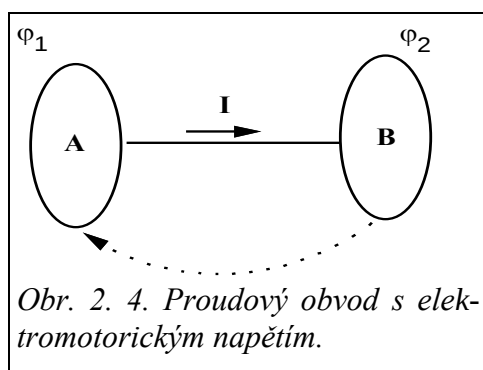


2.4 Proudový obvod s elektromotorickým napětím

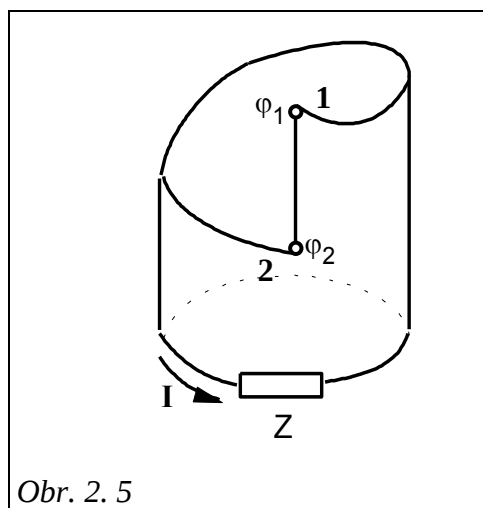
Jestliže spojíme 2 vodiče o potenciálech φ_1 , φ_2 , bude kladný náboj přecházet z místa vyššího potenciálu do místa o nižším potenciálu. Vzniklý proud bude ale s časem slábnout a



Obr. 2. 4. Proudový obvod s elektromotorickým napětím.

po vyrovnaní potenciálů klesne na nulu. Aby vodičem procházel stálý proud, musíme udržovat na vodičích A, B stálé potenciály. Na vodič A musíme jinou cestou přinést stejný náboj, který přijal vodič B. Na této cestě se ale náboje pohybují proti elektrostatickým silám, takže k jejich přivedení je nutná vnější síla neelektrostatické povahy. Tyto síly budou konat práci na úkor energie zdroje.

Podle Ohmova zákona bude vodičem procházet ustálený proud, jestliže budeme na jeho koncích udržovat stálé napětí. Elektrická zařízení, na jejichž svorkách se udržuje stálý rozdíl potenciálů se nazývají elektrické zdroje. Nejznámější jsou galvanické články, akumulátory a dynamy. Elektrický zdroj je zařízení, ve kterém se mění v energii elektrickou jiný druh energie (chemická, mechanická). V uzavřeném proudovém obvodu obíhá (při ustáleném proudu) stálé množství náboje po uzavřených proudových čarách. Přitom se kladné náboje pohybují ve směru klesajícího potenciálu (elektrony se pohybují v opačném směru). Při uzavřeném oběhu musí tedy kladné náboje v určité oblasti vystoupit na místo vyššího potenciálu. Tato oblast představuje elektrický zdroj, ve kterém působí síla, umožňující pohyb nábojů proti silám pole. Zdroj představuje zjednodušeně zařízení se dvěma svorkami (kontakty - 1 a 2 v obr. 2.5.) Svorka 1 představuje + pól, svorka 2 – pól zdroje.



Obr. 2. 5

Napětí, které tato síla působící ve zdroji (neelektrostatického původu) udržuje v obvodu, se nazývá elektromotorické napětí (emn), které budeme

označovat $\mathcal{E}$. Příslušná neelektrostatická síla se nazývá elektromotorická síla. Definujeme ji takto: **elektromotorické napětí je rovno práci vnější síly vtažené na jednotkový náboj při průchodu náboje zdrojem ve směru elektrického proudu.**

Matematicky vyjádříme elektromotorické napětí jako

$$\mathcal{E} = \int \mathbf{E}_{emn} d\mathbf{l} \quad (2.15)$$

kde meze integrálu označují svorky zdroje. Vztah (2.15) je jednou z možných definic elektromotorického napětí.

Obecně je výhodnější definice elektromotorického napětí vyjádřená pomocí intenzity všech sil působících na náboj v obvodu. Tu můžeme získat sečtením rovnice (2.15) a poznatku, že integrál z intenzity elektrostatického pole $\mathbf{E}_s$, podél uzavřené čáry v elektrostatickém poli musí být tedy roven nule

$$\oint \mathbf{E}_s \cdot d\mathbf{r} = 0.$$

Při ustáleném proudu platí tato rovnice stejně jako v elektrostatice, protože rozložení potenciálu podél obvodu je časově stálé. Elektromotorická síla $\mathbf{F}_{emn}$ není elektrostatickou silou, ale vytváří silové pole, které můžeme popsat pomocí intenzity $\mathbf{E}_{emn} = \frac{\mathbf{F}_{emn}}{q}$. ($\mathbf{E}_{emn}$ udává elektromotorickou sílu, působící na kladný jednotkový náboj.) Uvnitř zdroje působí na volné náboje síla elektrostatická a síla elektromotorická. Neuvažujeme-li odpor zdroje, platí

$$\mathbf{E}_s = -\mathbf{E}_{emn}.$$

Výsledná intenzita všech sil v každém místě obvodu je

$$\mathbf{E}^* = \mathbf{E}_s + \mathbf{E}_{emn}.$$

Vzhledem k (2. 15) platí

$$\oint \mathbf{E}^* \cdot d\mathbf{r} = \oint \mathbf{E}_s \cdot d\mathbf{r} + \oint \mathbf{E}_{emn} \cdot d\mathbf{r} = \int_2^1 \mathbf{E}_{emn} \cdot d\mathbf{r} \quad (2.16)$$

Vektor $\mathbf{E}_{emn}$ je různý od nuly jenom uvnitř zdroje, takže získaný výraz (2.16) je vztahu (2.15). Matematické vyjádření obecné definice elektromotorického napětí v uzavřeném proudovém obvodu je:

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{E}^* \cdot d\mathbf{r}. \quad (2.17)$$

Elektromotorické napětí v uzavřeném obvodu je rovno křivkovému integrálu po křivce obvodu z intenzity všech sil, působících v obvodu na elektrický náboj.

Z této definice výkladu plyne, že elektromotorické napětí se číselně rovná práci, kterou vykoná elektromotorická síla při průchodu kladného jednotkového náboje zdrojem. Tato práce se rovná přírůstku potenciální energie kladného jednotkového náboje při průchodu zdrojem.

Výkon zdroje

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{dA}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = \mathcal{E} \cdot I \quad (2.18)$$

je roven součinu elektromotorického napětí zdroje a proudu obvodem. Tento výkon se při ustáleném proudu přemění na Jouleovo teplo. Podobně jako vodič, má i zdroj určitý odpor, který se nazývá vnitřní odpor zdroje (značíme r). Celkový výkon zdroje se rovná součtu výkonů ve vnější části obvodu a uvnitř zdroje. Platí tedy

$$\mathcal{E} \cdot I = RI^2 + rI^2,$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (2.19)$$

Tento vztah vyjadřuje Ohmův zákon pro uzavřený obvod. Můžeme jej psát ve tvaru

$$\mathcal{E} = I(R + r). \quad (2.20)$$

Slovy: *Součin celkového odporu obvodu a proudu, procházejícího obvodem se rovná elektromotorickému napětí, zapojenému do obvodu.*

Vztah (2.20) můžeme upravit

$$\mathcal{E} = IR + Ir = U + Ir, \quad (2.20a)$$

kde veličina U představuje rozdíl potenciálů na pólech zdroje, zapojeného do obvodu a nazývá se svorkové napětí.

Svorkové napětí zdroje je tedy menší než elektromotorické napětí zdroje o úbytek napětí na vnitřním odporu zdroje. Je-li obvod otevřen, tj. $I = 0$, platí $U = \mathcal{E}$. Podle (2.20a) je svorkové napětí tím menší, čím větší proud odebíráme ze zdroje. Má-li zdroj velký vnitřní odpor, pak i při malém odběru proudu značně klesne svorkové napětí. Takový zdroj se nazývá měkký zdroj napětí. Má-li zdroj naopak velmi malý vnitřní odpor vzhledem k vnějšímu odporu R , změní se svorkové napětí jen málo. Říkáme, že jde o tvrdý zdroj napětí.

Ohmův zákon pro uzavřený obvod plyne jednoduše také z definice elektromotorického napětí

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{E}^* \cdot d\mathbf{r} = \int_1^2 \mathbf{E}^* \cdot d\mathbf{r} + \int_2^1 \mathbf{E}^* \cdot d\mathbf{r}$$

Integrál přes uzavřený obvod můžeme rozdělit na integrál přes vnější obvod a přes zdroj. Indexy 1 a 2 představují svorky zdroje: první integrál na pravé straně představuje napětí v obvodu vně zdroje $U = IR$, druhý napětí uvnitř zdroje $U_i = Ir$. Tedy

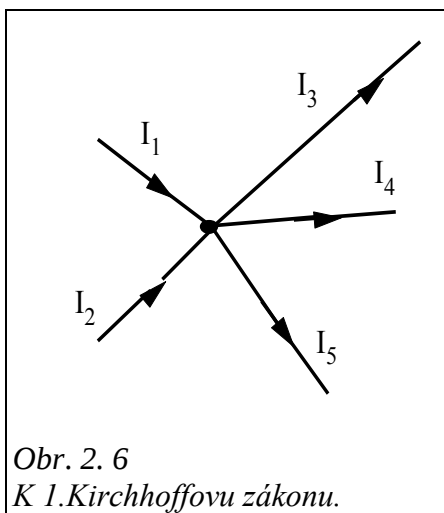
$$I(R + r) = \mathcal{E}$$

Což představuje Ohmův zákon pro uzavřený obvod. Pro praktické výpočty je výhodné nahradit zdroj, který má vnitřní odpor ideálním zdrojem bez vnitřního odporu k němuž je připojen v sérii vnitřní odpor.

Kirchhoffovy zákony

Při řešení složitějších stejnosměrných obvodů používáme dvou obecných zákonů, které se nazývají Kirchhoffovy. Místa obvodu, kde se setkávají aspoň 3 vodiče, se nazývají uzly. Vodič mezi dvěma uzly se nazývá větev. Větev vytvářejí uzavřené obvody. Kirchhoffovy zákony umožňují napsat soustavu rovnic pro proudy, elektromotorická napětí a napětí na odporech v rozvětvených elektrických sítích.

1. Kirchhoffův zákon



Obr. 2. 6
K 1.Kirchhoffovu zákonu.

Při ustáleném stejnosměrném proudu prochází kterýmkoliv průřezem vodiče stále stejný proud. Náboj se v homogenním vodiči nikde nehromadí. Součet proudů vstupujících do uzlu se tedy musí rovnat součtu proudů, které z uzlu vystupují. Např. na obr. 2. 6 je

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5.$$

Tento zákon je jednoduchým důsledkem rovnice kontinuity proudu (2.6). Jestliže vytvoříme uzavřenou plochu S kolem uzlu v obr 2.6, bude protínat vodiče v ploškách S_1 až S_5 .

Rovnici kontinuity lze psát

$$\oint_S \mathbf{i} \cdot d\mathbf{S} = \int_{S_1} \mathbf{i} \cdot d\mathbf{S} + \int_{S_2} \mathbf{i} \cdot d\mathbf{S} + \int_{S_3} \mathbf{i} \cdot d\mathbf{S} + \int_{S_4} \mathbf{i} \cdot d\mathbf{S} + \int_{S_5} \mathbf{i} \cdot d\mathbf{S} = -I_1 - I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = 0$$

Odtud dostáváme dříve uvedený konkrétní tvar prvního Kirchhoffova zákona. Označíme-li vstupující proudy jako kladné a vystupující jako záporné, můžeme vyslovit 1.Kirchhoffův zákon takto: **algebraický součet proudů v uzlu je roven nule.**

Matematický zápis je

$$\sum I_k = 0. \quad (2.21)$$

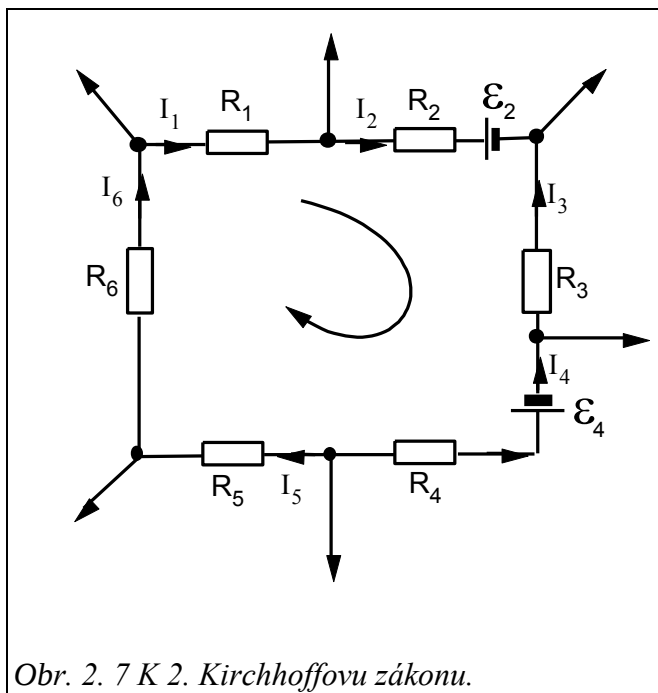
Při konkrétních výpočtech volíme obvykle proudy vstupující do uzlu kladné a vystupující záporné. Formulaci zákona můžeme upravit takto: **součet proudů do uzlu vtékajících je roven součtu proudů z uzlu vytékajících.**

2. Kirchhoffův zákon

Druhý zákon se týká uzavřených obvodů, které mohou být částí jakékoliv složité sítě. Zní takto: **Algebraický součet napětí na odporech v uzavřeném obvodu se rovná algebraickému součtu všech elektromotorických napětí zapojených v obvodu.** Matematicky

$$\sum R_k \cdot I_k = \sum \mathcal{E}_k \quad (2.22)$$

Tento zákon získáme analogicky jako Ohmův zákon pro uzavřený obvod



Obr. 2. 7 K 2. Kirchhoffovu zákonu.

Při sestavování rovnic na základě 2. Kirchhoffova zákona postupujeme v obvodu jedním směrem, který volíme libovolně. Elektromotorická napětí v obvodu považujeme za kladná, když v obvodu způsobují proud zvoleného směru, tzn. když zvolený směr postupu prochází zdrojem od záporného pólu ke kladnému. Napětí ve větvi (tj. součin RI) považujeme za kladné, když směr proudu je stejný jako zvolený směr postupu. Např. pro obvod na obr. 2.7 vyjádříme 2. Kirchhoffův zákon takto:

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_3 I_3 - R_4 I_4 + R_5 I_5 + R_6 I_6 = \mathcal{E}_4 - \mathcal{E}_2.$$

$$\oint \mathbf{E}^* \cdot d\mathbf{l} = \oint \mathbf{E}_{emn} \cdot d\mathbf{l},$$

Jestliže rozepíšeme integrály po uzavřené křivce obvodu na součet integrálů přes jednotlivé prvky, dostáváme na levé straně součet úbytků napětí na odparech v obvodu a na pravé straně součet elektromotorických napětí v jednotlivých zdrojích:

$$\sum_k \int_R \mathbf{E}^* \cdot d\mathbf{l} = \sum_k \int_{\mathcal{E}} \mathbf{E}_{emn} \cdot d\mathbf{l}$$

Vyjádříme-li integrály v poslední rovnici, dostáváme

$$\sum R_k \cdot I_k = \sum \mathcal{E}_k$$

Protože vycházíme z jednoho směru integrace po uzavřené křivce, budou členy v součtech na obou stranách rovnice 22. Kirchhoffova zákona jak kladné, tak záporné.

Kontrolní otázky ke kapitole 2. Ustálený proud

1. Vysvětlíte pojem elektromotorické napětí zdroje. Jak je určen výkon zdroje?
2. Jak určíme proud v uzavřeném obvodu?
3. Vysvětlíte souvislost elektromotorického napětí a svorkového napětí zdroje. Jak můžeme určit měřením elektromotorické napětí zdroje?
4. Napište a vysvětlíte Kirchhoffovy zákony. Vysvětlíte jejich použití při výpočtech proudů v sítích.