

Jiří Vlček

JEDNODUCHÁ ELEKTROTECHNIKA

základní zapojení

odpor

kapacita

indukčnost

magnetismus

střídavý proud

polovodiče

silnoproud

autoelektronika

zesilovače

zdroje

logické obvody

OBSAH

1. Proudové pole	1
2. Elektrostatické pole	11
3. Magnetizmus	15
4. Střídavý proud	20
5. Polovodiče	29
6. Průchod proudu kapalinou a plynem	35
7. Měření	37
8. Silnoproud	38
9. Autoelektronika	49
10. Zesilovače	63
11. Napájecí zdroje	68
12. Číslicová technika	71

Úvod

Tato publikace je určená žákům SOU a SOŠ, pro které slaboproudá elektronika není hlavním studijním oborem a kteří se ji učí pouze stručně. Jedná se hlavně o obory Silnoproud, Autoelektrikář a Automechanik. Tím zároveň doplňuje moji učebnici Středoškolská fyzika. Je vhodná i pro žáky základních škol, kteří se s tímto oborem chtějí alespoň stručně seznámit. Obsahuje celou řadu praktických informací, které jsou důležité i pro neoborníky a které patří k všeobecnému vzdělání každého člověka.

Hlavní důraz je kladen na praktické využití získaných poznatků, které zde většinou předkládám bez hlubšího zdůvodnění. Závěrečné kapitoly popisují praktické použití základních znalostí v silnoproudé elektronice a autoelektronice, a jsou doplněny základy slaboproudé techniky.

1 Proudové pole

1.1 Základní pojmy

Elektrický proud je dán uspořádaným pohybem elektrických nábojů v určitém směru. Elektrický proud značíme písmenem **I**, jednotkou je **ampér (A)**. Definujeme jej pomocí silových účinků proudového pole. Ampér je základní jednotka v soustavě SI. Pomocí něj definujeme další elektrické veličiny.

$$I = Q/t \quad [A, C, s]$$

Proud 1 A představuje náboj jednoho coulombu, který projde vodičem za 1 sekundu. Elektrický náboj značíme Q a udáváme jej v coulombech (C).

V každém atomu existuje kladný náboj – **proton** a záporný náboj – **elektron**. Náboj nelze od částice oddělit. Nejmenší velikost má náboj elektronu. Označujeme jej $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. ($1 \text{ C} = 6,242 \cdot 10^{18}$ elektronů). Hmotnost elektronu $m_e = 9,11 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$. Vidíme, že náboj jednoho elektronu je velmi malý, menší než si dovedeme představit. Účinky elektrického proudu (obrovského množství elektronů pohybujících se stejným směrem) jsou dobře patrné a všichni je známe (svítící žárovka, točící se motor, atd).

Elektrický náboj se udává často v **ampérhodinách (Ah)**. $1 \text{ Ah} = 3\,600 \text{ As} = 3\,600 \text{ C}$. Touto veličinou se udává např. náboj (nepřesně kapacita) baterie.

Příčinou elektrického proudu je zdroj elektrické energie, který vytváří **elektrické napětí**. Značíme jej **U** a udáváme jej ve **voltech (V)**. **Mezi dvěma body je napětí 1 V, pokud k přenesení náboje 1 C mezi nimi musíme vykonat práci 1 J.**

$$U = A/Q \quad [V, J, C]$$

Proudová hustota $J = I/S$, udává se v ampérech na m^2 (častěji v A/mm^2). Aby se vodič průchodem proudem příliš nezahřival, nemá být proudová hustota obvykle vyšší než $4 A/mm^2$ (platí pro měď nebo hliník).

Příklad: Vodičem prochází proud $0,5 A$. Vypočítejte jeho minimální průměr, pokud nesmí být překročena proudová hustota $4 A/mm^2$. Nejprve musíme vypočítat jeho průřez

$$S = I/J = 0,5/4 = 0,125 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Ze znalosti průřezu potom podle známého vzorce (výpočet plochy kruhu) vypočítáme průměr, který jsme (na rozdíl od poloměru) schopni změřit posuvným měřítkem nebo mikrometrem.

$$S = \pi d^2/4 \quad d = \sqrt{4S/\pi} = 0,4 \text{ mm}$$

Výsledek zaokrouhlíme nahoru na nejbližší vyráběnou hodnotu vyráběného vodiče.

U páskového vodiče vypočítáme jeho průřez z příčných rozměrů jako součin šířky a tloušťky ($S = a \cdot b$, výpočet plochy obdélníku), viz *obr. 1.1d*.

Intenzita elektrického pole E udává, jak se mění napětí v závislosti na délce vodiče **I**, udává spád napětí. Jednotkou je volt na metr.

$$E = U/l \quad [V/m]$$

1.2 Ohmův zákon – elektrický odpor

Elektrický odpor se značí **R** vyjadřuje vlastnosti prostředí, kterým prochází elektrický proud. **Každý vodič má elektrický odpor**. Součástka, jejíž základní vlastností je odpor, se nazývá **rezistor** (hovorově též odpor, není ale správné).

Jednotkou elektrického odporu jsou ohmy (kiloohmy $k\Omega$, megaohmy $M\Omega$).

$$1 \text{ k}\Omega = 1 \text{ 000 } \Omega \quad 1 \text{ M}\Omega = 1000 \text{ k}\Omega = 1 \text{ 000 000 } \Omega$$

Vodič má odpor 1 ohm, jestliže na něm při proudu 1 A naměříme úbytek napětí 1 V. Toto vyjadřuje Ohmův zákon:

$$R = U/I \quad [\Omega, V, A] \quad U = R \cdot I \quad I = U/R$$

Tento zákon je základem elektroniky, je nezbytné si jej zapamatovat a umět do něj dosadit. K tomu nám poslouží *obr. 1.1b*. Veličinu, kterou chceme spočítat, zakryjeme a tím získáme potřebný tvar Ohmova zákona.

O platnosti Ohmova zákona se můžeme přesvědčit jednoduchým pokusem:

Připojíme rezistor k regulovanému zdroji napětí, pro měření proudu zapojíme ampérmetr **A** (do série s rezistorem), pro měření napětí voltmetr **V** (paralelně s rezistorem). Postupně zvyšujeme napětí zdroje, do tabulky zapíšeme naměřené hodnoty proudu a napětí. Naměřené hodnoty graficky znázorníme.

Závislost proudu na napětí (voltampérová – VA charakteristika) je přímka, která prochází počátkem souřadnic. Říkáme, že **závislost napětí a proudu je lineární**, rezistor je tedy **lineární součástka**. Obvod složený pouze z lineárních součástek se nazývá **lineární obvod**. Nahradíme-li původní rezistor R_1 jiným (v tomto případě menším) rezistorem R_2 získáme jinou přímku. Pro každý rezistor bude platit, že poměr napětí a proudu je vždy konstantní (VA charakteristika je přímka, *obr 1.1a*).

Do Ohmova zákona dosazujeme odpor v ohmech, napětí ve voltech a proud v ampérech, což jsou základní jednotky. Někdy je ale jednodušší dosazovat napětí ve voltech, proud v miliampérech a odpor v kiloohmech. Přesvědčte se o tom na následujících příkladech. Při výpočtu oběma způsoby musíme dospět ke stejnému výsledku.

Příklad: Na rezistoru $2\text{ k}\Omega$ jsme naměřili napětí 8 V . Jaký jím teče proud?

$$I = U/R = 8\text{ V}/2\text{ k}\Omega = 4\text{ mA} \quad (8\text{ V}/2\text{ 000}\Omega = 0,004\text{ A} = 4\text{ mA})$$

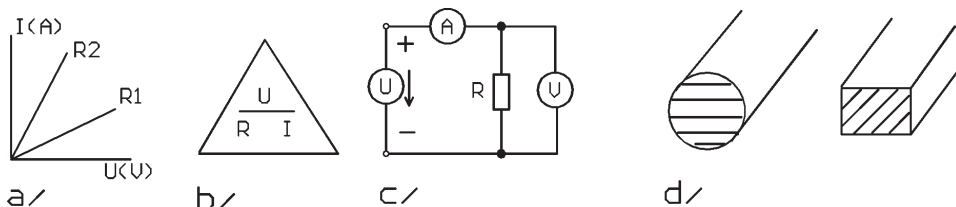
Vidíme, že obvod nemusíme rozpojovat a měřit proud, stačí jej z Ohmova zákona vypočítat.

Příklad: Rezistorem $1,5\text{ k}\Omega$ teče proud 2 mA . Jaký je na něm úbytek napětí?

$$U = R \cdot I = 1,5\text{ k}\Omega \cdot 2\text{ mA} = 3\text{ V} \quad (U = 1500\Omega \cdot 0,002\text{ A} = 3\text{ V})$$

Příklad: Vodičem teče proud 10 A , úbytek napětí je na něm 2 V . Jaký je jeho odpor?

$$R = U/I = 2\text{ V}/10\text{ A} = 0,2\Omega$$



Obrázek č. 1.1

- a) voltampérová charakteristika rezistorů (závislost proudu na napětí, $R_2 < R_1$)
- b) pomůcka pro zapamatování Ohmova zákona (veličinu, kterou počítáme zakryjeme)
- c) ověření Ohmova zákona ($V =$ voltmetr, $A =$ ampérmetr)
- d) průřez kruhového a páskového vodiče (vyšrafováno)

1.3 Odpor vodiče

Vodiče jsou nejčastěji kovy, u kterých je vazba mezi jádrem atomu a elektrony velmi slabá a elektrony se mezi jádry atomů mohou volně pohybovat a stávat se nositeli elektrického proudu.

Elektrický odpor je charakteristickou vlastností každého vodiče.

Odpor vodiče je přímo úměrný jeho délce, nepřímě úměrný jeho průřezu. **Vlastnosti materiálu popisuje veličina měrný odpor ζ (rezistivita), která se číselně rovná odporu vodiče 1 m dlouhého o průřezu 1 m^2 .**

$$\text{Odpor vodiče } R = \zeta \cdot l/S \quad (\Omega, \Omega \cdot \text{m}, \text{m}, \text{m}^2).$$

V praxi se udává měrný odpor jako odpor vodiče dlouhého 1 m o průřezu 1 mm² ($\Omega \cdot \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$).

Převrácenou hodnotou elektrického odporu je **vodivost**. Značí se **G**, jednotka **siemens (S)**.

$$G = 1/R = I/U \text{ [S, A, V]}$$

Převrácenou hodnotou měrného odporu je měrná vodivost γ . Platí $\mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E}$.

Teplotní závislost odporu

Měrný odpor se udává při teplotě 20 °C. S rostoucí teplotou jeho hodnota u kovů roste (tepelný pohyb atomů překáží pohybu volných elektronů). U nevodičů a polovodičů se naopak s rostoucí teplotou zvyšuje pravděpodobnost roztržení vazby mezi ionty nebo uvolnění elektronů. Tím se odpor snižuje.

1.4 Druhy vodičů

Nejlepšími vodiči jsou **stříbro**, **měď** a **hliník**. Nejpožívanější je měď. Stříbro je příliš drahé. Hliník je sice levnější než měď, snadno se ale láme, vlivem tlaku se deformuje (uvolnění kontaktů na svorkovnicích a velmi těžko se pájí).

Měrný odpor mědi je 0,0178 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$.

Měrný odpor hliníku je 0,0285 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$.

Železo je horší vodič než měď a hliník, má lepší mechanické vlastnosti (tvrdost, pevnost v tahu. Jádra některých silnoproudých kabelů se proto vyrábějí ze železa. Karosérie automobilu slouží jako společný vodič záporného napětí – kostra.

Zlato se používá k povrchové úpravě kvalitních konektorů (vrstva tloušťky zhruba 5 mm).

Existují speciální slitiny (**konstantan**, **manganin**) a s minimálním teplotním součinitelem odporu.

Příklad: Jak velký odpor má měděný vodič délky 15 m o průměru 0,1 mm? Jaký úbytek napětí na něm vznikne, protéká-li jím proud 0,1 A?

$$S = \pi d^2/4 = 3,14 \cdot 0,1^2/4 = 0,00785 \text{ mm}^2$$

$$R = \zeta \cdot l/S = 0,0178 \cdot 15/0,00785 = 34 \text{ } \Omega$$

$$U = R \cdot I = 34 \cdot 0,1 = 3,4 \text{ V}$$

Vidíme, že příliš malý průměr vodiče ve srovnání s protékajícím proudem není vhodný (ve výše uvedeném případě 12,73 A/mm²). Vzniká na něm velký úbytek napětí, vodič se zahřívá a může se přepálit (viz dále).

Pro srovnání vypočítáme stejný příklad pro $d = 0,4 \text{ mm}$.

$$S = 0,125 \text{ mm}^2, R = 2,1 \text{ } \Omega. \text{ Zvětšením průměru 4krát se odpor vodiče zmenšil 16krát.}$$

Příklad: Jaký musí být průměr měděného vodiče, který je dlouhý 2 m, aby na něm při proudu 4 A byl úbytek napětí 0,5 V?

$$R = U/I = 0,5/4 = 0,125 \text{ } \Omega$$

$$S = \zeta /R = 0,0178 \cdot 2/0,125 = 0,285 \text{ mm}^2$$

$$d = \sqrt{(4S/\pi)} = \sqrt{0,3628} = 0,6 \text{ mm}$$

1.5 Práce, výkon a tepelné účinky elektrického proudu

Z definice napětí (práce potřebná k přenesení náboje) můžeme snadno odvodit vztah mezi výkonem, proudem a napětím (Joule-Lencův zákon)

$$A = Q \cdot U = I \cdot t \cdot U \quad P \cdot t = I \cdot t \cdot U \quad \mathbf{P = I \cdot U [W, A, V]}$$

Tímto vzorcem je možné také definovat napětí: 1 volt je napětí, při němž se na vodiči proudem 1 A vyvine výkon 1 W.

Elektrická práce, kterou vykoná stejnosměrný proud mezi dvěma místy v proudovém obvodu za určitou dobu je dána napětím U mezi těmito místy, proudem I a dobou t, po kterou tento proud obvodem prochází.

Elektrický proud, který obvodem prochází je vlastně pohybem elektrických nábojů, který koná práci. Práce se mění v teplo.

Ztrátový výkon na vodiči nebo na rezistoru můžeme po dosazení do Ohmova zákona vypočítat ze vztahů:

$$\mathbf{P = U \cdot I = U^2/R = R \cdot I^2}$$

Výkon můžeme vypočítat z kteréhokoliv z výše uvedených vzorců, vždy dostaneme stejné výsledky.

Při výpočtu používáme kterýkoliv z těchto vzorců.

Příklad: Vypočítejte ztrátový výkon na rezistoru, na kterém je napětí 20 V a kterým teče proud 0,1 A, všemi způsoby, ověřte shodnost výsledků.

$$P = U \cdot I = 20 \cdot 0,1 = 2 \text{ W} \quad R = U/I = 20/0,1 = 200 \Omega$$

$$P = U^2/R = 20^2/200 = 400/200 = 2 \text{ W}$$

$$P = R \cdot I^2 = 200 \cdot 0,1^2 = 200 \cdot 0,01 = 2 \text{ W}$$

Na každém vodiči vzniká průchodem elektrického proudu úbytek napětí, který je příčinou tepelných ztrát. Vodič se průchodem proudu zahřívá. Nosiče náboje – (nejčastěji volné elektrony kovů) narážejí na jádra atomů a způsobují jejich pohyb – teplo. Tepelné účinky elektrického proudu jistě všichni známe (žárovka, motor, kabely, elektronické přístroje).

Tyto ztráty jsou tím větší, čím větší je proud a čím tenčí je vodič. Vodiče, kterými teče velký proud (jednotky nebo desítky ampér), musí být dostatečně silné. Jinak by se přehřívaly, poškozovala by se jejich izolace a mohly by se i přerušit nebo zkratovat.

Je-li vodič poškozen nebo je-li špatně připojen ke svorkovnici (zoxidované nebo znečištěné kontakty), vzniká v takovém místě **přechodový odpor**. Na něm vznikají velké tepelné ztráty, odpor se zvětšuje, kontakty se opalují a v poškozeném místě se obvod nakonec přeruší.

Při daném odporu vodiče jsou tepelné ztráty na vodiči úměrné druhé mocnině procházejícího proudu. Při přenosu elektrické energie na velkou vzdálenost používáme vysokých napětí a tím i malých proudů, abychom tyto ztráty snížili na minimum (viz dále).

Tloušťku vodičů, které přenášejí informace (proud řádu miliampér) volíme zhruba 0,2 mm (s ohledem na mechanické požadavky). Oteplení takových vodičů je zanedbatelné.

Elektrickou práci udáváme buď v **joulech** – čti džaul (1 joule = práce spotřebiče o výkonu 1 W vykonaná za 1 sekundu, 1 J = 1 Ws - wattsekunda) nebo v **kilowatthodinách**.

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} \quad (3 \text{ 600 kWh} = 3 \text{ 600 000 Ws})$$

V elektrických zařízeních (motor, transformátor, generátor) dochází k přeměně energie z jedné formy na druhou. Využití energie není nikdy stoprocentní, část energie se vždy ztrácí ve formě tepla. Definujeme:

Příkon P_1 energie přiváděná do spotřebiče

Výkon P_2 práce vykonávaná spotřebičem

Účinnost η udává, kolik procent se využije užitečným způsobem

$$\eta = 100 \% \cdot P_2/P_1 \quad [%, \text{ W}, \text{ W}]$$

Účinnost motoru udává, kolik procent přiváděné elektrické energie se změně v mechanickou práci (zbytek se změně v teplo).

Účinnost transformátoru udává, kolik procent energie se přetransformuje z primárního do sekundárního vinutí (viz dále). Zbytek energie se změně v teplo.

Účinnost vařiče udává, kolik procent tepelné energie se využije (zbytek se rozptýlí).

Příklad: Topnou spirálou vařiče prochází při napětí 220 V proud 2,5 A. Jakou práci vykoná elektrický proud za 40 minut? Jaký je příkon vařiče?

$$P = U \cdot I = 220 \cdot 2,5 = 550 \text{ W} \text{ – příkon vařiče}$$

$$A = P \cdot t = 550 \text{ W} \cdot 40 \text{ min} \cdot 60 \text{ sec} = 1 \text{ 320 000 J}$$

$$1 \text{ 320 000} / 3 \text{ 600 000} = 0,367 \text{ kWh}$$

Příklad: Motor odebírá při napětí 230 V proud 1,2 A. Jaký je jeho výkon, pokud účinnost je 90 %.

$$P_1 \text{ (příkon)} = U \cdot I = 230 \cdot 1,2 = 276 \text{ W}$$

$$P_2 \text{ (výkon)} = P_1 \cdot \eta = 276 \cdot 0,9 = 248,4 \text{ W}$$

Příklad: Na rezistoru 100 Ω jsme naměřili úbytek napětí 5 V. Jak velký proud jím teče a jak velký je ztrátový výkon?

$$I = U/R = 5/100 = 0,05 \text{ A} = 50 \text{ mA}$$

$$P = U^2/R = 5^2/100 = 0,25 \text{ W} \text{ nebo } P = U \cdot I = 5 \cdot 0,05 = 0,25 \text{ W}$$

Příklad: Rezistor má hodnotu 4,7 Ω a maximální dovolené výkonové zatížení 0,2 W. Jak velký proud jím může protékat a pak velké napětí na něm může trvale být?

$$U = \sqrt{PR} = \sqrt{(0,2 \cdot 4,7)} = \sqrt{0,94} = 0,97 \text{ V}$$

$$I = \sqrt{P/R} = \sqrt{(0,2/4,7)} = \sqrt{0,04255} = 0,206 \text{ A}$$

Pokud ohříváme vodu elektrickým proudem, přemění se práce elektrického proudu v teplo Q. Platí vztah:

$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1),$$

kde **m** je hmotnost vody,

c měrné teplo vody = 4,18 $\cdot 10^3$ J/kg \cdot K

t_1 počáteční teplota vody

t_2 konečná teplota vody

Příklad: Kolik energie (tepla) potřebujeme k ohřátí 20 l vody z 10 na 40 °C?

$$Q = 20 \cdot 4,18 \cdot 10^3 \cdot (40 - 10) = 2,508 \cdot 10^6 \text{ J} = 0,7 \text{ kWh} \quad (: 3,6 \cdot 10^6)$$

Jak dlouho se bude tato voda ohřívát příkonem 2 kW?

$$A = Q = P \cdot t \quad t = Q/P = 0,7/2 = 0,35 \text{ hod} = 21 \text{ min}$$

Jaký je k tomu potřeba proud při napětí 230 V?

$$P = U \cdot I \quad I = P/U = 2000/230 = 8,7 \text{ A}$$

Účinnost ohřevu uvažujeme 100 %. Vidíme, že ohřev vody je činnost energeticky a tedy i finančně náročná. Elektrická topení, pračky, myčky a vařiče proto vyžadují velký proud, na který musí být dimenzovány přírodní vodiče a jističe.

1.6 Řešení jednoduchých obvodů s rezistor

Používáme Ohmův zákon a Kirhoffovy zákony.

1. KIRHOFFŮV ZÁKON – algebraický součet proudů do uzlu vstupujících se rovná součtu proudů z uzlu vystupujících. Uzel je místo, kde se stýkají 2 nebo více vodičů. Tento zákon je v podstatě zákonem zachování elektrického náboje. (Elektrický náboj ve vodiči nemůže vzniknout ani zaniknout.) Znaménkem, které proudům přiřadíme, rozlišujeme proudy do uzlu vstupující (např. +) a proudy z uzlu vystupující (např. -).

Jako příklad si odvodíme vzorec pro **PARALELNÍ ŘAZENÍ REZISTORŮ**.

Pro uzel A v obr. 1.2 a platí:

$I = I_1 + I_2$ – do tohoto vztahu dosadíme:

$$I_1 = U/R_1 \quad I_2 = U/R_2 \quad R = U/I$$

$$U/R = U/R_1 + U/R_2$$

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2$$

častěji uvádíme ve tvaru $R = (R_1 R_2)/(R_1 + R_2)$

Pro více rezistorů paralelně platí pouze vztah $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4$, který dále neupravujeme.

Příklad: Jaký je výsledný odpor paralelního spojení dvou rezistorů o hodnotách 1 kΩ?

$$R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 1/2 \text{ (k}\Omega\text{)} = 500 \Omega$$

Zapamatujte si, že odpor paralelního spojení dvou stejných rezistorů se rovná polovině hodnoty tohoto rezistoru.

Přidáme-li k rezistoru paralelně jiný, jeho odpor se vždy zmenší.

Příklad: O kolik procent se sníží odpor, přidáme-li k rezistoru 4,7 kΩ rezistor 47 kΩ?

$R = 4,7 \cdot 47 / (4,7 + 47) = 4,273 \text{ k}\Omega = 90,9 \%$ původní hodnoty. Pro přibližný odhad (abyste při experimentování nemuseli pořád brát do ruky kalkulačku) doporučuji předpokládat, že přidání paralelního rezistoru $10\times$ (100×) většího sníží odpor daného rezistoru o 10 (1) %.

Příklad: Ke zdroji napětí +12 V (palubní síť automobilu) jsou paralelně připojeny rezistory (světla, vyhřívání zadního skla, apod) $R_1 = 2 \Omega$ a $R_2 = 4 \Omega$. Jaký jimi poteče výsledný proud?

Z Ohmova zákona vypočítáme jednotlivé proudy.

$$I_1 = U / R_1 = 12 / 2 = 6 \text{ A}$$

$$I_2 = U / R_2 = 12 / 4 = 3 \text{ A}$$

Výsledný proud bude podle 1. Kirchoffova zákona $I = I_1 + I_2 = 6 + 3 = 9 \text{ A}$.

Kontrola: Výsledný odpor R paralelního spojení R_1 a R_2 je $2 \cdot 4 / (2+4) = 8/6 = 1,33 \Omega$

Výsledný proud $I = U/R = 12 / 1,333 = 9 \text{ A}$. Oběma způsoby se musíme dostat ke stejnému výsledku.

Všimněte si, že **menším odporem teče větší proud, větším odporem menší proud**, pokud jsou připojeny ke stejnému zdroji napětí.

Paralelně jsou zapojeny všechny spotřebiče v domácnosti k síti 230 V/50 Hz nebo spotřebiče v automobilu k palubní síti vozidla. Výsledný odběr proudu je vždy součtem proudů všech zapnutých spotřebičů. Ty pracují nezávisle na sobě, jejich napájecí napětí se nesmí měnit při zapnutí nebo vypnutí dalšího spotřebiče.

2. KIRCHHOFFŮV ZÁKON – algebraický součet svorkových napětí zdrojů a všech úbytků napětí na spotřebičích v uzavřené smyčce se rovná 0 nule. Smyčka je uzavřená dráha v části obvodu. Tento zákon je zákonem zachování energie.

Zdůvodnění: Při průchodu náboje elektrickým polem vzniká práce. Napětí na každém spotřebiči je dáno prací potřebnou k přemístění náboje. Projde-li náboj po uzavřené dráze musí být tato práce nulová, náboj se vrátí do místa stejného potenciálu (potenciál je napětí vůči referenčnímu uzlu – zemi).

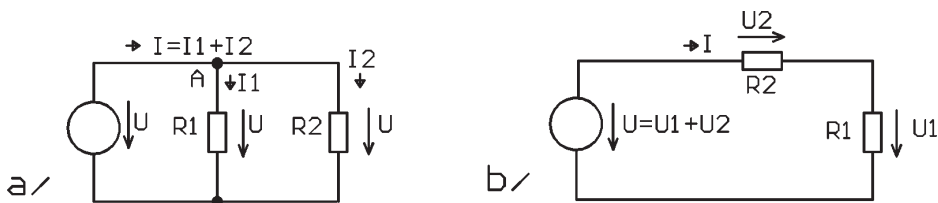
Jako příklad použití si odvodíme vzorec pro **SÉRIOVÉ ŘAZENÍ REZISTORŮ**.

$$U_1 + U_2 - U_0 = 0 \quad R = \text{výsledný odpor}$$

$$R_1 I + R_2 I - U_0 = 0$$

$$(R_1 + R_2) I = U_0 \quad R = U_0 / I \quad \mathbf{R = R_1 + R_2} \quad \text{všemi rezistory teče stejný proud}$$

Tento vztah platí pro libovolný počet rezistorů zapojených v sérii. Výsledný odpor je součtem všech odporů zapojených do série.



Obrázek č.1.2

Odvození vzorce pro a) paralelní (dělič proudů)

b) sériové (dělič napětí) řazení rezistorů

1.7 Dělič napětí

Z obrázku sériového zapojení rezistorů 1.2b si odvodíme důležitý vztah pro dělič napětí

$$\begin{aligned}U_1 &= R_1 I & U_2 &= R_2 I & U &= (R_1 + R_2) \cdot I \\U_1/U &= R_1 I / (R_1 + R_2) & I &= R_1 / (R_1 + R_2) \\U_1 &= U \cdot R_1 / (R_1 + R_2)\end{aligned}$$

Tento vzorec je vztážen k výše uvedenému obrázku. Kdybychom ve schématu zaměnili R_1 a R_2 , museli bychom napětí U_1 vypočítat podle vzorce $U_1 = U \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$. V praktických zapojeních se samozřejmě nesetkáváme pouze s rezistory R_1 a R_2 . Proto doporučuji si zapamatovat, že v čitateli je rezistor, na kterém chceme napětí vypočítat a ve jmenovateli je součet všech rezistorů v uzavřené proudové smyčce (nemusí být pouze 2).

Příklad: $U = 12 \text{ V}$, $R_1 = 100 \text{ } \Omega$, $R_2 = 1100 \text{ } \Omega$ (viz obr. 1.2b). Vypočítejte napětí U_1 a U_2 a výsledný proud tekoucí obvodem.

$$\begin{aligned}U_1 &= U \cdot R_1 / (R_1 + R_2) = 12 \cdot 100 / (100 + 1100) = 1 \text{ V} \\U_2 &= U \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 12 \cdot 1100 / (100 + 1100) = 11 \text{ V} \\I &= U / (R_1 + R_2) = 12 \text{ V} / 1200 \text{ } \Omega = 0,01 \text{ A} \text{ nebo } 12 \text{ V} / 1,2 \text{ k}\Omega = 10 \text{ mA}\end{aligned}$$

$$\text{Kontrola: Platí 2. Kirhoffův zákon} \quad U = U_1 + U_2 \quad 12 = 1 + 11$$

Na obou rezistorech platí Ohmův zákon:

$$\begin{aligned}U_1 &= R_1 \cdot I = 100 \cdot 0,01 = 1 \text{ V} \\U_2 &= R_2 \cdot I = 1100 \cdot 0,01 = 11 \text{ V}\end{aligned}$$

Tímto způsobem jsme schopni vypočítané výsledky sami zkontrolovat. Na první pohled je zřejmé, že **na větším rezistoru je větší úbytek napětí než na menším**.

Při sériovém zapojení teče všemi spotřebiči (odpory) stejný proud. Vypnutí nebo poškození jednoho spotřebiče vypne proud v celém obvodu (příklad použití – žárovky na vánočním stromku).

Se sériovým zapojením se setkáme např. v automobilu u světel (viz obr. 9.2). Žárovka se k napájecímu napětí připojuje přes přepínač (nebo kontakt relé, viz dále) a přes pojistku.

Je-li pojistka v pořádku, je její odpor minimální. Stejně na sepnutém spínači je nulový odpor. Na žárovce je plné napájecí napětí, žárovka svítí. ($R_2 = 0$, $U_1 = U_0$).

Je-li přerušená pojistka, je její odpor nekonečně velký a je na ní plné napájecí napětí. Obvodem neprochází proud, žárovka nesvítí. Na žárovce je nulové napětí. ($R_2 = \infty$, $U_2 = U_0$, $U_1 = 0$, $I = 0$).

Obdobně je-li přepínač (relé) rozepnutý je na něm plné napájecí napětí.

Pokud je některý vodič přerušený, je v místě přerušení plné napájecí napětí.

Pokud žárovka nesvítí a přitom je na ní plné napájecí napětí, je její vlákno přerušené ($R_1 = \infty$, $U_1 = U_0$, $I = 0$).

Pokud je v obvodu nedokonalý kontakt, projevuje se při větším proudu úbytkem napětí, ohříváním se, případně jiskřením.

Důkladné pochopení funkce děliče napětí nám umožní takové závady snadno a rychle najít.

1.8 Zdroje napětí a proudu

Zdroje dodávají do elektrického obvodu napětí a proud a tím i výkon. Zdrojem stejnosměrného napětí je nejčastěji **baterie** (akumulátor), kde vzniká napětí a proud díky chemickým reakcím. Zdrojem střídavého napětí jsou nejčastěji **generátory** v elektrárnách. Ze střídavého napětí můžeme vyrobit stejnosměrné napětí v přístroji, který se nazývá **laboratorní zdroj**.

Vývody stejnosměrného zdroje označujeme + a –. Technický směr proudu byl dříve zaveden od + k –. Později se zjistilo, že směr pohybu elektronů, které jsou nositeli proudu je opačný. Při řešení obvodů používáme ideální zdroje. **Ideální zdroj napětí dává konstantní napětí** bez ohledu na velikost odebíraného proudu. **U skutečného zdroje dochází vždy při odběru proudu k poklesu svorkového napětí**. Napětí zdroje **naprázdno** nazýváme **vnitřní napětí zdroje** U_i . V sérii s tímto zdrojem je **vnitřní odpor zdroje** R_i .

Závislost svorkového napětí na odebíraném proudu vyjadřuje **zatěžovací charakteristika**. Ve většině případů (lineární zdroje) se jedná o přímku, která spojuje 2 body U_i a I_k , kde I_k je zkratový proud zdroje $I_k = U_i/R_i$ (obr. 1.3c). U většiny zdrojů musíme zajistit, aby nepracovaly do zkratu, jinak hrozí jejich zničení akumulátory (např. autobaterie) mají velmi malý vnitřní odpor (řádově setiny Ω , jejich zkratový proud je ve stovkách ampér.

Tepelné účinky zkratových proudů u síťového napětí i v automobilu mohou být nebezpečné. Mohou být příčinou zničení vodičů nebo dokonce požáru. Je třeba se před nimi chránit (pojistky, jističe, viz dále).

Běžné tužkové monočlánky mají vnitřní odpor řádově 1 Ω , při zkratu se silně zahřejí a brzy se zničí.

Laboratorní (stabilizovaný) zdroj se chová jako ideální zdroj napětí (viz obr. 11.c). Při překročení přednastaveného proudového odběru (jednotky miliampér až jednotky ampér) dojde k prudkému poklesu napětí, aby se zdroj nezničil nebo se nepoškodily obvody k němu připojené. Odpor sítě (400/230 V) je rovněž velmi malý. Proti zkratu je rozvod napětí chráněn jističi. Zkratový proud by jinak poškodil vedení a mohl způsobit požár.

Ideální zdroj napětí má nulový vnitřní odpor. Dodává do zátěže stále **stejný proud** nezávisle na velikosti připojené zátěže.

Velmi často potřebujeme znát nejen vnitřní napětí zdroje (změříme jej voltmetrem, pokud zdroj není zatížen), ale také jeho vnitřní odpor. Teprve potom máme jistotu, že zdroj bude správně pracovat i při větším odběru proudu a že jeho napětí příliš nepoklesne.

Největší odběr z autobaterie je při startu. Bude-li mít baterie velký vnitřní odpor, její napětí při startu poklesne víc, než je dovoleno. Automobil bude potom startovat špatně nebo vůbec.

K určení vnitřního odporu musíme napětí zdroje nejprve změřit **naprázdno** (obr. 1.3a). Tím určíme vnitřní napětí zdroje. Potom zdroj zatížíme vhodným zatěžovacím odporem, aby jím tekla přiměřená proud (nebo můžeme u automobilu zapnout dálková světla). Změříme napětí na svorkách zdroje (obr. 1.3b). Z úbytku napětí vypočítáme vnitřní odpor zdroje. Potom už můžeme snadno vypočítat svorkové napětí zdroje při jiném odběru proudu a rozhodnout, je-li zdroj (autobaterie) v pořádku. Tento postup si ukážeme na následujícím příkladu.

Na autobaterii jsme naměřili naprázdno $U_i = 13,5$ V. Při zatížení odporem 1Ω její svorkové napětí kleslo na 13 V. Určete její vnitřní odpor.

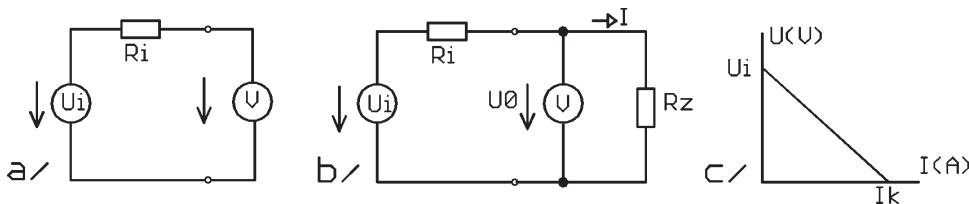
Z Ohmova zákona vypočítáme zatěžovací proud baterie $I = U/R = 13/1 = 13$ A.

Tento proud vyvolá na vnitřním odporu baterie úbytek napětí $13,5 - 13 = 0,5$ V.

Vnitřní odpor baterie vypočítáme $(13,5 - 13)/13 = 0,5/13 = 0,04 \Omega$ $R_i = (U_i - U_0)/I$.

Z těchto údajů můžeme například vypočítat jaké bude svorkové napětí baterie při proudu 100 A (proud při startu) $U = U_i - R_i \cdot I = 13,5 - 0,04 \cdot 100 = 13,5 - 4 = 9,5$ V. To je minimální hodnota napětí olověného akumulátoru, který je při tomto proudu na hranici použitelnosti a je třeba doporučit jeho výměnu. Z tohoto příkladu vidíme, že změřit naprázdno napětí baterie nestačí.

Obdobně i napětí tužkových monočlánků nebo transformátorů se s rostoucím odběrem proudu snižuje. Při kontrole síťových rozvodů 230 V potřebujeme mít jistotu, že jejich vnitřní odpor je minimální (že byly zhotoveny z vodičů o dostatečném průřezu a že v nich nejsou přechodové odpory, které by mohly být příčinou požáru). Za tímto účelem se vyrábějí přístroje pro měření odporu sítě. Zásuvka je na krátký okamžik zatížena velkým proudem a z úbytku napětí se automaticky vypočítá vnitřní odpor a zobrazí na displeji.



Obrázek č. 1.3

- a) náhradní schéma zdroje napětí (autobaterie, tužkový monočlánek, transformátor, atd), na kterém měříme voltmetrem napětí naprázdno
 b) měření vnitřního odporu zdroje (R_z je zatěžovací odpor, U_0 je svorkové napětí)
 c) zatěžovací charakteristika zdroje (závislost svorkového napětí na odebíraném proudu, U_i je vnitřní napětí zdroje – napětí naprázdno, I_k je zkratový proud)

2 Elektrostatické pole

Elektrické náboje, které jsou v klidu, se projevují silovými účinky a vytvářejí elektrické pole. Elektrické náboje jsou kladné (nedostatek elektronů) a záporné (přebytek elektronů). Souhlasné náboje se odpuzují, nesouhlasně přitahují. Coulombův zákon říká, že **síla, kterou náboje na sebe působí, je přímo úměrná součinu jejich velikosti a nepřímo úměrná druhému mocnině jejich vzdálenosti** (obr. 2.1a).

$$F = k Q_1 Q_2 / r^2 \quad (A; N.m^2. C^{-2}, C, C, m) \quad k = 1 / (4 \pi \epsilon_0)$$

kde ϵ_0 je **permitivita vakua** (viz dále).

Intenzita elektrického pole E je síla působící na jednotkový kladný náboj

$$E = F/Q \text{ (N.C}^{-1}\text{, N, C)}$$

Je to vektorová veličina, která má v každém bodě elektrostatického pole velikost a orientaci totožnou se smyslem síly, která na kladný jednotkový náboj působí.

Jednotkou intenzity elektrického pole je N/C (newton/coulomb), v praxi se používá V/m

$$[F] = \text{J/m} = \text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s/m} \quad [Q] = \text{C} = \text{A} \cdot \text{s} \quad [E] = \text{V/m}$$

Intenzita elektrického pole se v každém místě rovná spádu napětí.

Každému bodu elektrostatického pole můžeme přiřadit určitý **potenciál** (napětí vůči jedné referenční elektrodě). Místa, která mají vzhledem k některé elektrodě **stejně napětí**, se nazývají ekvipotenciální hladiny.

Vektor intenzity elektrického pole je vždy **kolmý k ekvipotenciálním hladinám**. Ve vodičích je téměř nulová hodnota E, viz vztah $J = \gamma E$. Kdyby tomu tak nebylo, blížila by se hodnota J (proudové hustoty) nekonečnu.

Elektrostatické pole zobrazujeme pomocí elektrických **siločar**. Jsou to myšlené čáry, které sledují směr silového působení těles. Začínají a končí vždy na povrchu vodivých těles. Jejich smysl je shodný se směrem pohybu kladného náboje vloženého do pole. V elektrostatickém poli neexistují uzavřené siločáry. Siločáry se nikdy neprotínají.

Na siločáry jsou kolmé tzn. **ekvipotenciály** – křivky spojující místa se stejným elektrickým potenciálem.

V **homogenním elektrostatickém poli** jsou **siločáry rovnoběžné**. Intenzita elektrického pole je zde konstantní. Příkladem je pole mezi 2 rovnoběžnými deskami kondenzátoru (obr. 2.1b).

V nehomogenním elektrickém poli není hustota indukčních čar stejná, intenzita není konstantní. Příkladem je elektrostatické pole mezi 2 opačně nabitými koulemi, mezi 2 vodiči, mezi dvěma soustřednými válci (koaxiální vodič).

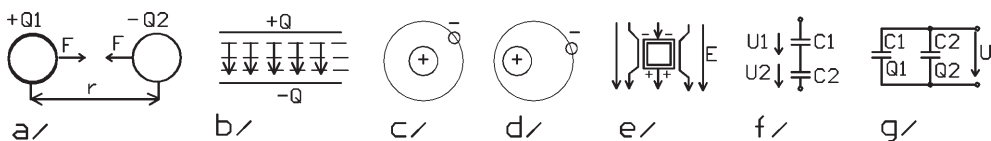
Permitivita je charakteristickou vlastností **izolantů** (jako u vodičů vodivost). V izolantech jsou elektrické náboje (elektrony) vázány na pevné místo. V izolantech může existovat elektrické pole, které je polarizuje. Uvnitř atomů nebo molekul dochází k posunu nábojů, vznikají **dipóly** (obr. 2.1 c, d).

Permitivita $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, kde ϵ_0 je **permitivita vakua** $8,854 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$ a ϵ_r je **relativní permitivita** (bezrozměrná).

Relativní permitivita popisuje schopnost dielektrika se **polarizovat** působením elektrostatického pole. Při překročení elektrické pevnosti se u dielektrika roztrhnou vazby mezi náboji, nastává **průraz**, dielektrikum se začne chovat jako vodič. **Elektrická pevnost** je důležitou vlastností izolantů, závisí na teplotě, vlhkosti, apod. Typické hodnoty jsou pro vzduch 2 až 3 kV/mm, olej 20–30 kV/mm, polystyrén, sklo, slída 20–80 kV/mm.

Z izolačních materiálů je vyrábí pláště kabelů, kryty a dielektrikum kondenzátorů.

Pokud potřebujeme odstranit elektrostatické pole z určitého prostoru, obklopíme jej vodivým krytem – **stínící kryt**. Elektrostatické pole nemůže existovat uvnitř vodivého prostoru, elektrické siločáry vždy končí na povrchu vodiče.



Obrázek 2.1.

- a) síla působící mezi 2 nabitými tělesy
- b) homogenní elektrické pole mezi 2 deskami (plně siločáry, čárkovaně ekvipotenciály)
- c) atom nepolarizovaného dielektrika
- d) atom polarizovaného dielektrika
- e) princip stínění
- f) sériové zapojení kondenzátorů (sčítají se napětí, $U_1 + U_2 = U$)
- g) paralelní zapojení kondenzátorů (sčítají se náboje a kapacity, $Q_1 + Q_2 = Q$, $C_1 + C_2 = C$)

2.1 Kapacita, Kondenzátory

Kapacita je schopnost vodiče vázat určitou velikost náboje při jednotkovém napětí. Součástky, jejichž základní vlastnost je kapacita, se nazývají **kondenzátory**. Jednotkou kapacity je **farad F**. **Kondenzátor má kapacitu 1 F, jestliže při napětí 1 V udrží náboj 1 C.**

$$C = Q/U$$

V základní podobě **kondenzátor** tvoří **2 vodivé, rovnoběžné desky**. **Prostor mezi nimi je vyplněn dielektrikem.**

$$C = Q/U \text{ (definiční vztah)}$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r S/d \text{ (výpočet kapacity kondenzátoru z jeho rozměrů, S = plocha desek, d = vzdálenost mezi nimi)}$$

Jako dielektrikem se používá kondenzátorový papír, slída, keramika, plastové folie.

U elektrolytických kondenzátorů tvoří dielektrikem tenká vrstva kysličníku na povrchu hliníkové nebo tantalové elektrody. Ta se vytváří a udržuje působením elektrického proudu, je-li elektroda umístěna ve vhodném elektrolytu. Vývody těchto kondenzátorů jsou označeny + a -. Případná jejich záměna (přivedení napětí opačné polarity) by způsobila depolarizaci této vrstvy a tím zničení kondenzátoru. **Elektrolytické kondenzátory nesmíme přepólovat.**

Protože základní jednotka kapacity je příliš velká pro běžné použití, používají se menší jednotky: mikrofard – μF (10^{-6} F), nanofard – nF (10^{-9} F) a pikofard – pF (10^{-12} F). Za základní jednotku se často považuje v praxi pikofard.

Je-li např. ve schématu u kondenzátoru napsáno 100, znamená to 100 pF, 22 n znamená 22 nF, M1 = 0,1 mikrofardu = 100 nF, 10 M (10 u) = 10 mikrofardů, 2m2 = 2,2 milifarady = 2 200 mikrofardů. Často se značí hodnota kondenzátorů číselným kódem. Např. 332 znamená $33 \cdot 10^2$ (pikofardů) = 3,3 nF; 104 = $10 \cdot 10^4$ pF = 100 nF, apod.

Procvičte si převody jednotek.

$$1F = 1000 \text{ mF} (10^3) = 1\,000\,000 \mu F (10^6) = 1\,000\,000\,000 \text{ nF} (10^9) = 1\,000\,000\,000\,000 (10^{12}) \text{ pF}$$

$$1 \text{ mF} = 1000 \text{ }\mu\text{F} (10^3) = 1\,000\,000 \text{ nF} (10^6) = 1\,000\,000\,000 \text{ pF} (10^9)$$

$$1 \text{ }\mu\text{F} = 1\,000 \text{ nF} (10^3) = 1\,000\,000 \text{ pF} (10^6)$$

$$1 \text{ nF} = 1\,000 \text{ pF} (10^3)$$

2.2 Sériové a paralelní spojení kondenzátorů.

Při paralelním spojení je na všech kondenzátorech stejné napětí, náboj se rozdělí v poměru kapacit

$$Q_1 = C_1 \cdot U \quad Q_2 = C_2 \cdot U \quad Q = (C_1 + C_2) \cdot U$$
$$C = C_1 + C_2$$

Při **paralelním** spojení kondenzátorů je **výsledná kapacita součtem jednotlivých kapacit**.

Při sériovém zapojení kapacit náboj přivedený na první kondenzátor váže stejný náboj na druhém kondenzátoru. Na všech kondenzátorech bude stejný náboj. Toto spojení můžeme nahradit jedním kondenzátorem o kapacitě C na kterém bude napětí

$$U = U_1 + U_2 \quad Q/C = Q/C_1 + Q/C_2$$
$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 \quad C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$$

Při **sériovém** spojení kondenzátorů se podobně jako u paralelního zapojení rezistorů **sčítají jejich převrácené hodnoty**.

U složitějších zapojení provádíme zjednodušování podobným způsobem jako u rezistorů.

Máme-li kondenzátor nabitý nábojem, jehož elektrody od sebe oddálíme (kapacita kondenzátoru zmenší) a náboj zůstane zachován, pak se napětí na kondenzátoru zvýší

$$(Q = C \cdot U \quad C_1 \cdot U_1 = C_2 \cdot U_2).$$

Vznikne tak elektrostatické napětí o vysoké hodnotě. To může vzniknout prakticky „z ničeho“. Elektrické náboje vznikají mechanickým třením nestejnorodých látek (pohyb dopravních pásů, pohyb sypkých materiálů, v tiskárnách, v letadlech, v automobilech). Mezi elektrostatické jevy patří i blesky.

Problémy přináší elektrostatický náboj při práci s těkavými hořlavými látkami a při práci s některými typy polovodičů (technologie MOS).

Před škodlivými účinky těchto nábojů se chráníme těmito způsoby: vodivým pospojováním a uzemněním kovových částí přístrojů, použitím vhodných (polovodivých) podlahových krytin (antistatické linoleum), vhodnou podložkou na pracovním stole, vhodná obuv a oblečení (bavlna, nikoliv umělá vlákna), zvýšením vodivosti vzduchu – zvlhčení, ultrafialové záření.

V této kapitole jsme pracovali s tzn. **ideálním kondenzátorem, který je bezdrátový**. Ve skutečném kondenzátoru existuje určitý **svodový odpor** mezi elektrodami (dielektrikum má určitou vodivost). Ten způsobí, že se nabitý kondenzátor po určité době sám vybije.