou pohyblivými náboji elektrony. V kovech se elektrony během pohybu neustále sráží s ionty krystalové mřížky kovu a tato interakce zaručuje stejnou energii tepelného pohybu elektronů i iontů mřížky. Působí-li na elektrony ve vodiči elektrická síla, nevede to ke stále se zrychlujícímu pohybu ve směru působící síly, protože elektrony nejsou v plném smyslu slova volné. Zvýšení rychlosti a tedy i kinetické energie v důsledku působení síly se přenáší díky srážkám s ionty také na tyto ionty a tedy na vodič jako celek. Z hlediska pohybu elektronů je situace taková, jako by působila proti síle elektrické ještě síla brzdící, úměrná rychlosti.

Působení elektrické a brzdící síly vede z pohybového hlediska ke vzniku rovnoměrného pohybu ve směru elektrické síly, který se přičítá k náhodnému tepelnému pohybu. Rychlost tohoto rovnoměrného pohybu je určena z rovnosti elektrické síly a brzdící síly. Tato rychlost způsobená účinkem elektrického pole na volné náboje se nazývá driftová rychlost. Vzhledem ke vztahu pro sílu, působící na částice s nábojem q, $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}$, je zřejmé, že elektrony v kovech se pohybují proti směru elektrického pole. Působením elektrického pole ve vodiči

vznikne tedy ve vodiči uspořádaný pohyb volných elektrických nábojů, který představuje kondukční elektrický proud. K zajištění trvalého pohybu volných elektrických nábojů, tj. k získání trvalého proudu, musíme uvnitř vodiče udržovat elektrické pole. Je-li ve vodiči intenzita elektrického pole $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{konst.}$, nastane velmi brzy po zapnutí pole ustálený stav. Proud nezávisí na čase a nazývá se ustálený proud. Bude-li pole proměnné, vznikne proměnný proud. Proud, který nemění svůj směr, se nazývá stejnosměrný. Proud, který periodicky mění svůj směr, se nazývá střídavý. Pokud nesledujeme mimořádně rychlé děje předpokládáme vždy, že vodiče jsou i při průchodu proudu v libovolně zvoleném objemu neutrální, tj. velikost kladného a záporného náboje je v libovolném objemu vodiče stejná.

Jak jsme se již zmínili, po zapnutí elektrického pole vzniká ve vodiči určitý přechodový jev mezi stavem kdy neprochází vodičem proud a stavem kdy je dosaženo ustáleného proudu (pole v této době není stacionární). Doba, za kterou se dosáhne ustáleného proudu po zapnutí pole je podle klasické teorie vodivosti v kovech řádově 10^{-14} s.

Elektrický proud je spojen s pohybem elektrických nábojů a protože pohyb je určen vektorem rychlosti, je také proud vektorovou veličinou. Ve vodičích typu drátů (tj. křivek) mu přisuzujeme určité znaménko. Z historických důvodů považujeme za kladný takový smysl proudu, ve kterém se pohybují kladné elektrické náboje. Kladný smysl proudu je tedy opačný než skutečný pohyb volných elektronů v kovech. Vzhledem k tomu, že při vedení proudu vodiči je libovolný objem vodiče elektricky neutrální, je pohyb kladných nábojů jedním směrem ekvivalentní pohybu záporných nábojů opačným směrem.

Velikost proudu posuzujeme podle množství kladného náboje, který projde průřezem vodiče za jednotku času. Tak dostaneme skalární veličinu

$$I = \frac{dQ}{dt}, \tag{2.1}$$

která se nazývá proud. V této definici je dQ náboj, který projde průřezem vodiče za dobu dt. Jednotkou je *ampér*, $A = C\,s^{-1}$. V soustavě SI se při definici ampéru vychází ze silového působení mezi dvěma rovnoběžnými vodiči, kterými prochází elektrický proud. Tato definice bude uvedena v kapitole 3.4.

Obecně je proud prostorový děj a fyzikální veličina proud může tedy nabývat různých hodnot v různých místech. Proto zavádíme veličinu hustotu proudu. Je to vektor

$$\boldsymbol{i} = \frac{dI}{dS}\boldsymbol{v}^{o}. \tag{2.2}$$

V tomto vztahu je dI proud, procházející ploškou dS, kolmou k rychlosti v kladného náboje. Směr vektoru $\boldsymbol{i}$ je určen jednotkovým vektorem $\boldsymbol{v}^0$ této rychlosti. Velikost vektoru $\boldsymbol{i}$ je

$$i = \frac{dI}{dS}.$$

Proud procházející ploškou dS, která je kolmá k proudové hustotě je tedy vyjádřen vztahem

$$\boldsymbol{dI = i.dS}$$

Tento vztah můžeme psát obecněji, pro libovolnou orientaci plošky dS, budeme-li ji považovat za vektor se směrem normály $d\boldsymbol{S}$. Pak je proud dI vyjádřen skalárním součinem

$$dI = \boldsymbol{i}.d\boldsymbol{S}.$$

Proud vodičem určíme integrací proudové hustoty přes průřez vodiče

$$I = \int_S \boldsymbol{i}.d\boldsymbol{S}. \tag{2.3}$$

Pouze je-li $i = konst.$ v každém místě průřezu vodiče, platí jednoduché vztahy

$$I = i\,S, \quad i = \frac{I}{S}. \tag{2.4}$$

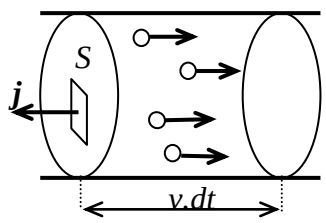
Jednotka proudové hustoty je $i = A\ m^{-2}$, v technické praxi se častěji užívá jednotka $i = A\ mm^{-2}$.

Hustotu proudu můžeme také vyjádřit pomocí prostorové hustoty volného náboje ρ. Ploškou o plošném obsahu dS, postavenou kolmo k driftové rychlosti v kladného náboje, projde za $1\ s$ náboj, obsažený v objemu v dS, takže $dI = \rho \cdot v \cdot dS$ a podle definice hustoty proudu

$$i = \rho v,$$

ve vektorovém tvaru (2.5)

$$\boldsymbol{i} = \rho \boldsymbol{v}.$$



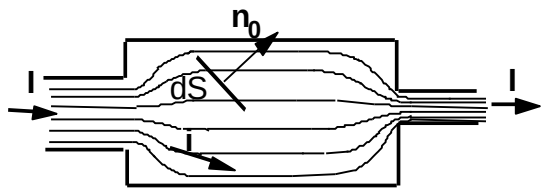
Obr. 2.1 K vyjádření proudové

Fyzikální veličinu proud můžeme vyjádřit také tímto způsobem: nechť S je průřez vodiče, n počet volných elektronů v jednotce objemu a v jejich driftová rychlost. Za časový interval dt postoupí elektrony o vzdálenost $v\ dt$. Elektrony, které prošly průřezem vodiče za dobu dt, jsou tedy obsaženy v objemu $Svdt$. Náboj dQ, prošlý průřezem S v časovém intervalu dt je

$$dQ = Svne\,dt.$$

Podle definice proudu

$$I = \frac{dQ}{dt} = Sven.$$



Obr. 2. 2 Proudové čáry

V každém bodě prostoru, kterým protéká elektrický proud, můžeme pohyb elektrických nábojů charakterizovat vektorem hustoty proudu $\boldsymbol{i}$. Podobně jako v elektrostatickém poli jsme zavedli elektrické siločáry, můžeme ve vodiči sestrojit soustavu čar, k nimž bude vektor $\boldsymbol{i}$ udávat směr tečny. Tyto čáry se nazývají proudové čáry a mohou sloužit ke znázornění směru pohybu elektrických nábojů i ke zná-zornění rozložení hustoty proudu podél průřezu vodiče.

Hustota proudových čar znázorňuje hustotu proudu ve vodiči s proměnným průřezem. Proud ve vodiči musí být stejný v libovolném průřezu vodiče. Z tohoto jednoduchého konstatování vyplývá rovnice kontinuity elektrického proudu. Uvažujeme dva různé průřezy téhož vodiče. Protože proud je v obou stejný

$$I_1 = I_2.$$

Vyjádříme-li proudy pomocí proudových hustot, dostáváme jednoduchý tvar rovnice kontinuity

$$i_1 S_1 = i_2 S_2$$

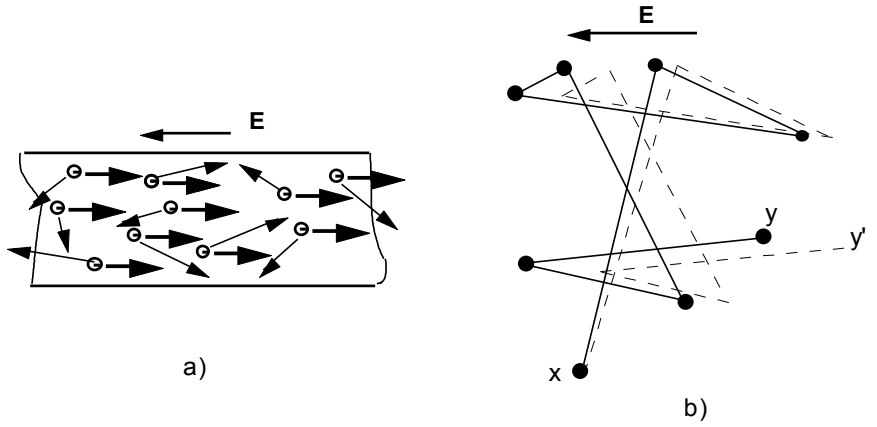
Zvolíme-li uvnitř vodiče s proudem uzavřenou plochu S, musí proud, který do plochy vtéká, také z plochy vytékat. To můžeme matematicky vyjádřit vztahem

$$\oint_s \boldsymbol{i}.d\boldsymbol{S} = 0, \tag{2.6}$$

což je obecný tvar rovnice kontinuity proudu. Tato rovnice vyjadřuje fakt, že v ustáleném proudu se nikde ve vodiči náboj nehromadí nebo jej neubývá.

2. 2 Ohmův zákon

Probereme podrobněji souvislost mezi proudem a elektrickou silou způsobující proud ve vodiči. Pro určitost budeme uvažovat opět kovový vodič. V kovech je elektrický proud vytvořen uspořádaným pohybem volných elektronů. Volnými elektrony rozumíme takové elektrony, které nejsou vázány na určité místo krystalové mřížky struktury kovu. Jak jsme již zdů-



Obr. 2. 3 a) Vliv el. pole na rychlost volných elektronů ve vodiči (tučně je znázorněn vektor driftové rychlosti),
b) Vliv el. pole na dráhu jednoho z volných elektronů (plně dráha bez pole, čárkovaně dráha při působení pole).

raznili, nejsou volné z pohybového hlediska díky vzájemnému působení mezi elektrony a ionty mřížky. Chaotický pohyb elektronů v kovech nevede k makroskopicky pozorovatelnému přemísťování náboje. Při neuspořádaném pohybu od jednoho atomu k druhému vstoupí do určité oblasti vodiče za jednotku času z různých směrů právě tolik elektronů, kolik jich tuto oblast v různých směrech opustí, tedy i z hlediska náhodného pohybu je každá oblast vodiče neutrální. Přiložíme-li na vodič napětí, vzniklé elektrické pole ve vodiči urychluje elektrony silou $\boldsymbol{F} = -e \cdot \boldsymbol{E}$. Ke složce rychlosti tepelného původu se přičítá složka rychlosti v opačném směru, než je směr vektoru $\boldsymbol{E}$. Elektrony získávají přídavnou rychlost a kinetickou energii. Při

svém pohybu narážejí elektrony na ionty mříže, ztrácejí rychlost a zvyšují kinetickou energii iontů mříže, jsou však znovu zrychleny a celý děj se opakuje. V časovém intervalu mezi srážkami roste rychlost elektronu lineárně s časem. Střední hodnota rychlosti elektronů představuje driftovou rychlost *v*, přímo úměrnou intenzitě pole, tedy pro elektrony je $\boldsymbol{v} = -k \cdot \boldsymbol{E}$. Uvedené úvahy jsou použitelné jen pro malé hodnoty intenzity pole ve vodiči, kdy je driftová rychlost malá ve srovnání s rychlostí tepelného pohybu. V běžných případech je tato rychlost velmi malá, např. při hustotě proudu 6 $A\ mm^{-2}$ je v měděném vodiči $v = 0{,}3\ mm\ s^{-1}$. Pro hustotu proudu platí

$$\boldsymbol{i} = -en\boldsymbol{v} = enk\boldsymbol{E}.$$

Označíme-li $enk = \sigma$, dostaneme

$$\boldsymbol{i} = \sigma \cdot \boldsymbol{E}. \tag{2.7}$$

Konstanta úměrnosti σ se nazývá konduktivita (dříve měrná elektrická vodivost) prostředí. Její převrácená hodnota $\rho = \sigma^{-1}$ se nazývá rezistivita (dříve měrný elektrický odpor). Vztah (2.7) vyjadřuje Ohmův zákon v diferenciálním (místním, lokálním) tvaru:

Hustota ustáleného proudu v určitém místě vodiče se rovná součinu jeho konduktivity a intenzity elektrického pole v tomto místě.

K vedení proudu užíváme obvykle drátů. Uvažujme tedy vodič tvaru válce průřezu *S* a délky *l*. Je-li proud ustálený, tj. časově neproměnný, musí podle (2.7) být také pole ***E*** časově neproměnné. Rozložení nábojů ve vodiči se tedy nemění, každým průřezem vodiče musí za stejnou dobu projít stejné množství náboje a při stejném průřezu je všude stejná hustota proudu. Intenzita elektrického pole je tedy stejná v každém místě. Jestliže na základny uvažovaného válce vložíme napětí *U*, vznikne ve vodiči homogenní pole intenzity $E = \frac{U}{l}$ a vodičem bude protékat proud

$$I = Si = S\sigma E = S\sigma\frac{U}{l} = \frac{\sigma S}{l}U.$$

Proud je tedy úměrný napětí. Konstanta úměrnosti

$$G = \frac{\sigma S}{l} \tag{2.8}$$

se nazývá elektrická vodivost vodiče. Převrácená hodnota elektrické vodivosti se nazývá odpor (rezistance) $R = G^{-1}$. Dosazením podle (2.8) dostaneme

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

Odpor vodiče je tedy nepřímo úměrný průřezu vodiče a přímo úměrný jeho délce a rezistivitě.

Uvedeme jednotky fyzikálních veličin, které jsme v této kapitole zavedli

odpor [*R*] = *ohm* = *Ω* rezistivita (měrný odpor) [ρ] = Ω *m*

vodivost $[G] = \Omega^{-1}$ konduktivita (měrná vodivost) $[\sigma] = \Omega^{-1}\, m^{-1}$

Dosazením do vztahu pro proud dostaneme $I = G \cdot U$, nebo

$$I = \frac{U}{R}, \tag{2.9}$$

což je Ohmův zákon v integrálním tvaru. Platí pro ustálený stejnosměrný proud ve vodičích libovolného tvaru. Je-li tedy mezi konci vodiče napětí U, protéká vodičem proud, který se rovná podílu napětí U a odporu R vodiče.

Teorie vedení elektřiny v kovech je založena na představě, že kovy jsou látky s tzv. kovovou vazbou. Atomy kovů mají ve vnější neúplné slupce jeden nebo několik valenčních elektronů, které jsou k atomu slabě vázány a lze je snadno uvolnit. Krystalová mříž kovu se tedy skládá z kladně nabitých ionizovaných atomů a mezi těmito kladnými ionty se pohybují v různých směrech volné elektrony, odtržené od atomů. Soubor volných elektronů v kovu označujeme někdy jako elektronový plyn, protože chování volných elektronů je analogické jako chování molekul plynu v nádobě.

Jestliže vytvoříme ve vodiči stálé elektrické pole, bude se k rychlosti teplotního pohybu elektronů přičítat rychlost získaná urychlením elektrickým polem. Tímto urychlením získávají elektrony kinetickou energii, kterou předávají při srážkách iontům mřížky kovu a tím se zvyšuje energie teplotního pohybu celého krystalu kovu. Celý tento děj se projeví jako zahřátí vodiče. Zjednodušeně si můžeme představit, že elektrony jsou urychlovány po určitou dobu τ, která představuje střední dobu mezi srážkami elektronu s ionty mřížky. Po této době narazí elektron na iont mřížky a získanou rychlost ztratí. Následuje opětné urychlení a další srážka a tento děj se stále opakuje. Je-li na konci intervalu τ rychlost získaná urychlením v_k, pohybuje se elektron průměrnou rychlostí $v_k/2$ ve směru síly elektrického pole. Tato rychlost představuje driftovou rychlost elektronu a můžeme ji určit kvantitativně:

Síla, urychlující elektron je

$$\boldsymbol{F} = -e.\boldsymbol{E}$$

zrychlení elektronu je

$$\boldsymbol{a} = \frac{\boldsymbol{F}}{m} = -e\frac{\boldsymbol{E}}{m}$$

a rychlost na konci intervalu τ

$$\boldsymbol{v_k} = \boldsymbol{a}.\tau .$$

Driftová rychlost elektronů je

$$\boldsymbol{v} = \frac{1}{2}\boldsymbol{v}_k = -\frac{e.\boldsymbol{E}.\tau}{2.m} \ .$$

Driftová rychlost kladných nábojů, které by představovaly stejný proud by byla opačného směru

$$\boldsymbol{v} = \frac{e.\boldsymbol{E}.\tau}{2.m}$$

Se směrem pohybu kladného náboje počítáme při vyjádření hustoty proudu a proto můžeme poslední vztah dosadit do rovnice (2.5) a získáváme Ohmův zákon v diferenciálním tvaru

$$\boldsymbol{i} = \rho.\boldsymbol{v} = en\boldsymbol{v} = \frac{\boldsymbol{e}^2 n\tau}{2.m}.\boldsymbol{E}$$

kde

$$\sigma = \frac{ne^2 \cdot \tau}{2m}. \qquad (2.10)$$

představuje vyjádření konduktivity na základě klasické elektronové teorie vodivosti.Ve vztahu (2.10) je n počet volných elektronů v jednotce objemu, e je náboj elektronu, m je jeho hmotnost a τ střední doba mezi dvěma srážkami elektronu s ionty krystalové mříže.

Zkušenost ukazuje, že odpor kovů roste s rostoucí teplotou. Tato skutečnost se vysvětluje tak, že s rostoucí teplotou dochází ke zvětšení amplitud termických kmitů iontů mříže. V důsledku toho se zvětšuje pravděpodobnost srážky elektronů s ionty, střední doba mezi dvěma srážkami se zmenšuje, měrná elektrická vodivost klesá a měrný odpor roste. Závislost měrného odporu na teplotě je zhruba lineární

$$\rho = \rho_o(1 + \alpha t), \qquad (2.11)$$

kde ρ_o je měrný odpor při 0^oC a α je teplotní součinitel odporu. Shoda této jednoduché teorie s měřenými hodnotami je jen kvalitativní. Proto považujeme veličiny ρ_o a α za materiálové konstanty. Jejich hodnoty pro některé materiály jsou v tabulce 2.1.

Při nízkých teplotách je odpor kovů velmi malý. U některých kovů v blízkosti absolutní nuly odpor úplně mizí. Tento stav se nazývá supravodivost. Přechod do supravodivého stavu nastává skokem při určité teplotě, charakteristické pro daný kov; např. pro olovo je to teplota 7,26 K. V poslední době vzrůstá praktické využití tohoto jevu (supravodivé magnety). Supravodivost vyplývá z kvantové teorie pevných látek a nelze ji vysvětlit na základě jednoduché teorie vodivosti.

Tabulka 2. 1. Rezistivita a její teplotní součinitel pro některé materiály.

Materiál	$\frac{\rho}{\mu\Omega\text{m}}$	$\frac{\alpha}{10^{-3}\,\text{K}^{-1}}$
Hliník	0,027	4,0
Konstantan	0,50	0,05
Manganin	0,41	0,02
Měď	0,0178	4,0
Ocel měkká	0,1 - 0,2	5

2. 3 Práce a výkon ustáleného elektrického proudu

Práce, kterou vykonají síly elektrostatického pole při přemístění náboje q z místa o potenciálu φ_1 do místa o potenciálu φ_2 je

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU.$$

Tento vztah platí i pro stacionární elektrické pole, které vyvolává ve vodiči stálý proud. V tomto případě projde libovolným průřezem vodiče za dobu dt sekund náboj $dq = Idt$. Práce, vykonaná elektrickým polem při přechodu náboje q mezi dvěma body vodiče o potenciálech φ_1, φ_2 je $dA = dq(\varphi_1 - \varphi_2) = dq.U = U.I.dt.$ Použijeme-li Ohmova zákona, dostaneme

$$dA = U.I.dt = R.I^2 dt = \frac{U^2}{R} dt. \qquad (2.12)$$

Tato práce je úměrná době průchodu proudu, takže výkon

$$P = \frac{dA}{dt}$$

je stálý, pokud je stálý proud vodičem.

Výkon sil elektrického pole (všeobecně se užívá termínu výkon proudu) je tedy určen vztahem

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}, \qquad (2.13)$$

který vyjádříme slovy: výkon ustáleného proudu je roven součinu proudu a napětí na vodiči. Jednotkou práce proudu v soustavě SI je *joule* (značka *J*), jednotka výkonu je *watt* (značka *W*); $W = \frac{J}{S} = V\,A$. V praxi se používá větších jednotek: *kilowatt* (*kW*) a *megawatt* (*MW*); $1kW = 10^3 W$, $1MW = 10^6 W$. Při odběru se měří odebraná energie součinem výkonu *P* a doby *t* podle vztahu *A = Pt*. Za jednotku času se obvykle bere *1 hod.,* za jednotku výkonu *1 kW;* energie se potom udává v *kWh* (*kilowatthodinách*); $1kWh = 3{,}6 \cdot 10^6 J$.

Zkušenost ukazuje, že při průchodu proudu se vodič zahřívá. Vznik tepla je spojen s pohybem nábojů a tedy s prací elektrických sil. Elektrony, pohybující se vodičem v elektrickém poli, získávají na své volné dráze kinetickou energii, kterou předávají při srážce mřížce kovu. Po každé srážce nabývá elektron vlivem elektrického pole znovu tuto kinetickou energii a znovu ji při srážce odevzdává mřížce kovu. Tak se kov zahřívá v důsledku práce, konané silami elektrického pole. Teplo, které se při průchodu proudu ve vodiči vyvine, je tedy rovno práci, vykonané elektrickým polem a platí pro ně vztah (2. 12). Označíme-li vyvinuté teplo *Q*, platí

$$dQ = U.I.dt = R.I^2 dt = \frac{U^2}{R} dt. \qquad (2.14)$$

Tento vztah se nazývá Joulův-Lenzův zákon, vyvinuté teplo obvykle nazýváme Joulovo teplo. Při průchodu proudu se tedy vodič zahřívá, ale jeho teplota roste jen do té doby, dokud se tepelné ztráty, způsobené vyzařováním a sdílením tepla okolnímu prostředí nevyrovnají teplu, vyvinutému proudem. Potom se již teplota vodiče nemění. S rostoucí teplotou se mění také odpor vodiče a proto není závislost proudu na napětí přesně lineární, ale je dána křivkou, která se nazývá charakteristika vodiče. Pro běžná měření v elektrotechnice je možné tuto nelinearitu zanedbat.

Joulovo teplo se široce využívá v praxi. V domácnostech se využívá např. k vaření, vytápění bytů, ohřevu vody, v laboratořích se používají elektrické pícky. Významným použitím Joulova tepla jsou tavné pojistky, které chrání elektrické vedení a spotřebiče před poškozením v důsledku značného zahřátí.

Kontrolní otázky ke kapitole 2. Ustálený proud

1. Vyložte mikroskopickou představu o vodivosti v kovovém vodiči. Jaké jsou podmínky vzniku ustáleného proudu?
2. Definujte fyzikální veličinu elektrický proud. Uveďte, jak se určí náboj prošlý průřezem vodiče při známém časovém průběhu proudu.
3. Definujte vektor hustoty proudu. Uveďte jednotku. Jak určíme ze známé hustoty proudu proud ve vodiči?
4. Uveďte, jak lze vektor proudové hustoty vyjádřit pomocí prostorové hustoty volného elektrického náboje.
5. Vysvětlete co jsou to proudové čáry.
6. Napište a vysvětlete rovnici kontinuity elektrického proudu.
7. Napište a vysvětlete Ohmův zákon v diferenciálním tvaru. Zopakujte jeho odvození.
8. Napište a vysvětlete Ohmův zákon v integrálním tvaru.
9. Ukažte jak lze odvodit z diferenciálního tvaru Ohmova zákona integrální tvar tohoto zákona.
10. Uveďte, na čem závisí elektrický odpor vodiče. Jaké jsou jednotky rezistivity a konduktivity?
11. Vysvětlete podstatu teplotní závislosti konduktivity kovů.
12. Uveďte vztahy pro práci a výkon ustáleného proudu. Vysvětlete co je to Joulovo teplo.
13. Ve vodiči, kterým prochází proud se trvale vyvíjí teplo. Proč jeho teplota trvale neroste?