

## Neideální elektrický obvod

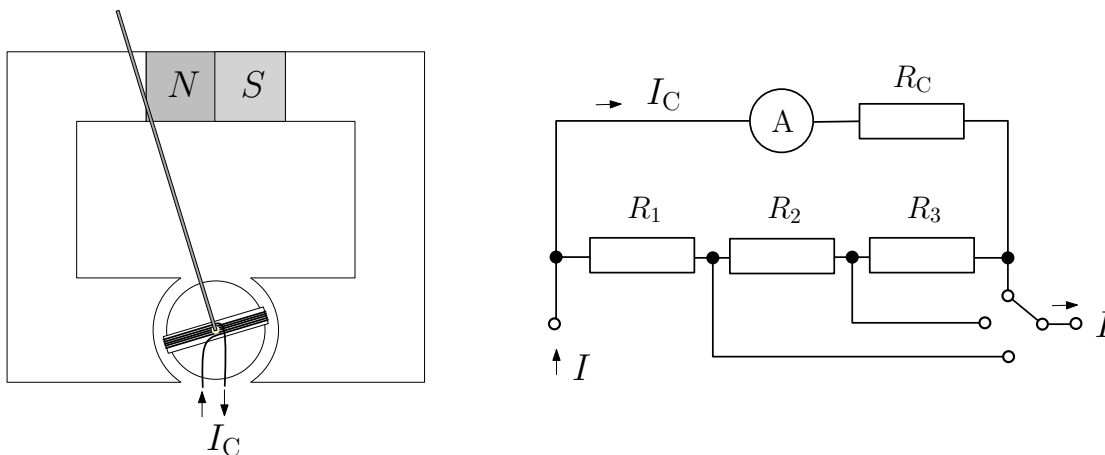
### 1 Úvod

Při řešení fyzikálních úloh se často spoléháme na určité zjednodušené modely, kdy řadu věcí zanedbáme buď proto, že jejich vliv na výsledek je skutečně nepodstatný, nebo proto, že při zahrnutí všech parametrů by řešení bylo příliš složité a nám stačí získat výsledek pouze přibližně. Učebnice jsou plné pojmů jako hmotný bod, ideální plyn, ideální ampérmetr, ideální cívka a podobně. Je ale vždy třeba mít na paměti meze použitelnosti takového modelu. V praktické úloze se trochu detailněji, než jste asi zvyklí, podíváme na obyčejný stejnosměrný elektrický obvod.

#### 1.1 Ideální a reálný ampérmetr

Ačkoli se v literatuře často setkáme s formulací, že „kvalitní ampérmetr má téměř nulový (ideální ampérmetr přesně nulový) vnitřní odpor...“, tato podmínka nemusí být, zejména u nižších rozsahů analogových měřicích přístrojů s více rozsahy, ani zdaleka splněna. To neznamená, že by takový přístroj byl méně kvalitní, pouze je třeba s jeho vnitřním odporem počítat.

Při měření budete používat deprežský magnetoelektrický ampérmetr. Je tvořen malou cívkou, navinutou kolem feromagnetického válečku umístěného mezi nástavci permanentního magnetu. Cívka je zde upevněna na otočné ose, stejně jako ručička ukazatele a spirálová pružina. Při měření prochází cívkou elektrický proud, proto na ni permanentní magnetické pole začne působit silovým momentem úměrným tomuto proudu a cívka se natáčí. Proti natáčení cívky působí silovým momentem spirálová pružina, upevněná k těžé ose. Tyto silové momenty se v určité poloze vyrovnají a na stupnici lze odečíst měřený proud, případně délky u přístroje s více rozsahy.



Obrázek 1: Princip funkce magnetoelektrického ampérmetru s více rozsahy

Elektrický odpor cívky může být skutečně velmi malý. Ampérmetry však většinou umožňují měřit na více rozsazích – toho lze docílit tak, že část proudu přivedeného do ampérmetru neprochází cívkou, ale jinou větví obvodu s funkcí bočníku. Aby při přepínání rozsahů neprotékal cívkou ampérmetru

celý měřený proud, což by mohlo přístroj nenávratně poškodit, často se používá např. tzv. Ayrtonův bočník. Z důvodů praktické realizace je pak odpor takového ampérmetru s více rozsahy obvykle podstatně větší než odpor samotné cívky, zejména na nižších rozsazích (viz schéma na obrázku 1).

## 1.2 Ideální a reálný zdroj napětí

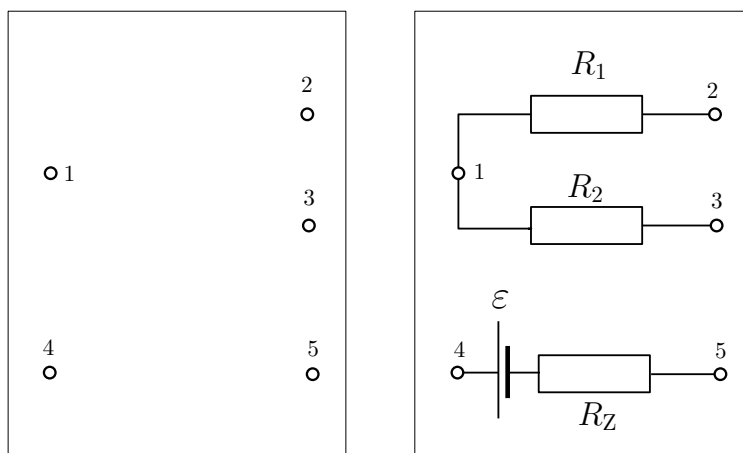
Ideální zdroj napětí dává po zapojení do obvodu při konstantní zátěži stabilní proud a má nulový vnitřní odpor. Reálné zdroje jej ovšem mají nenulový, svorkové napětí je pak menší než napětí elektromotorické, jaké naměříme na nezatíženém zdroji. To může působit problémy zejména tam, kde je ze zdroje třeba odebírat větší proud, například u automobilové baterie je důležité, aby její vnitřní odpor byl velmi malý.

První zdroje elektrického napětí a proudu, pomineme-li nabíjení těles třením, byly zdroje využívající chemické reakce elektrod s elektrolytem – galvanické články. Nejstarším historicky doloženým galvanickým článkem je Voltův článek, pojmenovaný po Alessandro Voltovi, který jej použil v roce 1799 při konstrukci první baterie – Voltova sloupu. Je tvořen zinkovou a měděnou elektrodou v elektrolytu zředěné kyseliny sírové. Přibližme si nyní děje, které v něm probíhají.

Ponoříme-li určitý kov do roztoku jeho soli nebo vhodné kyseliny, má tendenci uvolňovat nebo přijímat kationty. Tím se současně buď záporně nebo kladně nabíjí. Na povrchu elektrody vzniká elektrická dvojrstva s určitým elektromotorickým napětím. Konkrétně v našem případě zinkové a měděné elektrody ve slabém roztoku kyseliny sírové se bude reaktivnější zinek v elektrolytu rozpouštět – bude uvolňovat kationty  $Zn^{2+}$ , přitom se bude nabíjet vůči elektrolytu až na hodnotu  $-0,76$  V. Na měděné elektrodě se budou z elektrolytu vylučovat ionty  $H^+$ , které se zde neutralizují, její potenciál vůči elektrolytu tak dosáhne až  $0,34$  V. Dvě různé elektrody vytvářejí galvanický článek (toto přiblížení je velmi zjednodušené, podrobný rozbor však ponechme chemikům). Propojíme-li elektrody přes odporovou zátěž, poteče obvodem proud, který však bude nejprve rychle, pak pomaleji klesat. To má řadu příčin, jednou z nich je, že vodík vylučovaný na měděné elektrodě zde vytváří odporovou vrstvu, vnitřní odpor zdroje tak roste a svorkové napětí klesá. Průběh ale může být i komplikovanější, např. vlivem zoxidovaného povrchu elektrod, odloučení vodíkové vrstvičky atp. I v případě, že obvodem neprochází proud, můžeme při dlouhodobém ponoření elektrod pozorovat pozvolný úbytek napětí na článku – zinková elektroda totiž obsahuje stopové množství železa, s nímž v elektrolytu vytváří mikroskopické uzavřené obvody a zinek se tak do elektrolytu uvolňuje, i když článek není zapojen. Vylučováním vodíku a nárůstem podílu zinku v roztoku se článek rychle znehodnocuje. K praktickému použití tedy musely galvanické články urazit ještě dlouhou cestu, ale používáme je dodnes.

## 2 Zadání

Na laboratorním stole máte přichystánu krabičku s pěti zdírkami (viz obrázek 2), analogový ampérmetr nastavený na rozsahu  $2,4$  mA (tento rozsah ponechte stálý pro všechna měření, nepřepínejte jej), konektory, stopky, kádinku s 3% vodným roztokem kyseliny sírové a držák se zinkovou a měděnou elektrodou. Máte získat požadované informace o neznámých parametrech přidělených pomůcek. Vaším úkolem tedy není navrhnout ideální měření, jak neznámé hodnoty určit, ale poradit si co nejlépe s tím, co máte k dispozici. Řešení pište do připravených pracovních listů.



Obrázek 2: Schema krabičky:  $R_1 = 390 \Omega$ , ostatní hodnoty jsou neznámé

## Úkoly

- (2 body) Pro nastavení rozsahu ampérmetru 2,4 mA určete konstantu přístroje, tj. velikost proudu, odpovídající jednomu dílku stupnice. Pomocí třídy přesnosti přístroje určete přípustnou relativní odchylku v případě, že ručka přístroje ukazuje maximální hodnotu, hodnotu poloviny rozsahu a hodnotu čtvrtiny rozsahu.
- (8 bodů) Rezistor  $R_1$  zabudovaný v krabičce má odpor 390  $\Omega$  s tolerancí 1%. Hodnotu  $R_2$  neznáte. K neznámému zdroji napětí s vlastním vnitřním odporem  $R_{ZV} = 2 \Omega$  je sériově zapojen další rezistor o neznámé hodnotě  $R_{ZP}$ , takže dohromady tvoří odpor  $R_Z$  (viz obrázek 2). Pomocí ampérmetru (a samozřejmě konektorů) určete neznámou hodnotu elektromotorického napětí zdroje  $\varepsilon$ , hodnoty odporu rezistorů  $R_2$  a  $R_{ZP}$  a neznámý vnitřní odpor ampérmetru  $R_A$  na rozsahu 2,4 mA, když víte, že:

- odpory  $R_2$  a  $R_{ZP}$  jsou celočíselnými násobky  $R_1$ ,
- odpor  $R_A$  je menší než kterýkoli z nich (nikoli však  $R_{ZV}$ ).

Můžete při tomto zadání určit hledané parametry na základě naměřených hodnot jednoznačně? Mohli byste je určit jednoznačně i bez podmínek I a II? Diskutujte možnosti zapojení, jaké máte. Vyzkoušejte několik variant tak, abyste tam, kde to má smysl, hledané neznámé vypočetli více (stačí třemi) způsoby, ale v každém zapojení měřte pouze jednou. Svůj postup přizpůsobte konkrétním podmínkám a detailně jej popište.

V další části úlohy budete potřebovat znát odpor rezistoru  $R_2$  a vnitřní odpor ampérmetru  $R_A$ . Vzhledem k podmínce I můžete předpokládat, že hodnotu  $R_2$  znáte se stejnou relativní přesností jako hodnotu  $R_1$ . Možnost přesného určení vnitřního odporu ampérmetru je však podstatně omezena pomůckami, které máte k dispozici (kromě samotného zapojení zejména třídou přesnosti ampérmetru a tolerancí odporu rezistoru  $R_1$ ). Z hlediska přesnosti asi nebudou různé varianty zapojení rovnocenné. Rozhodněte, která byla z tohoto hlediska nejvhodnější a určete, jaká může být odchylka a relativní odchylka určení vnitřního odporu ampérmetru  $R_A$  při tomto měření. Pro další výpočty použijte hodnotu  $R_A$  získanou při tomto zapojení.

3. (2 body) Máte připravenou kádinku s 3% roztokem kyseliny sírové a dvěma elektrodami – zinkovou a měděnou. Jaké je maximální elektromotorické napětí  $\varepsilon_{id}$  tohoto zdroje v idealizovaném případě? Pokud k němu připojíme ampérmetr, případně další zátěž, jaký celkový odpor  $R_C$  (včetně vnitřních odporů ampérmetru a zdroje) by musel mít tento obvod, aby proud určitě nepřekročil rozsah ampérmetru 2,4 mA?

Nyní si připravte zapojení pro část měření věnovanou Voltovu článku. Mějte na paměti, která elektroda bude po ponoření do roztoku kladná a která záporná. Bude nás zajímat časový vývoj proudu a charakteristiky zdroje v „ustáleném“ stavu při zadané odporové zátěži (ve skutečnosti se bude proud i nadále velmi zvolna měnit). U Voltova článku se ovšem rozložení iontů a spolu s ním i jeho charakteristiky (zejména vnitřní odpor) mění i v závislosti na odebíraném proudu, proto si obvod předem připravíme tak, abychom v další části měření odebíraný proud změnili vždy jen na minimální nutnou dobu, za kterou se rozložení nábojů v elektrolytu nestačí přizpůsobit novým podmínkám – i tak bude toto měření jen orientační, jeho nejistotu proto nevyčísľujte. Nejprve si celý následující postup dobře promyslete a všechno připravte, pak teprve začnete měřit. Některé změny jsou nevratné, měření proto nemůžete opakovat.

K deskám Voltova článku, stále ještě neponořeným do roztoku, připojte sériově rezistory  $R_1$  a  $R_2$  z krabičky a ampérmetr (pořád na rozsahu 2,4 mA).

4. (3 body) Proměřte časovou závislost proudu obvodem, tvořeným pouze Voltovým článkem, rezistorem  $R_1$  a ampérmetrem. Pro tento úkol pomocí dalšího pomocného konektoru rezistor  $R_2$  zkratujte, ale neodpojujte jej – zapojení rezistoru využijete v následujícím úkolu.

Na PC si připravte stopky, ponořte elektrody do elektrolytu a ponechte je tam až do konce měření. Současně začněte měřit čas. První hodnoty proudu zapisujte v časovém intervalu 5 s, poté zvolte vhodné delší intervaly. Měřte bez dalších zásahů po dobu alespoň 10 minut, na základě výsledků se pak rozhodněte, jak dlouhý časový interval zachytíte do grafu, aby co nejlépe vystihoval pozorovaný vývoj. Graf časové závislosti proudu nakreslete v Excelu hned v laboratoři (vykreslete zde alespoň naměřené body, graf vám bude vytištěn a vrácen k dopracování; proložení a popis os můžete po vytištění doplnit i ručně).

5. (3 body) Po „ustálení“ proudu v předchozím úkolu se pokuste přibližně určit elektromotorické napětí  $\varepsilon_V$  a vnitřní odpor Voltova článku  $R_V$  v tomto stavu. Vycházejte z proudu tekoucího obvodem při zapojení pouze ampérmetru a rezistoru  $R_1$  a proudu při zátěži větší o rezistor  $R_2$ . Protože nechcete dát elektrolytu čas na změnu v rozložení iontů (rovnováhu při vyšším odporu), pomocný konektor rozpojte vždy jen na minimální nutný čas k odečtu proudu (1–2 s). Opakujte 3x a zpracujte.
6. (2 body) Až odměříte vše, co potřebujete pro předchozí úkoly, vyzkoušejte, co se stane, když elektrody z elektrolytu cca o polovinu povytáhnete. Výsledek svého pozorování se pokuste vysvětlit.