

**STŘEDNÍ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ, OSTRAVA,  
NA JÍZDÁRNĚ 30, p. o.**

# **ELEKTROTECHNIKA**

**Ing. Pavel VYLEGALA**

**2006**

# Obsah

<b>Základní pojmy</b> .....	4
Mezinárodní soustava jednotek .....	4
Násobky a díly jednotek .....	4
Stavba atomu .....	5
Rozdělení látek dle vodivosti .....	5
Elektrický náboj.....	5
<b>Stejnoseměrný proud</b> .....	6
Elektrický proud a napětí.....	6
Hustota elektrického proudu .....	7
Elektrický odpor a vodivost.....	7
Rezistivita a konduktivita .....	7
Závislost odporu vodiče na teplotě.....	8
Ohmův zákon.....	9
Úbytek napětí na vodiči.....	10
Elektrická práce a výkon stejnosměrného proudu.....	11
Příkon, ztráty a účinnost .....	11
Tepelné účinky elektrického proudu .....	12
Ideální a skutečný zdroj napětí .....	12
Řazení elektrických zdrojů .....	14
Kirchhoffovy zákony.....	16
Sériové a paralelní řazení rezistorů .....	17
Transfigurace odporů z trojúhelníka do hvězdy .....	21
Řešení elektrických obvodů postupným zjednodušováním .....	22
Řešení elektrických obvodů pomocí Kirchhoffových zákonů.....	23
Řešení elektrických obvodů metodou smyčkových proudů.....	25
Řešení elektrických obvodů metodou uzlových napětí .....	26
Dělič napětí.....	27
Theveniova věta.....	30
Nortonova věta .....	31
Rezistory .....	32
<b>Elektrostatické pole</b> .....	33
Veličiny elektrostatického pole .....	33
Coulombův zákon.....	35
Kapacita deskového kondenzátoru .....	36
Druhy kondenzátorů .....	37
Tvary elektrostatických polí .....	38
Vodič v elektrickém poli .....	38
Dielektrikum v elektrickém poli.....	39
Elektrická pevnost dielektrika .....	39
Energie elektrostatického pole.....	40
<b>Magnetické pole</b> .....	40
Magnetické vlastnosti látek .....	40
Magnetické pole přímého vodiče a cívky.....	41
Intenzita a indukce magnetického pole .....	44

Magnetický odpor a vodivost .....	45
Dynamické účinky elektrického proudu.....	46
Ztráty hysterézní a vířivými proudy .....	47
<b>Střídavý proud</b> .....	48
Vznik střídavého proudu a napětí.....	48
Hodnoty elektrických veličin sinusového průběhu .....	50
Znázorňování sinusových veličin fázorovými diagramy.....	51
Rezistor, cívka, kondenzátor v obvodu střídavého proudu .....	52
Ideální a skutečné parametry rezistoru, cívky a kondenzátoru.....	55
Vzájemná indukčnost cívek, řazení cívek .....	56
Sériové a paralelní řazení kondenzátorů.....	60
Sériové řazení R, L, C .....	62
Paralelní řazení R, L, C .....	67
Duální obvody .....	71
Rezonance v sériovém obvodu.....	73
Rezonance v paralelním obvodu.....	75
Thomsonův vzorec .....	76
Řešení obvodů střídavého proudu .....	76
Elektrická práce a výkon střídavého proudu, složky výkonu střídavého proudu.....	79
Fázový posun proudu a napětí, účinník .....	80
Vznik trojfázového napětí .....	82
Spojení trojfázového spotřebiče do trojúhelníku a do hvězdy .....	83
Práce a výkon v třífázovém obvodu .....	86
<b>Přechodové jevy ve stejnosměrných obvodech</b> .....	87
Přechodový jev při zapínání a vypínání obvodu R, C .....	87
Přechodový jev při zapínání a vypínání obvodu R, L .....	90
<b>Elektrotechnické kreslení</b> .....	92
Normalizace v elektrotechnice .....	92
Rozdělení elektrotechnických schémat .....	93
Zásady kreslení v elektrotechnice.....	93
Kreslení schématických značek.....	94
Kreslení blokových značek.....	94
Zásady pro sestavování a čtení schémat v elektrotechnice.....	94
<b>Elektrotechnické předpisy</b> .....	94
Elektrizační zákon .....	94
Připojování elektrických odběrných zařízení .....	95
Vyhláška č. 50/1978 Sb.....	95
Ochrana před nebezpečným dotykem.....	95
Obsluha a práce na elektrických zařízeních .....	96
Revize elektrických zařízení.....	96

## Základní pojmy

### Mezinárodní soustava jednotek

Všechny fyzikální pojmy stanovené kvantitativně se stávají fyzikálními veličinami. Fyzikální veličina je vlastnost jevu nebo hmoty, kterou dovedeme měřit. Mezi různými fyzikálními veličinami existují určité závislosti (zákony), které vyjadřujeme matematickými vztahy. Proto, aby matematické vztahy mezi veličinami byly jednoduché a přehledné, bylo stanoveno několik základních veličin a k nim zvoleny jednotky. Tyto jednotky tvoří mezinárodní soustavu jednotek SI. V mezinárodní soustavě jednotek rozlišujeme tři základní kategorie jednotek:

#### a) Základní jednotky SI

<i>jednotka</i>	<i>zkratka jednotky</i>	<i>veličina</i>
metr	m	délka
kilogram	kg	hmotnost
sekunda	s	čas
ampér	A	elektrický proud
kelvin	K	teplota
mol	mol	látkové množství
kandela	cd	svítivost

#### b) Doplnkové jednotky

Doplňují základní jednotky SI; např.

radián	rad	rovinný úhel
steradián	sr	prostorový úhel

#### c) Odvozené jednotky soustavy SI

Vytvářejí se kombinacemi základních jednotek. Některé odvozené jednotky soustavy SI se vyjadřují pomocí základních jednotek, jiné mají zvláštní název.

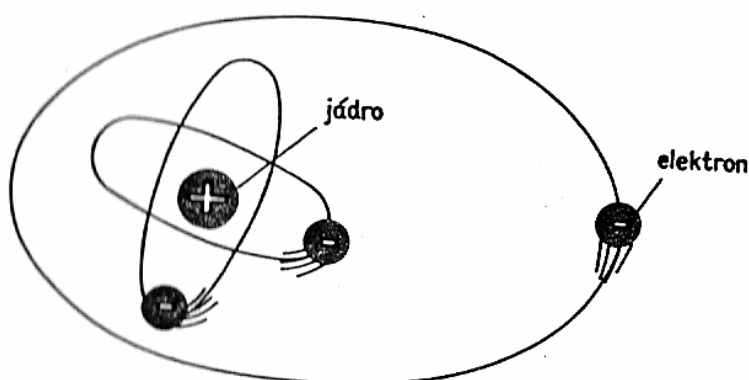
### Násobky a díly jednotek

Násobky a díly jednotek v soustavě SI se přednostně tvoří podle třetí mocniny čísla deset. Předpony a jejich dohodnuté zkratky jsou:

T	tera-	$10^{12}$
G	giga-	$10^9$
M	mega-	$10^6$
k	kilo-	$10^3$
m	mili-	$10^{-3}$
$\mu$	mikro-	$10^{-6}$
n	nano-	$10^{-9}$
p	piko-	$10^{-12}$
f	fento-	$10^{-15}$

## Stavba atomu

Každý atom se skládá z jádra a obalu. V jádře se nacházejí protony a neutrony, v obalu elektrony. Proton je kladně nabitá elementární částice atomového jádra, nese nejmenší možný elektrický náboj (tzv. elementární náboj)  $e^+ = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ . Neutron je elektricky neutrální částice atomového jádra. Elektron je záporně nabitá elementární částice obalu atomu. Elektron nese opačný elementární náboj než proton  $e^- = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ . Obal atomu je možno si představit jako jednotlivé vrstvy vložené do sebe. Jednotlivé vrstvy obsahují určitý počet elektronů. Ve vnější vrstvě obalu atomu kovů se vlivem vnějších sil mohou elektrony uvolnit a putují kovem jako volné elektrony. Tyto volné elektrony vedou kovem elektrický proud. Pokud atom obsahuje stejný počet protonů a elektronů chová se elektricky neutrálně. Pokud chybí atomu elektrony, je kladný a nazývá se kation. Pokud má atom elektronů více než protonů, je záporný a nazývá se anion.



*Model atomu lithia*

Valenční vrstva a počet elektronů v této vrstvě určuje rozdělení látek dle vodivosti.

## Rozdělení látek dle elektrické vodivosti

Látky mají různou vnitřní stavbu, a tím také různou schopnost vést elektrický proud. Proto látky rozdělujeme do tří základních skupin:

- 1) **Vodiče** – mezi vodiče patří kovy (měď, hliník, stříbro atd.), kapalné vodiče (elektrolyty) – u kapalných vodičů nevedou elektrický proud elektrony ale ionty a kapaliny (voda, olej atd.).
- 2) **Izolanty** – nevedou elektrický proud (sklo, papír atd.), dokonalé izolanty neexistují.
- 3) **Polovodiče** – vedou elektrický proud za určitých podmínek.

## Elektrický náboj

Látky obsahují elektricky nabitě částice (proton a elektron), které nesou elektrický náboj  $Q$ . Ten vyjadřuje schopnost částic působit na sebe elektrickými silami. Jednotkou elektrického náboje je Coulomb (C). Existují náboje dvou polarit: kladné (náboj protonu) a záporné (náboj elektronu). Náboj nelze od jeho částice oddělit. Nejmenší velikost má základní (elementární) náboj elektronu  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ . Náboj jednoho coulombu představuje  $6,242 \cdot 10^{18}$  elektronů. Náboj 1C se přesune jestliže po dobu 1s protéká proud 1A.

$$Q = I \cdot t \quad (C; A, s)$$

Prvky, které jsou schopny pojmout elektrický náboj jsou kondenzátory, které jsou charakterizovány svou kapacitou:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (F; C, V)$$

Z toho:

$$Q = C \cdot U \quad (C; F, V)$$

*Příklad 1: Určete počet elektronů, které projdou vodičem za dobu 5 sekund a elektrickým proudem 30mA.*

## Stejnoseměrný proud

### Elektrický proud a napětí

**Elektrický proud** je uspořádaný pohyb elektrických nábojů určitým směrem. Je dán elektrickým nábojem  $Q$ , který projde vodičem za dobu  $t$ . Elektrický proud se značí  $I$  a jeho jednotkou je ampér (A).

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{I \cdot t}{t} \quad (A; C, s)$$

Proud 1A lze definovat jako tok  $6,242 \cdot 10^{18}$  elektronů průřezem vodiče za 1s. Elektrický proud měříme ampérmetrem.

**Elektrické napětí** je definováno jako rozdíl dvou potenciálů  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ .

$$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

Potenciál je práce (W) potřebná k přemístění jednotkového náboje  $Q_0$  z nulové energetické hladiny (zem) na danou energetickou hladinu. Elektrické napětí lze tedy vypočítat:

$$U = \frac{W}{Q} = \frac{U \cdot I \cdot t}{I \cdot t} \quad (V; J, C)$$

Elektrické napětí měříme voltmetrem.

## Hustota elektrického proudu

Při průtoku elektrického proudu vodičem vzniká teplo a tím se vodič zahřívá. Aby zahřívání nebylo příliš velké, stanovuje se hustota elektrického proudu (proudová hustota), která nám udává, jak velký proud může protékat vodičem určitého průřezu. Proudová hustota se značí  $J$ , jednotkou je ampér na čtverečný metr ( $A \cdot m^{-2}$ ). V praxi se obvykle používá jednotka  $A \cdot mm^{-2}$ , a to v rozmezí 2 - 4  $A \cdot mm^{-2}$ .

$$J = \frac{I}{S} \quad (A \cdot m^{-2}; A, m^2)$$

*Příklad 2: Určete hustotu elektrického proudu ve vodiči o průměru 0,4mm při proudu 2,3A.*

## Elektrický odpor a vodivost

**Elektrický odpor** (rezistance) je veličina, která vyjadřuje vlastnosti prostředí, kterým prochází elektrický proud. Elektrický odpor je charakteristickou vlastností vodiče, jeho hodnota závisí na geometrických rozměrech a materiálu. Různé materiály kladou pohybu elektronů různě velký odpor. Elektrický odpor se značí  $R$  a jeho jednotkou je ohm ( $\Omega$ ).

**Elektrická vodivost** (konduktance) je převrácená hodnota elektrického odporu. Značí se  $G$  a její jednotkou je siemens ( $S$ ).

$$G = \frac{1}{R} \quad (S; \Omega)$$

## Rezistivita a konduktivita

**Rezistivita** je měrný elektrický odpor jež se číselně rovná odporu vodiče 1m dlouhého a průřezu  $1m^2$ . Pro různé materiály je rezistivita různá, a také je závislá na teplotě. Rezistivita se značí  $\rho$  a její jednotkou je  $\Omega \cdot m^2 \cdot m^{-1}$  (zjednodušeně  $\Omega \cdot m$ ), v praxi se obvykle udává  $\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$ . Pro výpočet odporu vodiče platí vztah:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (\Omega; \Omega \cdot m, m, m^2)$$

Rezistivita některých látek (při 20°C):

<i>Látka</i>	$\rho$ ( $\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$ )
měď	0,0178
hliník	0,0285
stříbro	0,0163
železo	0,1

*Příklad 3: Určete odpor hliníkového vedení, které má průměr 0,8mm a délku 1,5km.*

*Příklad 4: Určete potřebný průměr měděného vodiče, který má být dlouhý 400m, a jeho odpor nesmí přesáhnout hodnotu 2,5Ω.*

**Konduktivita** je měrná elektrická vodivost, je to převrácená hodnota rezistivity. Značí se  $\gamma$  a její jednotkou je  $S \cdot m^{-2}$  (zjednodušeně  $S \cdot m^{-1}$ ), v praxi pak  $S \cdot mm^{-2}$ . Pro výpočet vodivosti vodiče platí vztah:

$$G = \gamma \cdot \frac{S}{l} \quad (S; S \cdot m^{-1}, m^2, m)$$

### Závislost odporu vodiče na teplotě

Velikost elektrického odporu závisí na teplotě. Příčina je v tom, že se vzrůstající teplotou kmitají atomy a molekuly okolo své střední polohy. U vodičů je pak pohyb volných elektronů spojen s větším počtem srážek a elektrický odpor se zvětší.

Po oteplení vodiče z teploty  $\mathcal{G}_1$  na teplotu  $\mathcal{G}_2$ , dojde ke zvýšení odporu z  $R_1$  na hodnotu  $R_2$ . Oteplení vodiče bude:

$$\Delta \mathcal{G} = \mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_1$$

Přírůstek odporu bude:

$$\Delta R = R_2 - R_1$$

Dělením poměrného přírůstku odporu  $R_1$  rozdílem teplot (oteplením) dostaneme poměrný přírůstek odporu  $R_1$  pro oteplení o 1K. Dostaneme vztah pro vyjádření teplotního součinitele odporu  $\alpha$ , jehož jednotkou je  $K^{-1}$ .

$$\alpha = \frac{\frac{R_2 - R_1}{R_1}}{\Delta \mathcal{G}}$$

Teplotní součinitele odporu některých látek:

<i>Látka</i>	<i><math>\alpha</math></i> ( $K^{-1}$ )
měď	0,0042
hliník	0,004
stříbro	0,004
železo	0,0055

Úpravou dostaneme vzorec pro výpočet odporu vodiče v závislosti na oteplení :

$$R_2 = R_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \mathcal{G})$$



V praxi se používá pro výpočet odporu při určité teplotě vztah, ve kterém se využívá odpor  $R_{20}$  při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$ :

$$R_2 = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta - 20^{\circ}\text{C})]$$

Pro výpočet odporu vodiče při teplotě nižší než  $20^{\circ}\text{C}$  použijeme vztah:

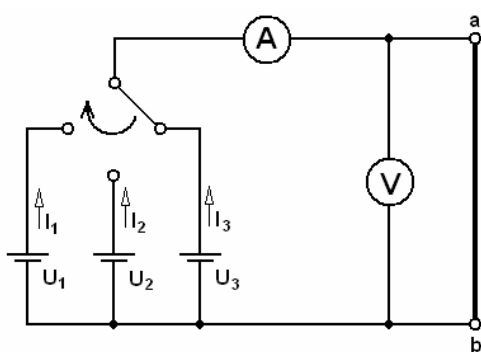
$$R_2 = \frac{R_{20}}{1 + \alpha \cdot (20^{\circ}\text{C} - \vartheta)}$$

*Příklad 5: Jak se změní odpor měděného vinutí stroje, je-li při počáteční teplotě  $11^{\circ}\text{C}$  odpor  $10\Omega$ . Pracovní teplota stroje je  $45^{\circ}\text{C}$ .*

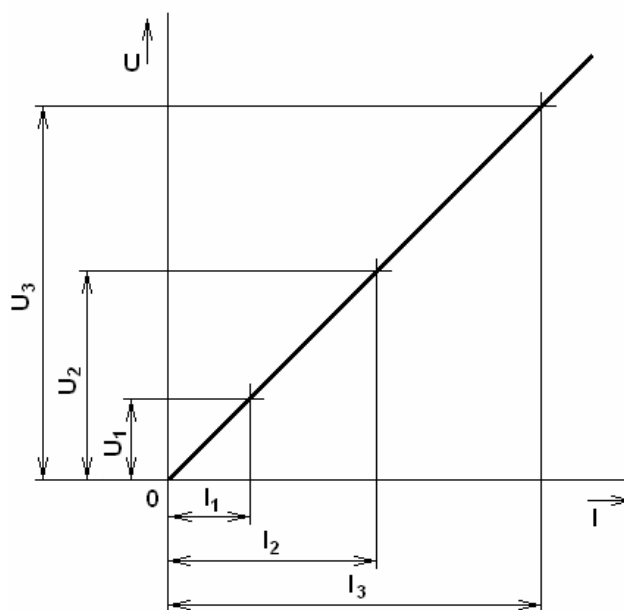
*Příklad 6: Určete provozní teplotu stroje, jestliže se změní odpor vinutí z  $15\Omega$  při  $15^{\circ}\text{C}$  na  $19,5\Omega$ .*

## Ohmův zákon

Ohmův zákon je základním zákonem elektrotechniky. Ve vodiči, kterým prochází elektrický proud, lze měřením stanovit dvě veličiny, a to elektrický proud  $I$  a elektrické napětí  $U$ .



*Ohmův zákon*



*Grafické znázornění Ohmova zákona*

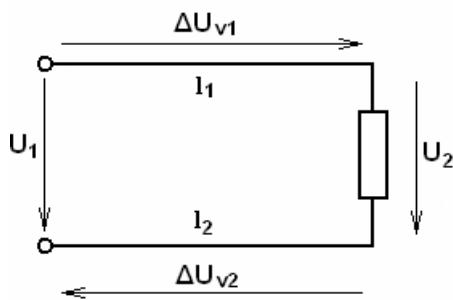
Pro stejný vodič budeme postupně zapojovat zdroj s napětím  $U_1$ ,  $U_2$ , a  $U_3$  a pro každou hodnotu napětí naměříme proud  $I_1$ ,  $I_2$  a  $I_3$ . Výsledek měření zobrazíme graficky, a to tak, že na osu vodorovnou nanášíme proudy  $I$  a k nim na svislou osu přeslušná napětí  $U$ . spojením bodů jednotlivých měření dostaneme přímku jdoucí počátkem souřadnicových os. Z grafického zobrazení je patrné, že proud je přímo úměrný napětí. Poměr mezi napětím a proudem je stálý. Přímka jdoucí počátkem souřadnicových os znázorňuje veličinu označenou

písmenem  $R$ . Veličina  $R$  vyjadřuje vlastnosti prostředí, kterým prochází elektrický proud, a nazýváme ji elektrickým odporem. Takže proud procházející obvodem vypočteme:

$$I = \frac{U}{R} \quad (A; V, \Omega)$$

### Úbytek napětí na vodiči

Každý vodič má odpor, který je dán rozměry a materiálem, z kterého byl vodič vyroben. Prochází-li vodičem s odporem  $R$  proud  $I$  musí se na něm vytvořit úbytek napětí. Úbytek napětí se označuje  $\Delta U$ , a je tím větší, čím větší je proud procházející vodičem a čím větší je odpor vodiče.



### *Úbytek napětí na vodiči*

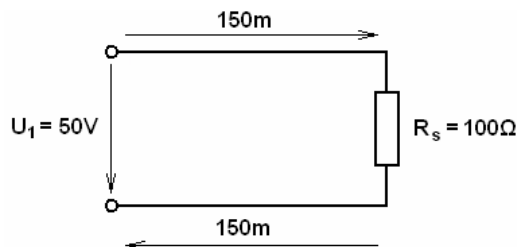
Úbytek napětí na vodiči se vypočte:

$$\Delta U = R_{\text{vedení}} \cdot I \quad (V; \Omega, A)$$

Pro úbytek napětí na vedení na obrázku platí:

$$\Delta U = \Delta U_{v1} + \Delta U_{v2} = U_1 - U_2$$

*Příklad 7: Vypočítejte úbytek napětí na měděném vedení dlouhé 150m a průměru 0,8mm, je-li  $U_1 = 50V$  a odpor spotřebiče je  $100\Omega$ .*



## Elektrická práce a výkon stejnosměrného proudu

**Elektrická práce** se vykonává, přesunujeme-li náboj  $Q$  mezi dvěma místy, mezi nimiž je napětí  $U$ . Platí tedy vztah:

$$W = Q \cdot U \quad (J; C, V)$$

Pokud dosadíme již známý vztah

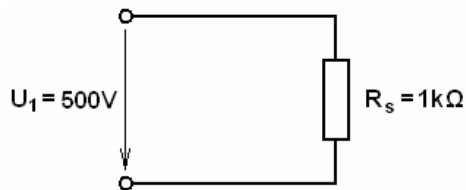
$$Q = I \cdot t$$

dostaneme vztah:

$$W = U \cdot I \cdot t \quad (J; V, A, s)$$

Elektrická práce má jednotku joule (J), ale v praxi se většinou používá watt sekunda (Ws), nebo její násobky (Wh, kWh). Platí vztah  $1J = 1Ws$ . Elektrickou práci měříme elektroměrem.

*Příklad 8: Vypočítejte elektrickou práci dle schématu za dobu 1 dne.*



**Elektrický výkon** je definován jako vykonána práce za jednotku času, a platí pro něj vztah:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} \quad (W; J, s)$$

Po zjednodušení dostaneme vztah:

$$P = U \cdot I \quad (W; V, I)$$

Elektrický výkon měříme wattmetrem.

*Příklad 9: Jaký výkon byl odebíraný žárovkou jestliže za dobu 8 hodin naměřil elektroměr spotřebu  $2,2kWh$ . Určete elektrický proud je-li napájecí napětí  $230V$ .*

## Příkon, ztráty a účinnost

U elektrických strojů a přístrojů rozpoznáváme dva výkony. První je užitečný výkon (zkráceně výkon) je výkon, který spotřebič dodává. Druhý je **příkon**, což je výkon, který spotřebiči dodáváme. Máme-li žárovku s příkonem  $100W$ , která dodává světelný výkon asi  $10W$ , tj. že  $90W$  se v ní neúčelně mění v teplo.

**Účinnost** nám udává poměr mezi spotřebovanou energií (výkonem)  $P_2$  a dodanou energií (příkonem)  $P_1$ . Pro účinnost platí vztah:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (-; W, W)$$

Účinnost je číslo bezrozměrné, a vždy menší než jedna. Účinnost se ale dá vyjádřit i v procentech, pak platí:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad (\%; W, W)$$

V tomto případě platí, že účinnost musí být menší než 100%. Pokud hodnotu účinnosti odečteme od hodnoty 1 (nebo od 100%) vyjde nám hodnota, kterou nazýváme **ztráty**.

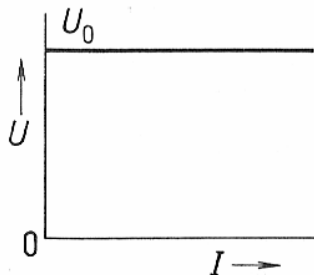
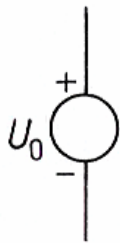
### Tepelné účinky elektrického proudu

Z praxe je známo, že průchodem proudu se vodič zahřívá. Elektrická práce vynaložená k průchodu proudu vodičem se všechna mění v teplo. Teplu vyvinutému průchodem elektrického proudu vodičem říkáme Joule-Lencovo teplo. Pro vzniklé teplo platí vztah:

$$W = U \cdot I \cdot t \quad (J; V, I, s)$$

### Ideální a skutečný zdroj napětí

**Ideální zdroj napětí** je takový zdroj napětí, jehož vnitřní odpor se rovná nule. Na svorkách ideálního zdroje napětí je bez ohledu na velikosti odebíraného proudu stále stejně velké napětí. Závislost napětí na svorkách zdroje v závislosti na odebíraném proudu vyjadřujeme zatěžovací charakteristikou zdroje. Nemění-li se svorkové napětí zdroje se změnou odporu zatěžovacího rezistoru, nezávisí na velikosti odebíraného proudu, pak se jedná o zdroj tvrdého napětí. Mění-li se svorkové napětí se změnou zátěže značně, jedná se o zdroj měkkého napětí.

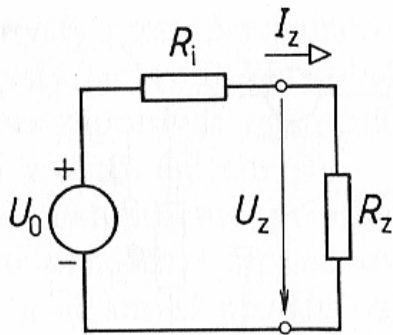


*Ideální zdroj napětí*

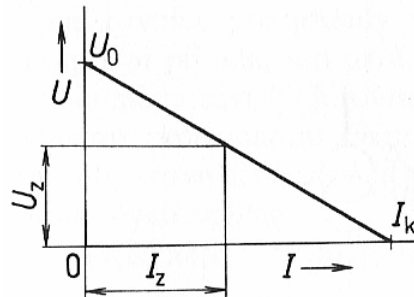
*Zatěžovací charakteristika ideálního zdroje napětí*

**Skutečný zdroj napětí** se vyznačuje tím, že při odběru proudu poklesne napětí na jeho svorkách. Je to způsobeno tím, že každý zdroj elektrické energie má určitý vnitřní odpor.

Skutečný zdroj napětí je tvořen ideálním zdrojem napětí  $U_0$  a k němu sériově připojeným vnitřním odporem  $R_i$ . Napětí  $U_0$  se označuje jako vnitřní napětí zdroje.



*Skutečný zdroj napětí*



*Zatěžovací charakteristika skutečného zdroje napětí*

Připojíme-li ke skutečnému zdroji napětí zatěžovací odpor  $R_z$ , bude obvodem procházet proud:

$$I_z = \frac{U_0}{R_i + R_z}$$

Napětí na výstupních svorkách zdroje bude:

$$U_z = U_0 - R_i \cdot I_z$$

Po dosazení za proud  $I_z$  dostaneme vztah:

$$U_z = \frac{R_z}{R_i + R_z} \cdot U_0$$

Při spojení výstupních svorek nakrátko, bude obvodem procházet proud nakrátko:

$$I_k = \frac{U_0}{R_i}$$

Při nezapojení zátěže nebude procházet obvodem proud a zdroj pracuje naprázdno

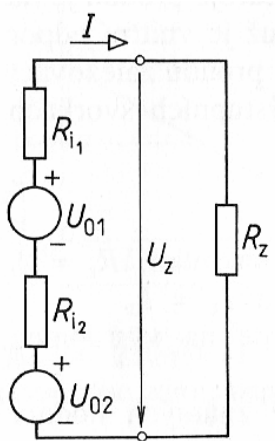
$$U_z = U_0$$

Zatěžovací charakteristika zdroje napětí nám udává, jak se mění svorkové napětí zdroje se změnou odporu zatěžovacího rezistoru. Závislost je lineární, zobrazíme ji pomocí dvou bodů, které odpovídají stavu naprázdno (bod  $U_0$ ) a chodu nakrátko (bod  $I_k$ ).

*Příklad 10: Sestrojte zatěžovací přímku elektrického zdroje a určete vnitřní odpor  $R_i$ , je-li napětí naprázdno  $12V$ , po připojení zatěžovacího rezistoru s hodnotou  $10\Omega$  teče obvodem proud  $0,8A$  a svorkové napětí poklesne na  $9V$ .*

## Řazení elektrických zdrojů

**Sériové spojení zdrojů** se používá pro získání vyššího napětí. Spojujeme vždy zápornou svorku jednoho zdroje a kladnou svorku následujícího zdroje. Výsledné napětí sériově spojených zdrojů se rovná součtu napětí všech zdrojů.



*Sériové řazení zdrojů napětí*

Svorkové napětí zdrojů bude:

$$U_z = U_{z_1} + U_{z_2}$$

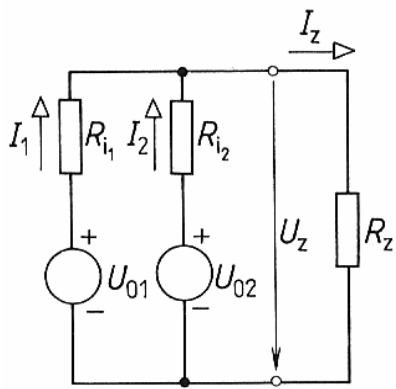
Pro proud platí:

$$I = I_1 = I_2$$

Pro celkový vnitřní odpor platí:

$$R_i = R_{i_1} + R_{i_2}$$

**Paralelní spojení zdrojů** se používá pro získání většího proudu. Spojujeme vždy všechny kladné svorky a všechny záporné svorky zdrojů. Celkový proud je dán součtem proudů jednotlivých zdrojů.



*Paralelní řazení zdrojů napětí*

Celkový proud bude:

$$I_z = I_1 + I_2$$

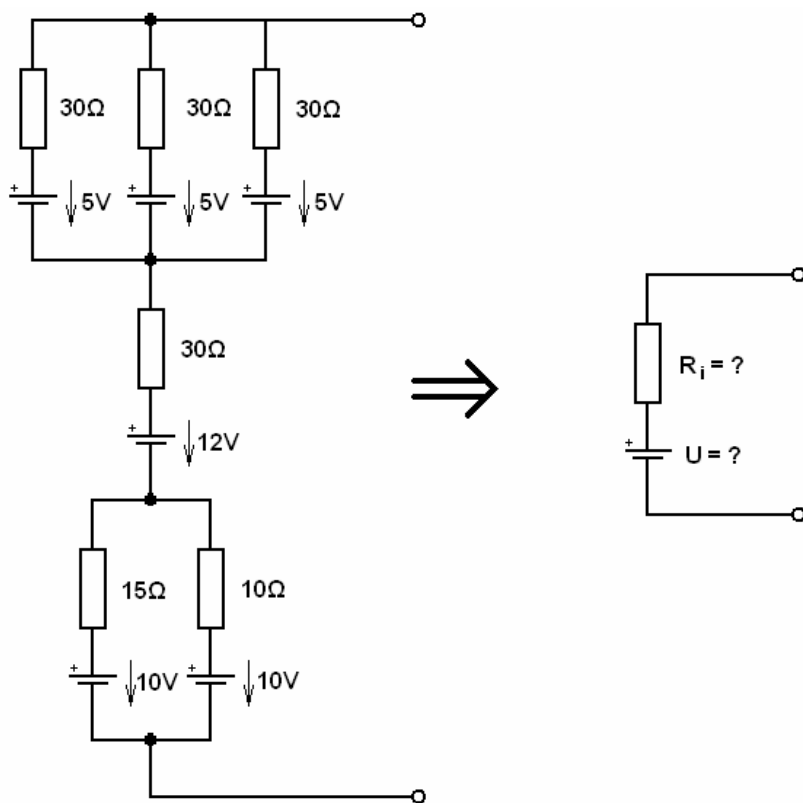
Pro svorkové napětí:

$$U_2 = U_{z_1} = U_{z_2}$$

Pro celkový vnitřní odpor platí:

$$R_i = \frac{R_{i_1} \cdot R_{i_2}}{R_{i_1} + R_{i_2}}$$

Příklad 11: Proveďte zjednodušení a přepočítání na 1 zdroj.

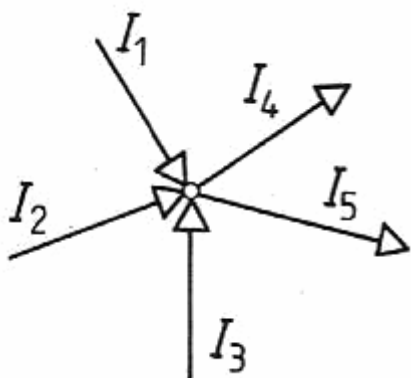


## Kirchhoffovy zákony

Kirchhoffovy zákony spolu s Ohmovým zákonem mají základní význam pro řešení elektrických obvodů.

**První Kirchhoffův zákon** je zákonem o zachování elektrických nábojů. Stejnoseměrný proud je dán elektrickým nábojem, který projde průřezem vodiče za jednu sekundu. Tento náboj se nemůže ve vodiči nikde nahromadit ani vzniknout. Dělí-li se proud do několika větví, musí být součet proudů přicházejících do uzlu roven součtu proudů, které z uzlu odcházejí.

První Kirchhoffův zákon lze vyslovit následujícím způsobem: Algebraický součet všech proudů v uzlu se rovná nule.



První Kirchhoffův zákon

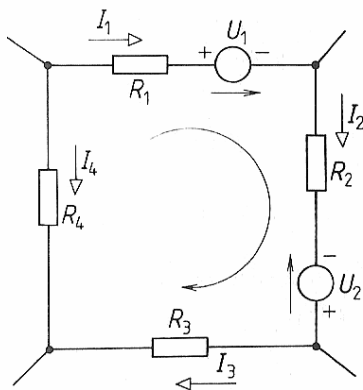


Pro tento uzel platí rovnice:

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

**Druhý Kirchhoffův zákon** je zákonem o zachování energie. Napětí na každém spotřebiči elektrického obvodu je dáno práci potřebnou k přemístění elektrického náboje mezi svorkami spotřebiče. Projde-li náboj po uzavřené dráze, musí být příslušná práce nulová, neboť náboj se vrátí na místo téhož potenciálu. Tedy práce vykonaná úplným oběhem po kterékoli uzavřené smyčce v obvodu je rovná nule.

Druhý Kirchhoffův zákon lze vyslovit takto: Algebraický součet všech svorkových napětí zdrojů a všech úbytků napětí na spotřebičích se v uzavřené smyčce rovná nule.



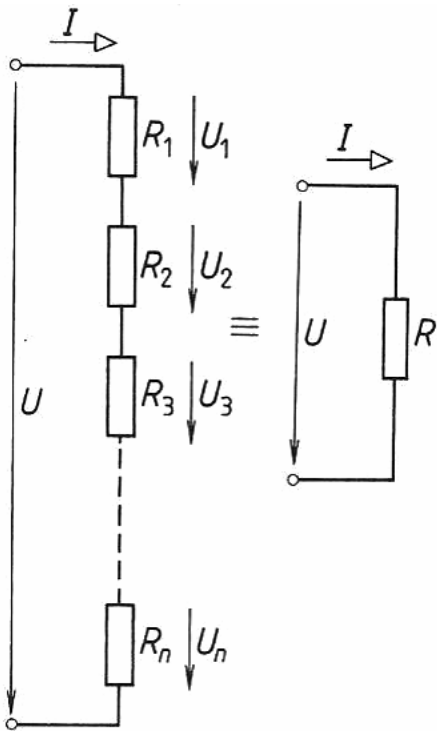
*Druhý Kirchhoffův zákon*

Pro tuto smyčku platit rovnice:

$$R_1 \cdot I_1 + U_1 + R_2 \cdot I_2 - U_2 + R_3 \cdot I_3 - R_4 \cdot I_4 = 0$$

### Sériové a paralelní řazení rezistorů

**Sériové řazení** znamená, že rezistory jsou zapojeny za sebou. Všemi rezistory protéká stejný proud  $I$ . Na každém rezistoru vznikne úbytek napětí. Součtem všech úbytků napětí dostaneme výsledné napětí  $U$ . Výsledný odpor všech sériově řazených rezistorů dostaneme součtem jednotlivých odporů rezistorů.



*Sériové řazení rezistorů*

Celkový odpor bude:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Napětí na jednotlivých rezistorech budou:

$$U_1 = R_1 \cdot I$$

$$U_2 = R_2 \cdot I$$

$$U_3 = R_3 \cdot I$$

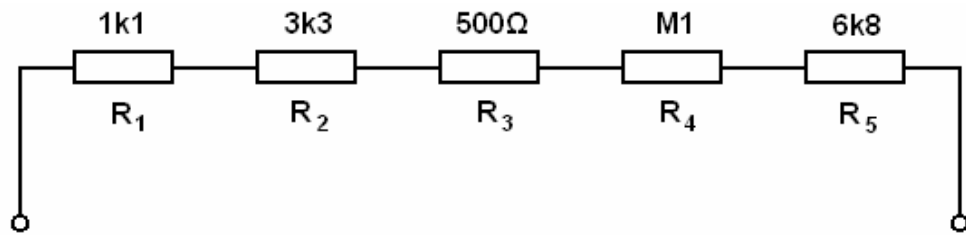
•  
•  
•

$$U_n = R_n \cdot I$$

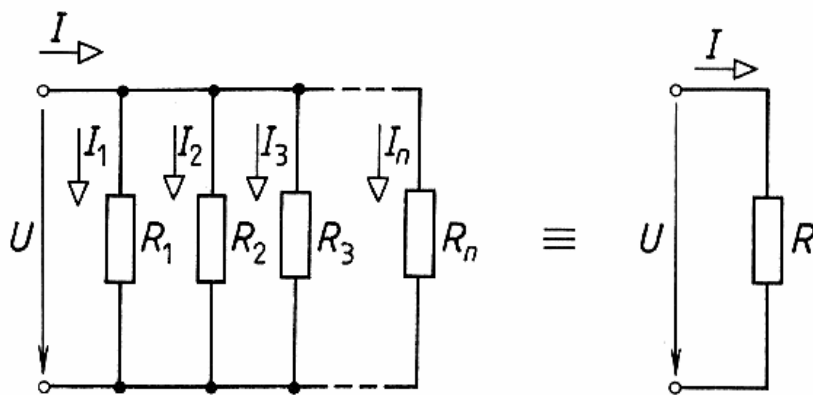
Celkové napětí bude:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$$

Příklad 12: Určete celkový odpor rezistorů.



**Paralelní řazení** znamená, že rezistory jsou zapojeny vedle sebe. Na všech rezistorech je stejné napětí  $U$ . Každým rezistorem prochází určitý proud. Součtem všech těchto proudů dostaneme celkový proud  $I$ . Výsledná vodivost všech paralelně řazených rezistorů se rovná součtu vodivostí jednotlivých rezistorů.



Paralelní řazení rezistorů

Výsledná vodivost bude:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n$$

Proudy jednotlivými rezistory budou:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = U \cdot G_1$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = U \cdot G_2$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = U \cdot G_3$$

⋮

$$I_n = \frac{U}{R_n} = U \cdot G_n$$

Celkový proud bude:

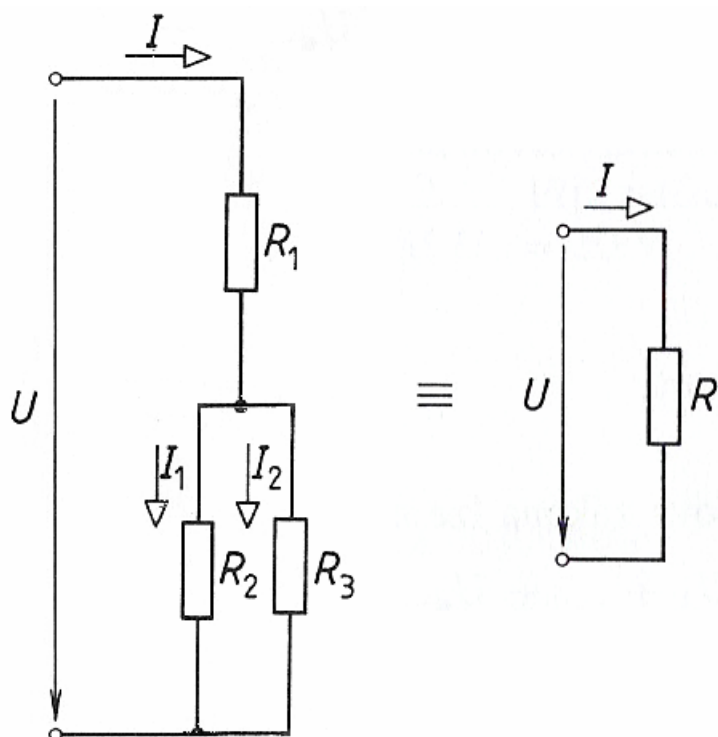
$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

Pro dva paralelně řazené rezistory se v praxi pro výsledný odpor používá vztah:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

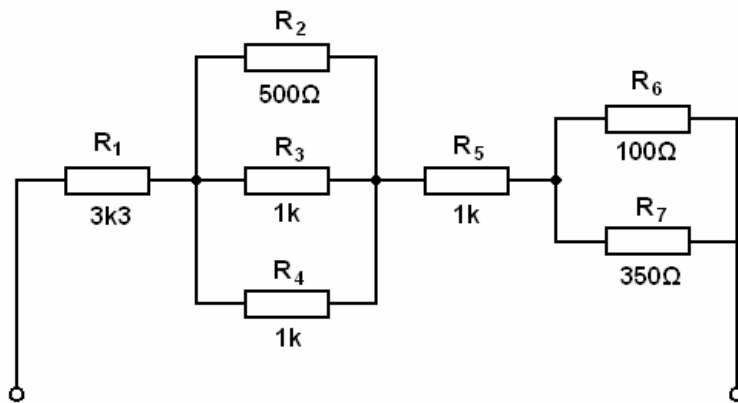
*Příklad 13: Odvoďte vztahy pro vyjádření celkového odporu pro paralelní řazení tři, čtyř a pěti rezistorů.*

**Sériověparalelní řazení** znamená, že rezistory jsou zapojeny v kombinaci sériového a paralelního řazení. Pro získání výsledného odporu se musí obvod postupně zjednodušovat výpočty pro sériové a paralelní řazení, až na výsledný odpor.



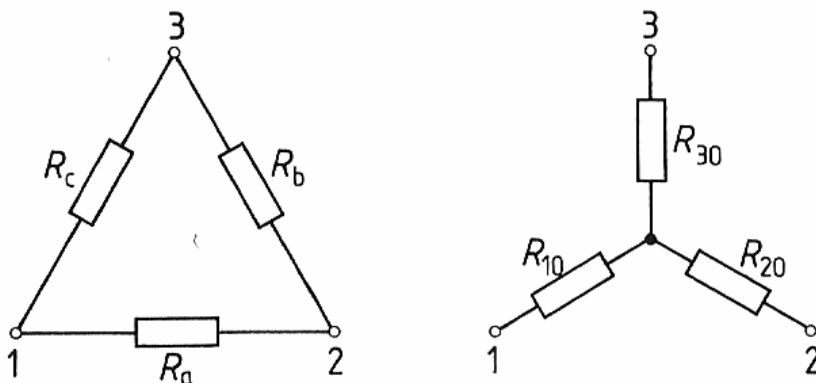
*Příklad sériověparalelního řazení rezistorů*

Příklad 14: Vypočítejte výsledný odpor.



### Transfigurace odporů z trojúhelníka do hvězdy

Transfiguraci nebo-li přeskupení rezistorů používáme, chceme-li obvod upravit tak, aby ho bylo možné řešit podle pravidel pro sériové nebo paralelní řazení. Základní podmínkou každé transfigurace je to, že upravené zapojení musí být rovnocenné z hlediska výsledného odporu.



Transfigurace trojúhelník → hvězda

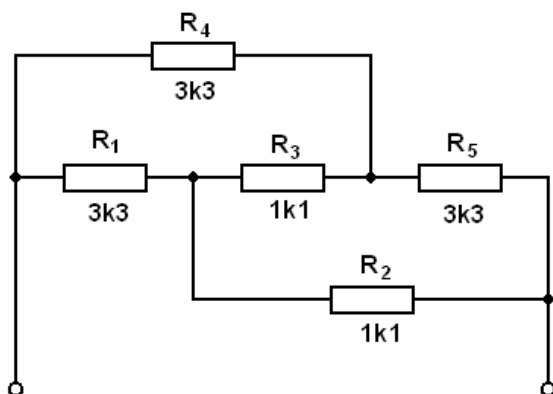
Rezistory řazené do trojúhelníku nahradíme rezistory řazenými do hvězdy podle těchto vztahů:

$$R_{10} = \frac{R_a R_c}{R_a + R_b + R_c}$$

$$R_{20} = \frac{R_a \cdot R_b}{R_a + R_b + R_c}$$

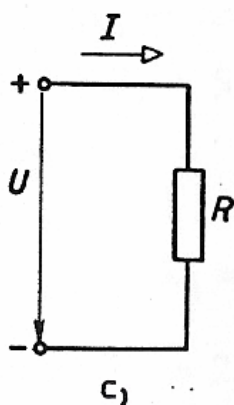
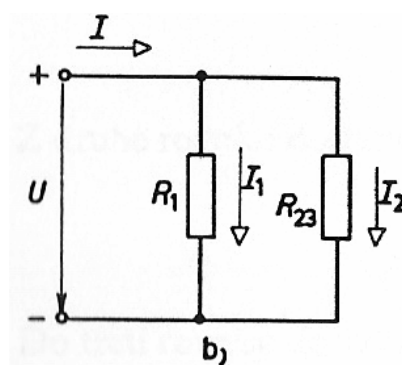
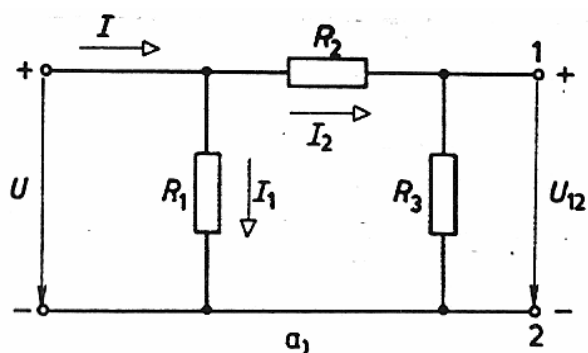
$$R_{30} = \frac{R_b \cdot R_c}{R_a + R_b + R_c}$$

Příklad 15: Proved'te výpočet celkového odporu.



### Řešení elektrických obvodů postupným zjednodušováním

Při tomto řešení postupujeme tak, že daný obvod postupně převádíme na rovnocenný jednodušší obvod, až určíme výsledný odpor celého obvodu. Pak vypočítáme proud odebíraný ze zdroje a ten potom zase zpětným postupem rozvádíme v zjednodušených schématech až do původního schématu.



$$\begin{aligned} R_1 &= 5\Omega \\ R_2 &= 15\Omega \\ R_3 &= 5\Omega \\ U &= 12V \end{aligned}$$

Schéma zapojení pro řešení el. obvodů postupným zjednodušováním: a) základní schéma, b) zjednodušené schéma, c) výsledné schéma

Rezistory  $R_2$  a  $R_3$  jsou zařazeny do série a jejich výsledný odpor je

$$R_{23} = R_2 + R_3 = 15 + 5 = 20\Omega$$

Náhradní rezistor s odporem  $R_{23}$  je paralelně připojen k rezistoru  $R_1$  (obr.b), takže výsledný odpor obvodu (obr.c) je:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_{23}}{R_1 + R_{23}} = \frac{5 \cdot 20}{5 + 20} = 4\Omega$$

Proud odebírány ze zdroje je:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{4} = 3A$$

Na rezistorech  $R_1$  a  $R_{23}$  je napětí zdroje  $U$ , a tedy proudy:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{12}{5} = 2,4A$$

$$I_2 = \frac{U}{R_{23}} = \frac{12}{20} = 0,6A$$

Napětí  $U_{12}$  se rovná úbytku napětí na rezistoru s odporem  $R_3$ .

$$U_{12} = I_2 \cdot R_3 = 0,6 \cdot 5 = 3V$$

Obvodem procházejí proudy:  $I = 3A$ ,  $I_1 = 2,4A$ ,  $I_2 = 0,6A$  a mezi svorkami 1, 2 je napětí 3V.

### Řešení elektrických obvodů pomocí Kirchhoffových zákonů

Použijeme-li k řešení obvodu Kirchhoffovy zákony, musíme napsat tolik rovnic, kolik je v obvodu neznámých proudů. V našem případě jsou to tři proudy ( $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ), a proto musíme sestavit tři rovnice na sobě nezávislé. Při tom podle prvního Kirchhoffova zákona můžeme napsat pouze  $n-1$  rovnic, kde  $n$  je počet uzlů v obvodu. Podle schématu jsou v daném obvodu dva uzly (3, 4) a tedy podle prvního Kirchhoffova zákona napíšeme jednu rovnici a podle druhého Kirchhoffova zákona napíšeme další dvě rovnice. Ve schématu vyznačíme zcela libovolně směry proudů procházejících rezistory a směry, kterými budeme postupovat po obvodu při psaní druhého Kirchhoffova zákona. Vyjde-li nám proud se záporným znaménkem, znamená to, že proud prochází opačně, než jak jsme uvažovali.

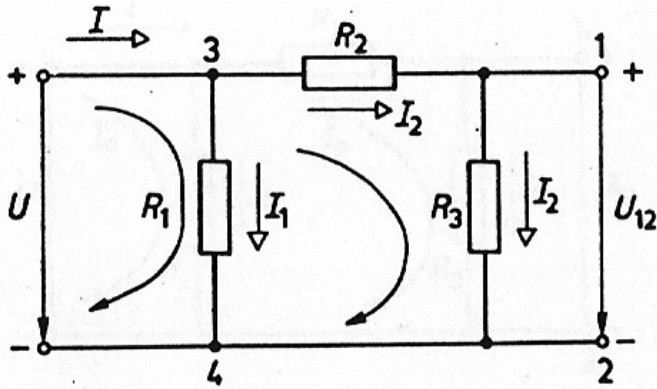


Schéma zapojení pro řešení el. obvodů pomocí Kirchhoffových zákonů

Platí:

1.  $I - I_1 - I_2 = 0$
2.  $R_1 \cdot I_1 - U = 0$
3.  $R_2 \cdot I_2 + R_3 \cdot I_2 - R_1 \cdot I_1 = 0$

Pro zjednodušení výpočtu budeme dále počítat pouze s číselnými hodnotami:

1.  $I - I_1 - I_2 = 0$
2.  $5I_1 - 12 = 0$
3.  $15I_2 + 5I_2 - 5I_1 = 0$

Z druhé rovnice dostaneme:

$$5I_1 = 12$$

$$I_1 = 2,4A$$

Do třetí rovnice dosadíme  $I_1 = 2,4A$

$$20I_2 - 5 \cdot 2,4 = 0$$

$$I_2 = \frac{12}{20} = 0,6A$$

Z první rovnice dostaneme:

$$I = I_1 + I_2$$

Dosadíme  $I_1 = 2,4A$  a  $I_2 = 0,6A$

$$I = 2,4 + 0,6 = 3A$$

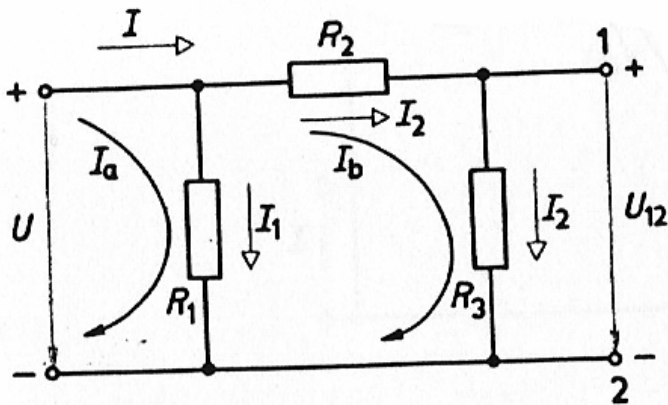


Proudy procházející obvodem jsou:  $I = 3A$ ,  $I_1 = 2,4A$ ,  $I_2 = 0,6A$ .

## Řešení elektrických obvodů metodou smyčkových proudů

Při řešení složených obvodu metodou smyčkových proudů postupujeme takto:

1. Schéma obvodu rozdělíme na smyčky.
2. Ve smyčkách vyznačíme směr proudu.
3. Pro každou smyčku napíšeme rovnici podle druhého Kirchhoffova zákona.
4. Z rovnic vypočteme proudy v jednotlivých smyčkách a z nich pak určíme proudy procházející rezistory.



*Schéma zapojení pro řešení el. obvodů metodou smyčkových proudů*

Obvod má dvě smyčky, takže pro výpočet smyčkových proudů  $I_a$ ,  $I_b$  potřebujeme dvě rovnice:

1.  $R_1 \cdot (I_a - I_b) - U = 0$
2.  $R_2 \cdot I_b + R_3 \cdot I_b + R_1 \cdot (I_b - I_a) = 0$

Pro zjednodušení výpočtu budeme opět počítat pouze s číselnými hodnotami.

1.  $5 \cdot (I_a - I_b) - 12 = 0$
2.  $15I_b + 5I_b + 5 \cdot (I_b - I_a) = 0$

Rovnice upravíme

1.  $5I_a = 12 + 5I_b$
2.  $25I_b = 5I_a$

Do druhé rovnice za  $5I_a$  dosadíme první rovnici

$$25I_b = 12 + 5I_b$$
$$I_b = 0,6A$$

Z druhé rovnice dostaneme

$$I_a = 5I_b$$

Dosadíme  $I_b = 0,6A$

$$I_a = 5 \cdot 0,6 = 3A$$

Nyní vypočítáme proudy procházející obvodem

$$I = I_a = 3A$$

$$I_1 = I_a - I_b = 3 - 0,6 = 2,4A$$

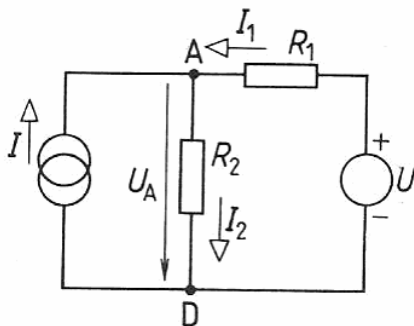
$$I_2 = I_b = 0,6A$$

### Řešení elektrických obvodů metodou uzlových napětí

Podstata metody uzlových napětí spočívá v tom, že na uzly obvodu aplikujeme první Kirchhoffův zákon. Jeden uzel označíme jako uzel referenční. Volíme takový uzel, ve kterém je spojeno více prvků. Napětí každého z ostatních uzlů vztaženého k uzlu referenčnímu, označujeme jako napětí uzlové. Proudů v prvcích obvodu vyjádříme pomocí uzlových napětí a napětí zdrojů.

Při řešení obvodu metodou uzlových napětí postupujeme takto:

1. Označíme jednotlivé uzly, přičemž jeden z nich zvolíme jako referenční uzel.
2. Mezi jednotlivými uzly a uzlem referenčním označíme uzlová napětí.
3. Pro každý uzel napíšeme rovnici pomocí prvního Kirchhoffova zákona. Proudů v prvcích obvodu vyjádříme pomocí uzlových napětí, napětí zdrojů a odporů rezistorů nebo jejich vodivostmi. Získáme tak soustavu rovnic, kde neznámá jsou uzlová napětí.
4. Řešením soustavy rovnic dostaneme uzlová napětí.
5. Pomocí uzlových napětí stanovíme proudy nebo napětí na jednotlivých prvcích obvodu.



*Schéma zapojení pro řešení el. obvodů metodou uzlových napětí*

Označíme uzly A a D, přičemž uzel D volíme jako referenční, pak uzlové napětí má uzel A vzhledem k uzlu D a označíme ho jako  $U_A$ . Stanovíme rovnici pro uzel A

$$I + I_1 - I_2 = 0$$

Po dosazení dostaneme:

$$I + \frac{U - U_A}{R_1} - \frac{U_A}{R_2} = 0$$

Z rovnice vypočítáme uzlové napětí  $U_A$

$$U_A = \frac{I \cdot R_1 \cdot R_2 + U \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Po dosazení číselných hodnot zdrojů a rezistorů dostaneme uzlové napětí

$$U_A = \frac{0,15 \cdot 30 \cdot 24 + 9 \cdot 24}{30 + 24} = 6V$$

Výpočet proudů

$$I_1 = \frac{U - U_A}{R_1} = \frac{9 - 6}{30} = 0,1A$$

$$I_2 = \frac{U_A}{R_2} = \frac{6}{24} = 0,25A$$

Napětí na rezistorech bude:

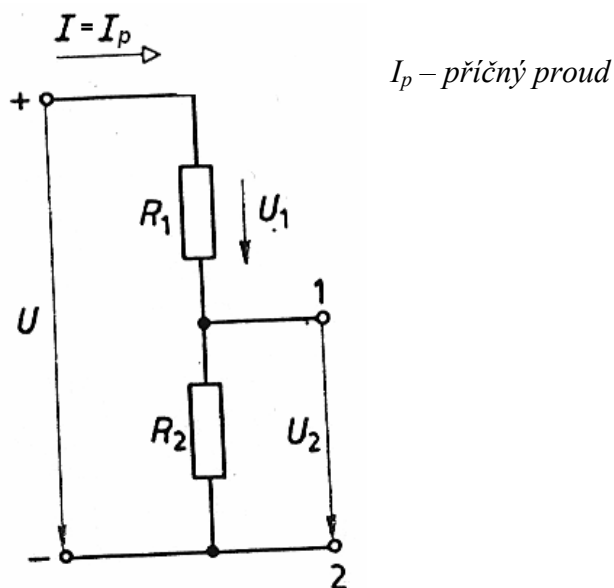
$$U_{R_1} = U - U_A = 9 - 6 = 3V$$

$$U_{R_2} = U_A = 6V$$

### Dělič napětí

V elektrických obvodech potřebujeme někdy nižší napětí než je svorkové napětí zdroje. K tomu používáme dělič napětí. Je to v podstatě rezistor s odbočkou, která je rozděluje na dva díly s odpory  $R_1$  a  $R_2$ , spojené do série. Dělič napětí se připojuje paralelně ke zdroji a potřebné nižší napětí  $U_2$  se odebírá ze svorek 1, 2. Toto napětí se rovná úbytku napětí na části s odporem  $R_2$ .

**Nezatížený dělič** je dělič, na jehož výstupních svorkách není připojen žádný spotřebič, neodebíráme tedy z děliče proud.



Nezatížený dělič napětí

Napětí na nezatíženém napěťovém děliči se dělí ve stejném poměru jako poměr jejich odporů:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Nebo:

$$\frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow U_2 = \frac{U_1 \cdot R_2}{R_1}$$

Zdroj dodává do děliče proud:

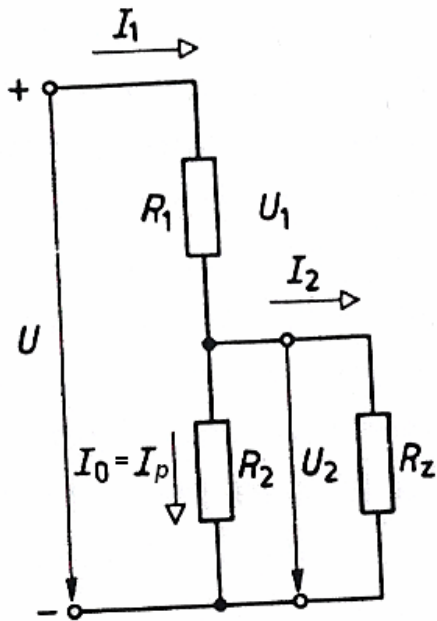
$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

Napětí na výstupních svorkách je:

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U$$

*Příklad 16: Navrhněte nezatížený napěťový dělič, má-li být vstupní napětí  $U_1 = 50V$ , výstupní napětí  $U_2 = 15V$  a příčný proud  $I_p = 10mA$ .*

**Zatížený dělič** je dělič, u něhož je na výstupních svorkách připojena zátěž, a tedy odebíráme určitý proud.



Zatížený dělič napětí

Proud odebíraný děličem ze zdroje je:

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_z}{R_2 + R_z}}$$

Proud dodávaný děličem do zátěže je:

$$I_2 = I_1 - I_p$$

Napětí na výstupních svorkách je:

$$U_2 = \frac{R_2 \cdot R_z}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_z + R_2 \cdot R_z} \cdot U$$

Návrh děliče:

$$R_1 = \frac{U - U_2}{I_1} = \frac{U - U_2}{I_2 + I_p}$$

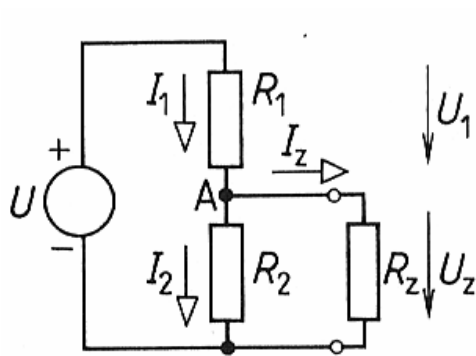
$$R_2 = \frac{U_2}{I_p} = \frac{U_2}{I_1 - I_2}$$

Příklad 17: Navrhněte zatížený napěťový dělič, má-li být:  $U_1 = 150V$ ,  $I_1 = 50mA$ ,  $U_2 = 50V$ ,  $I_2 = 15mA$ ,  $U_3 = 15V$ ,  $I_3 = 10mA$ .

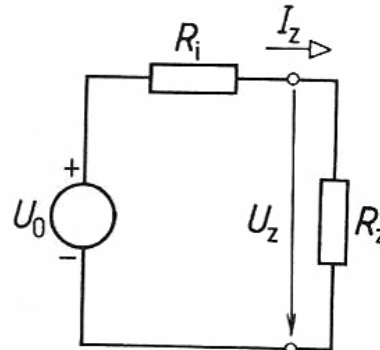
## Théveninova věta

Théveninova věta nebo-li věta o náhradním zdroji napětí.

Odvození základních vztahů provedeme pomocí obvodu zatíženého děliče napětí.



*Odvození Théveniovy věty*



*Náhradní obvod*

Pro uzel A platí:

$$I_1 - I_2 - I_z = 0$$

Použitím Ohmova zákona dostaneme:

$$\frac{U - U_z}{R_1} - \frac{U_z}{R_2} - I_z = 0$$

Rovnici násobíme výrazem  $R_1 \cdot R_2$

$$(U - U_z) \cdot R_2 - U_z \cdot R_1 - I_z \cdot R_1 \cdot R_2 = 0$$

Po úpravě dostaneme:

$$U \cdot R_2 - U_z \cdot (R_1 + R_2) - I_z \cdot R_1 \cdot R_2 = 0$$

Napětí  $U_z$  na zátěži je:

$$U_z = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U - \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_z$$

Napětí na zátěži  $U_z$  můžeme rovněž vyjádřit rovnicí, která popisuje obvod skutečného zdroje napětí

$$U_z = U_0 - R_i \cdot I_z$$

Z porovnání obou rovnic pro  $U_z$  vyplývá definice Théveninovy věty: Libovolně složitý obvod lze vzhledem k libovolným dvěma svorkám nahradit obvodem skutečného zdroje napětí. U skutečného zdroje napětí je  $U_0$  napětí ideálního zdroje napětí a  $R_i$  vnitřní odpor. Napětí  $U_0$  v libovolně složitém obvodu stanovíme jako napětí naprázdno na výstupních svorkách. Vnitřní odpor  $R_i$  v libovolně složitém obvodu stanovíme jako odpor mezi výstupními svorkami v případě, že je zátěž odpojena, všechny zdroje napětí zkratovány, případně zdroje proudu vyraženy.

Základní vztahy pro aplikaci Théveninovy věty:

V případě, že je dán proud zátěže  $I_z$ , bude napětí na zatěžovacím rezistoru:

$$U_z = U_0 - R_i \cdot I_z$$

V případě, že je dán odpor zatěžovacího rezistoru  $R_z$ , bude na něm napětí:

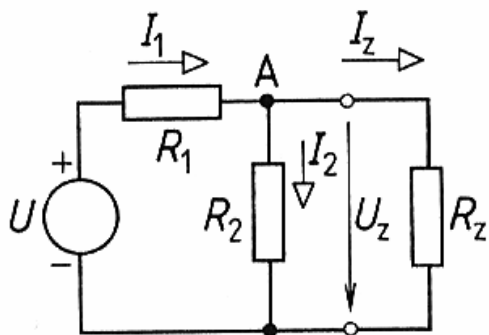
$$U_z = \frac{R_z}{R_i + R_z} \cdot U_0$$

### Nortonova věta

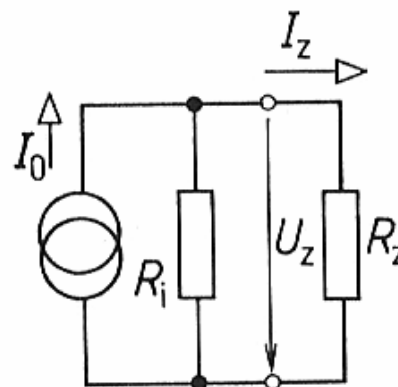
Nortonova věta nebo-li věta o náhradním zdroji proudu.

Podle Nortonovy věty lze libovolný obvod složený z lineárních prvků nahradit vzhledem k libovolným svorkám obvodem skutečného zdroje proudu.

Odvození základních vztahů provedeme metodou uzlových napětí.



*Odvození Nortonovy věty*



*Náhradní obvod*

Pro uzel A platí:

$$I_1 - I_2 - I_z = 0$$

Po dosazení vodivosti

$$G_1 \cdot (U - U_z) - G_2 \cdot U_z - I_z = 0$$

Po úpravě:

$$U_z \cdot G_i = U \cdot G_1 - I_z$$

Kde

$$G_i = G_1 + G_2$$

Po dosazení odporů za vodivosti

$$U_z \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{U}{R_1} - I_z$$

Po úpravě a dosazení za

$$\frac{U}{R_1} = I_0$$

Dostaneme:

$$U_z = (I_0 - I_z) \cdot R_i$$

Pro napětí  $U_z$  jsme dostali shodný výraz s výrazem pro obvod skutečného zdroje proudu. Nahradili jsme obvod původní obvodem skutečného zdroje proudu.

Základní vztahy pro aplikaci Nortonovy věty:

V případě, že je dán proud procházející zátěží  $I_z$ , bude napětí na zatěžovacím rezistoru:

$$U_z = (I_0 - I_z) \cdot R_i$$

V případě, že je dán odpor zatěžovacího rezistoru  $R_z$ , bude na něm napětí:

$$U_z = \frac{R_i \cdot R_z}{R_i + R_z} \cdot I_0$$

## Rezistory

Rezistor je elektronická pasivní součástka, jejíž hlavní vlastností je elektrický odpor. Rezistory se mohou dělit podle několika hledisek.

Dělení rezistoru podle konstrukce:

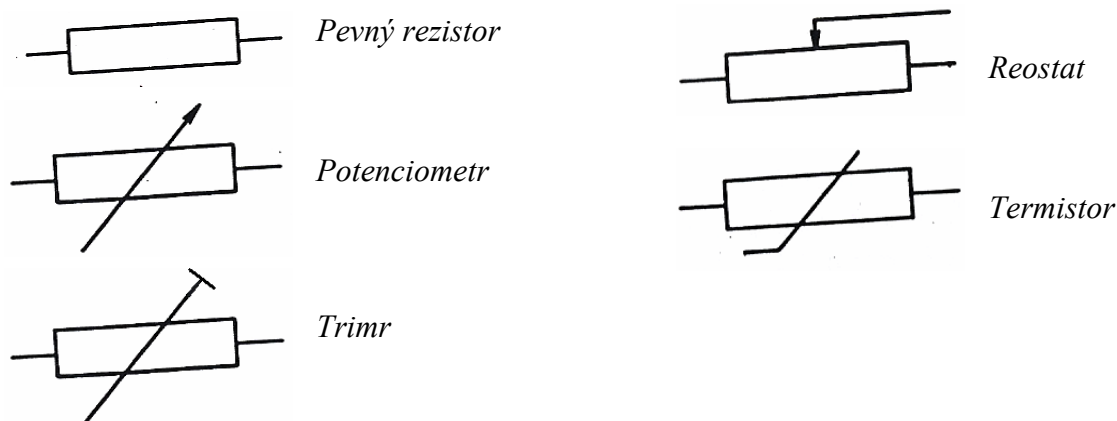
1. Pevné – jejich hodnota je stálá.
2. Proměnné – jejich hodnotu můžeme měnit. Jsou to trimr, potenciometr, reostat.



### Dělení rezistoru podle způsobu výroby:

1. Drátové – tyto rezistory jsou vyrobeny z odporového drátu, který je namotán na keramickém tělísku.
2. Vrstvové – u těchto rezistorů je na keramický váleček nanášena vrstvička odporového materiálu.

Zvláštním typem rezistoru jsou termistory. U těchto rezistorů je hodnota jejich odporu závislá na teplotě.



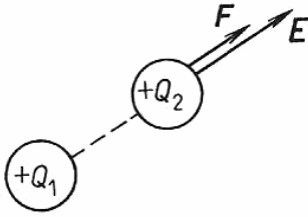
Barva	První číslo	Druhé číslo	Třetí číslo	Exponent $10^n$	Tolerance
Černá	0	0	0	0	
Hnědá	1	1	1	1	±1%
Červená	2	2	2	2	±2%
Oranžová	3	3	3	3	
Žlutá	4	4	4	4	±0,5%
Zelená	5	5	5	5	±0,25%
Modrá	6	6	6	6	±0,1%
Fialová	7	7	7	7	
Sedá	8	8	8	-	
Bílá	9	9	9	-	
Zlatá				-1	±5%
Stříbrná				-2	±10%

Tabulka barevného značení rezistorů

## Elektrostatické pole

### Veličiny elektrostatického pole

**Intenzita elektrického pole** je veličina, kterou vyjadřujeme silové působení elektrostatického pole na elektrický náboj v určitém místě pole. Intenzita elektrického pole je definována silou působící na jednotkový kladný náboj.



*Intenzita elektrického pole*

Značíme ji  $E$  a její jednotkou je newton na coulomb ( $N \cdot C^{-1}$ ), v praxi se používá volt na metr ( $V \cdot m^{-1}$ ). Intenzitu elektrického pole vypočteme:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \quad (N \cdot C^{-1}; N, C)$$

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

$$E = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{Q_1}{r^2}$$

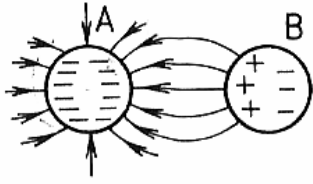
Intenzita elektrického pole se v každém místě rovná spádu napětí v tomto místě:

$$E = \frac{U}{l} \quad (V \cdot m^{-1}; V, m)$$

Napětí uvnitř pole proti některé elektrodě je rozloženo rovnoměrně. Každému bodu elektrostatického pole můžeme jednoznačně přiřadit určitý potenciál, tedy stejné napětí. Místa, která mají vzhledem k některé elektrodě stejné napětí, se nazývají ekvipotenciální hladiny. Poměr napětí k tloušťce dielektrika je charakteristickou veličinou elektrostatického pole a označujeme ji jako spád napětí. Elektrická pevnost je maximální intenzita elektrického pole. Překročením této intenzity dochází k ionizaci a izolant se stává vodivým.

### **Elektrická indukce**

Přiblížíme-li záporně nabitě těleso k vodivému elektricky neutrálnímu tělesu porušíme jeho elektrickou rovnováhu. Elektrony se přemístí na vzdálenější stranu druhého tělesa, bližší část je tedy nabitá kladně. Dotkneme-li se rukou druhého tělesa, a tím z něj odvedeme elektrony do země, po oddálení tělesa prvního zůstane druhé těleso nabitě kladně. Na rozdíl od nábojů získaných skutečným dotykem s nabitým tělesem se náboje v druhém tělese nazývají indukované a jev sám se označuje elektrická indukce.



### Elektrická indukce

Velikost indukovaného náboje závisí na:

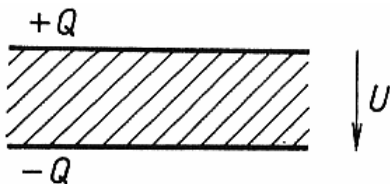
1. Na velikosti náboje, kterým bylo pole vyvolané.
2. Na poloze destiček v elektrostatickém poli.
3. Na velikosti plochy destiček.

Elektrickou indukci označujeme  $D$ , jednotkou je coulomb na metr čtverečný ( $C \cdot m^{-2}$ ) nebo ampér sekunda na metr čtverečný ( $A \cdot s \cdot m^{-2}$ ). Elektrická indukce se vypočte:

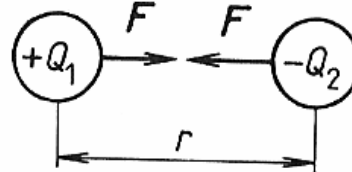
$$D = \frac{Q}{S} \quad (C \cdot m^{-2}; C, m^2)$$

### Coulombův zákon

Coulombův zákon nám udává jakou silou na sebe působí dva náboje. Zákon můžeme vyjádřit takto: Síla  $F$  mezi dvěma bodovými náboji  $Q_1, Q_2$  v klidu je přímo úměrná součinu těchto nábojů a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti.



Elektrostatické pole



Coulombův zákon

Vztah tedy vypadá:

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (N; N \cdot m^2 \cdot C^{-2}, C, C, m)$$

Konstanta  $k$  vyjadřuje vliv prostředí, ve kterém na sebe bodové náboje působí. Vypočteme ji:

$$k = \frac{1}{4 \pi \cdot \epsilon_0}$$

Kde  $\epsilon_0$  je permitivita vakua. Vzduch má přibližně stejnou permitivitu jako vakuum. Jednotkou permitivity je farad na metr ( $F \cdot m^{-1}$ ).

Permitivita vakua je:  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

Takže pro vakuum bude přibližně platit:  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N}$

Největší silou tedy na sebe působí dva náboje ve vakuu. V jiném nevodivém prostředí na sebe dva náboje silou  $\epsilon_r$ -krát menší.  $\epsilon_r$  je poměrná permitivita, která nám udává kolikrát se zvětší elektrostatická indukce v dielektriku proti elektrostatické indukci ve vakuu při stejné intenzitě elektrostatického pole.

Poměrné permitivity některých látek:

<i>materiál</i>	$\epsilon_r$
vzduch	1,0006
kondenzátorový papír	2 – 5
slída	6 – 7
sklo	3,5 – 4

Permitivita prostředí je dána vztahem:

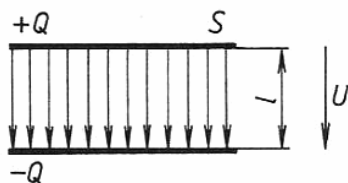
$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

Coulombův zákon bude tedy vypadat:

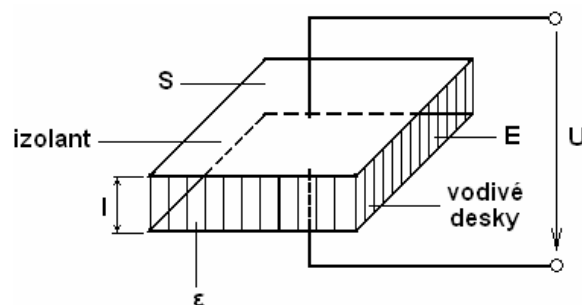
$$F = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (N; N \cdot m^2 \cdot C^{-2}, C, C, m)$$

### Kapacita deskového kondenzátoru

Homogenní elektrostatické pole vznikne mezi dvěma rovnoběžnými deskami, oddělenými dielektrikem. Po přiložení napětí  $U$  se na deskách objeví náboje  $+Q$  a  $-Q$ . V dielektriku je intenzita elektrického pole konstantní, indukční čáry jsou rovnoběžné. Toto představuje rovinný kondenzátor.



*Kondenzátor*



*Nákres struktury kondenzátoru*

Kapacita kondenzátoru je vlastnost daného uspořádání, je to schopnost vodiče hromadit určitou velikost náboje při určitém napětí. Kapacita má charakter vodivosti. Kapacita kondenzátoru je závislá na ploše, kterou se desky překrývají, na vzdálenosti mezi deskami a na dielektriku, které je mezi deskami použité. Kapacita kondenzátoru se značí  $C$  a její jednotkou je farad (F). Kapacitu deskového kondenzátoru vypočteme:

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{l} \quad (F; F \cdot m^{-1}, m^2, m)$$

Jednotkou kapacity je kapacita takového uspořádání na němž by se při napětí jeden volt nahromadil náboj jeden coulomb. Platí tedy:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{A \cdot s}{V} = F$$

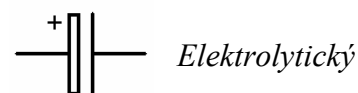
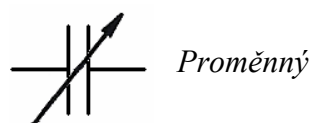
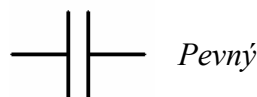
Farad je jednotka poměrně velká, a proto se v praxi používá jednotek menších (mF,  $\mu$ F, nF, pF).

## Druhy kondenzátorů

Kondenzátor je pasivní elektronická součástka, jejíž hlavní vlastnosti je kapacita.

### Dělení kondenzátorů:

1. **Pevné** – jejich kapacita je stálá.
  - 1.1. Keramické – jsou vyrobeny tak, že na keramickou destičku je z obou stran nanášena kovová vrstva. Kapacita těchto kondenzátorů není velká (pF, nF).
  - 1.2. Svitkové (fóliové) – jsou vyrobeny ze dvou pásků hliníkové fólie, mezi kterými je pásek dielektrika (např. slída). Tyto pásky se stočí do ruličky, popř. se rulička zalije do plastové krabičky. Kapacita těchto kondenzátorů se pohybuje v nF.
  - 1.3. Elektrolytické – tyto kondenzátory jsou vyrobeny podobně jako fóliové. U těchto kondenzátorů je důležité dodržet pólování (mají kladný a záporný pól).
  - 1.4. Tantalové – tyto kondenzátory jsou rovněž pólovány.
2. **Proměnné** – u těchto kondenzátorů se dá jejich kapacita měnit. Mění se tak, že jejich desky se posouvají a tak se mění jejich účinná plocha a tudíž i kapacita. Tyto kondenzátory mají malé kapacity a jsou rozměrově velké, proto se téměř nepoužívají.

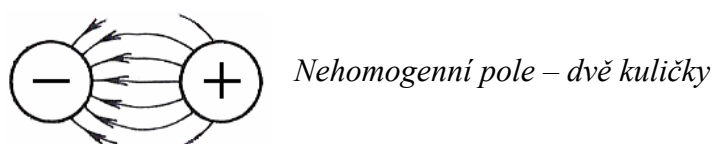
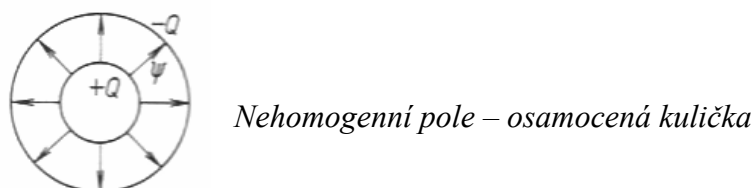
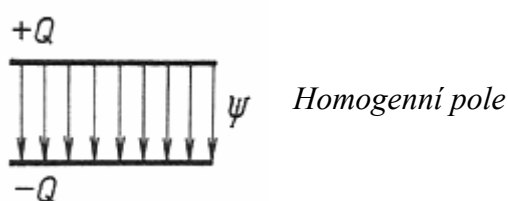


## Tvary elektrostatických polí

Pro názornější představu zobrazujeme elektrostatická pole siločarami, které sledují směr silového působení. Siločáry ve skutečnosti neexistují, jsou to myšlené čáry. Protože uvnitř vodičů není elektrostatické pole, indukční čáry začínají a končí vždy na povrchu vodivých těles. To znamená, že také indukční tok začíná a končí vždy na povrchu vodiče, kde také musí být jeho zdroj. Smysl siločar je shodný se směrem pohybu kladného elektrického náboje vloženého do pole. Elektrostatické pole neobsahuje uzavřené siločáry, každým bodem prochází jen jedna siločára. Siločáry jsou mimoběžky. Podle rozložení siločar v prostoru rozlišujeme pole homogenní a nehomogenní.

**Homogenní elektrostatické pole** se zobrazuje rovnoběžnými čarami. Intenzita elektrostatického pole je zde konstantní. Homogenní elektrostatické pole je např. u rovinného kondenzátoru.

**Nehomogenní elektrostatické pole** je takové, kde elektrická indukce není stejná, intenzita elektrostatického pole není konstantní. Siločáry vystupují kolmo z plochy, pole je radiální. Nehomogenní elektrostatické pole je např. mezi dvěma soustřednými kulovými plochami.



### Základní pravidla pro siločáry:

1. Vycházejí z kladně nabitého tělesa a končí na záporně nabitém tělese.
2. Vystupují kolmo z těles.
3. Nikde se neprotínají.
4. V homogenním elektrickém poli jsou siločáry rovnoběžné.
5. Na hranách a hrotech těles jsou siločáry blíže u sebe.

## Vodič v elektrickém poli

Jakmile vložíme do elektrického pole vodič, začnou v něm na volné elektrony působit síly vyvolané elektrickým polem. Tyto síly vedou ke vzniku usměrněného proudu elektronů vodičem. Elektrické pole vzniká ve vodiči proto, že mezi jeho konci je napětí. Kolem vodiče, kterým spojíme místa s různým potenciálem, vznikne ve vzduchu nejvyšší dosažitelnou rychlostí  $300\,000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  elektrické pole. Toto pole téměř současně uvede do pohybu všechny

volné elektrony ve vodiči. Zajistíme-li ne jedné straně trvalou dodávku elektronů ze zdroje napětí do vodiče a na druhé straně jejich únik z vodiče, prochází vodičem trvalý proud. Je-li vodič v elektrickém poli, ale není spojen se zdrojem napětí, vzniká jev zvaný elektrická indukce.

## Dielektrikum v elektrickém poli

Celkový kladný náboj v 1kg dielektrika je asi  $5 \cdot 10^7 C$ , tedy obrovský. V elektricky neutrálním tělese má stejnou velikost i záporný náboj, jehož nositelem jsou elektrony. Elektrické pole do kterého dielektrické těleso vložíme, působí silami na elektricky nabitě částice dielektrika. Podle našich představ se v atomu přesunou částice s těmito náboji na různé strany atomu, a tím dojde k polarizaci atomu. Polarizací se v dielektriku z jednotlivých atomů vytvářejí dipóly. Vlivem polarizace povrchových atomů tělesa se polarizované těleso z dielektrika její jako elektricky nabitě, protože jedna jeho povrchová vrstva má kladný náboj a druhá záporný náboj. Uspořádáním dipólů v dielektriku vzniká elektrické pole v dielektriku, které vždy zmenšuje vnější pole. Z toho důvodu je relativní permitivita látek vždy menší relativní permitivita vakua. Jakmile elektrické pole v dielektriku zanikne, mizí i polarizace dielektrika. Těleso je opět elektricky neutrální. Polarizace může vznikat nejen působením elektrického pole, ale také tlakem např. u piezoelektrických krystalů. Na jejich povrchu mohou vznikat velké potenciálové rozdíly, kterých se využívá k získání napětí pro jiskrový výboj např. u piezoelektrických zapalovačů.

## Elektrická pevnost dielektrika

Zvětší-li se intenzita elektrického pole nad určitou mez, vytrhnou se některé elektrony z elektronových obalů atomů dielektrika. Ty pak strhují další a další, až dojde k hromadnému průchodu elektronů dielektrikem. Dielektrikem prochází proud. Tomuto jevu říkáme průraz dielektrika. Každé dielektrikum odolává průrazu jen do určité míry, a to podle své elektrické pevnosti. Vzhledem k tomu, že izolanty nejsou dokonalé, závisí jejich elektrická pevnost na jejich chemické čistotě a na povrchovém znečištění, ale také na mechanickém namáhání. Elektrickou pevnost ovlivňuje také teplota, tlak a vlhkost prostředí, ve kterém izolant je. U pevných dielektrik se nejčastěji předpokládá, že čím je vrstva dielektrika tlustší, tím je větší také jeho elektrická pevnost. Jednotkou elektrické pevnosti je volt na metr ( $V \cdot m^{-1}$ ).

### Elektrické pevnosti některých látek:

<i><b>Materiál</b></i>	<i><b>elektrická pevnost</b></i> ( $kV \cdot mm^{-1}$ )
vzduch	2 – 3
kondenzátorový papír	30 – 58
slída	40 – 80
sklo	20 - 50

## Energie elektrického pole

Pokud chceme na kondenzátor s kapacitou  $C$ , který je nabitý napětím  $U$ , přivést další náboj  $\Delta Q$  je třeba vynaložit práci  $\Delta A$ . Celková práce potřebná k tomu abychom na kondenzátor přenesli postupně náboj  $Q$ , stanoví práci, o kterou se zvětší energie elektrostatického pole kondenzátoru. Energie elektrostatického pole  $W_e$  ( $W = A$ ) bude:

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U \quad (J; C, V)$$

Nebo:

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (J; F, V)$$

Dodaná energie, která se spotřebovala polarizací dielektrika zůstane v polarizovaném dielektriku ve formě energie elektrostatického pole. Energie je tedy uchována v prostoru mezi deskami kondenzátoru. Tento prostor představuje určitý objem  $V = S \cdot l$ . Energii nahromaděnou v objemové jednotce dielektrika vypočteme:

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot D \cdot E \quad (J \cdot m^{-3}; C \cdot m^{-2}, V \cdot m^{-1})$$

## Magnetické pole

### Magnetické vlastnosti látek

Podobně jako v elektrických obvodech je elektrický proud úměrný elektrickému napětí, bude i v magnetických obvodech magnetický tok úměrný magnetickému napětí, přičemž konstantou úměrnosti je magnetická vodivost. Magnetická vodivost je úměrná permeabilitě, a proto pro dané hodnoty magnetického napětí  $U_m$  a magnetického toku  $\Phi$  je potřebný průřez materiálu nepřímo úměrný jeho poměrné permeabilitě.

Absolutní permeabilita má charakter magnetické vodivosti, vyjadřuje magnetické vlastnosti prostředí, kterým prochází magnetický tok. Je dána vztahem:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (H \cdot m^{-1}; H \cdot m^{-1})$$

Kde:

$\mu_0$  je permeabilita vakua, platí přibližně i pro vzduch, její hodnota je:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ .

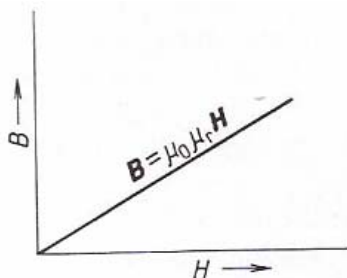
$\mu_r$  je poměrná permeabilita a udává kolikrát je absolutní permeabilita prostředí větší než permeabilita vakua.

Látky dělíme do tří skupin:

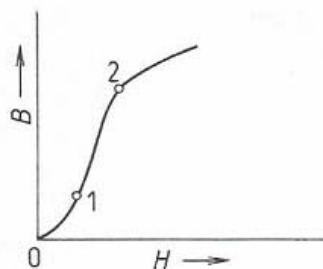


1. **diamagnetické** – jsou látky, na které když působí magnetické pole jsou z něj slabě vypuzovány. Jejich poměrná permeabilita je o málo menší než jedna. Jsou to například látky: zlato, stříbro, měď, olovo, rtuť, voda.
2. **paramagnetické** – jsou látky, na které když působí magnetické pole jsou do tohoto pole slabě vtahovány. Jejich poměrná permeabilita je o málo větší než jedna. Jsou to například látky: platina, hliník, vzduch.
3. **feromagnetické** – jsou látky, které jsou do magnetického pole vtahovány silně. Jejich poměrná permeabilita je mnohokrát větší než jedna, její velikost závisí na intenzitě magnetického pole. Těchto látek je málo. Z prvků to jsou čtyři: železo, kobalt, nikl, gadolinium. Dále k feromagnetickým látkám patří různé druhy slitin a různé druhy ocelí.

V elektrotechnice jsou nejdůležitější látky feromagnetické. Velká magnetická vodivost umožňuje dosáhnout velkých magnetických toků. Vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole není lineární, nedá se vyjádřit magnetickým vztahem, ale musí se stanovit pro každý materiál měřením. Závislost magnetické indukce  $B$  na intenzitě magnetického pole  $H$  vyjadřuje magnetizační charakteristika.



Magnetizační charakteristika diamagnetických a paramagnetických látek



Magnetizační charakteristika feromagnetických látek

Látky feromagnetické mají nelineární průběh magnetizační charakteristiky. Na magnetizační charakteristice lze popsat tři charakteristické oblasti:

1. **Oblast 0 – 1** – při malých hodnotách intenzity magnetického pole  $H$  se magnetická indukce  $B$  zvětšuje pomalu, poměrná permeabilita  $\mu_r$  vzrůstá rychle z počáteční hodnoty. Tato oblast nemá pro praktické využití význam.
2. **Oblast 1 – 2** – tato část je téměř lineární, magnetická indukce  $B$  i poměrná permeabilita se zvětšují rychleji. V bodě 2 dosahuje poměrná permeabilita maximální hodnoty. Tato část se v praxi využívá.
3. **Oblast za bodem 2** – je to oblast nasycení. S rostoucí intenzitou magnetického pole  $H$  magnetická indukce  $B$  roste pomaleji a poměrná permeabilita se zmenšuje.

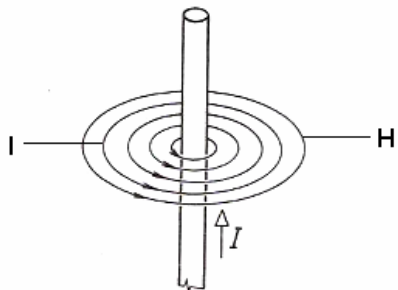
Tato magnetizační charakteristika platí pro případ, že feromagnetický materiál nebyl před příslušným měřením pro získání magnetizační křivky magnetován. Magnetizační křivka jdoucí počátkem se nazývá křivkou prvotní magnetizace.

## Magnetické pole přímého vodiče a cívky

### Magnetické pole přímého vodiče

Elektrický proud prochází obvodem od kladného pólu k zápornému. Elektrický proud vytváří v okolí vodiče magnetické pole, jehož existenci můžeme dokázat magnetkou. Místa se stejnou

velikostí magnetického pole jsou na myšlených soustředných válcových plochách, v jejichž ose je umístěn vodič. V rovině kolmé na tento vodič mají indukční čáry tvar soustředných kružnic. Směr indukčních čar určíme pravidlem pravé ruky, které zní: Uchopíme-li vodič pravou rukou tak, že palec ukazuje směr proudu, ukazují prsty směr indukčních čar (Ampérovo pravidlo).



*Magnetické pole přímého vodiče*

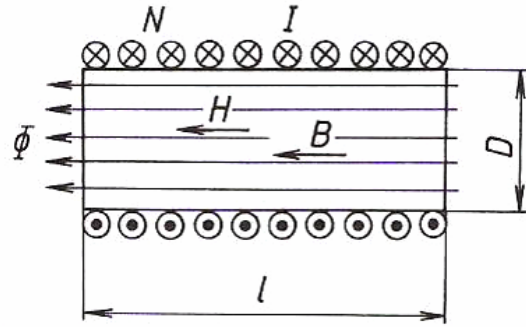
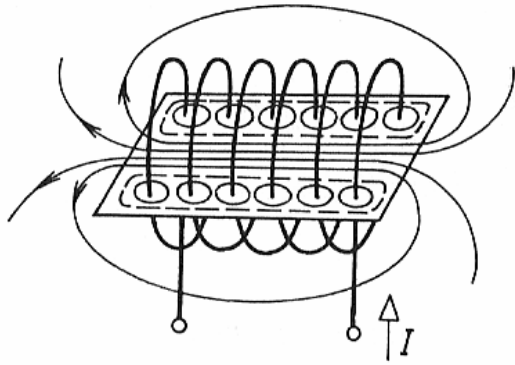
Intenzita magnetické pole se vypočte:

$$H = \frac{I}{l} = \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad (A \cdot m^{-1}; A, m)$$

Kde  $l$  je střední délka indukční čáry.

### **Magnetické pole cívky**

Vodič svinutý do prostorové křivky zvané šroubovice tvoří válcovou cívku (solenoid). Jednotlivé závity lze považovat za kruhové. Každý závit vybudí ve svém okolí magnetické pole. Uvnitř kruhových závitů probíhají všechny indukční čáry navzájem rovnoběžně a stejně hustě. Z plochy krajního závitu se indukční čáry rozbíhají, probíhají vnějším prostorem, kde je jejich hustota menší než uvnitř závitu. Někdy označujeme stranu cívky, ze které indukční čáry vystupují, jako severní pól a stranu, do které vstupují jako jižní pól. V prostoru vně solenoidu je znatelné magnetické pole jen v blízkosti konců solenoidu, s rostoucí vzdáleností od konců rychle klesá. Čím delší solenoid je, tím zřetelněji se projeví uvedené vlastnosti magnetického pole. Směr indukčních čar určíme pravidlem pravé ruky: Uchopíme-li cívku do pravé ruky tak, aby prsty směřovaly ve směru proudu, je severní pól na straně palce. Zvláštním typem cívky je toroid. Toroid je tvořen kruhovými závity navinutými na prstencovou plochu. Cívka nemá magnetické póly, lze ji považovat za solenoid, jehož oba konce jsou spojeny. Indukční čáry probíhají jen vnitřkem prstencové plochy jako soustředné kružnice.

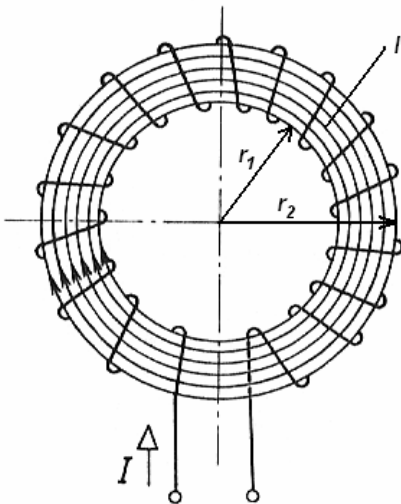


*Magnetické pole solenoidu*

Intenzita magnetické pole se vypočte:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (A \cdot m^{-1}; A, m)$$

Kde l je délka cívky a N počet závitů.



*Magnetické pole toroidu*

Střední poloměr toroidu:

$$r_s = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

Střední délka indukční čáry:

$$l = 2\pi \cdot r_s$$

Intenzita magnetické pole se vypočte:

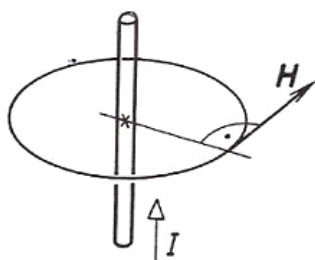
$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (A \cdot m^{-1}; A, m)$$

### Intenzita a indukce magnetického pole

**Intenzita magnetického pole** se značí  $H$  a je dána magnetickým napětím  $U_m$  na jednotku délky indukční čáry, nebo-li spádem magnetického napětí. Vyjadřujeme ji vztahem:

$$H = \frac{U_m}{l} \quad (A \cdot m^{-1}; A, m)$$

Intenzita magnetického pole je vektorová veličina, jejíž směr a smysl je dán směrem indukčních čar. Jednotkou intenzity magnetického pole je ampér na metr ( $A \cdot m^{-1}$ ). V okolí dlouhého přímého vodiče, kterým prochází proud  $I$ , tvoří indukční čáry soustředné kružnice. Ve vzdálenosti  $r$  od středu vodiče je intenzita magnetického pole stejná po celé délce indukční čáry.



*Intenzita magnetického pole*

Platí:

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad (A \cdot m^{-1}; A, m)$$

S rostoucí vzdáleností od vodiče se intenzita magnetického pole zmenšuje, je přímo úměrná vzdálenosti. Intenzita magnetického pole se vždy vztahuje k určitému místu magnetického pole a je na prostředí nezávislá. Při výpočtu intenzity magnetického pole solenoidu považujeme za délku indukční čáry délku cívky, neboť nelze definovat délku střední indukční čáry vzhledem k magnetickému rozptylu. Magnetické napětí solenoidu je:

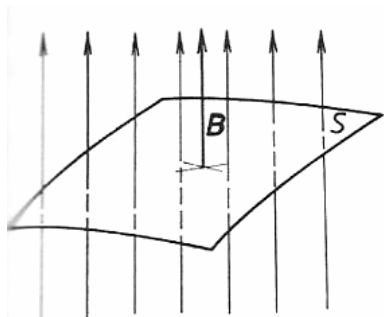
$$u_m = N \cdot I$$

Kde  $N$  je počet závitů.

*Příklad 18: Určete intenzitu magnetického pole přímého vodiče ve vzdálenosti 25cm od vodiče, prochází-li vodičem proud 2,2A.*

*Příklad 19: Určete intenzitu magnetické pole uvnitř solenoidu, který má délku 30cm, 350 závitů a pochází jím proud 350mA.*

**Magnetická indukce** vyjadřuje hustotu magnetického pole. Je dána počtem magnetických indukčních čar, tedy magnetickým tokem  $\Phi$ , na jednotku plochy  $S$ . Magnetickou indukci značíme  $B$ . Je to vektorová veličina. V každém místě magnetického pole je vždy kolmá na plochu, má určitou velikost, směr a orientaci.



*Magnetická indukce*

Magnetickou indukci lze vyjádřit vztahem:

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (T; \text{Wb}, m^2)$$

Nebo:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \quad (T; H \cdot m^{-1}, A \cdot m^{-1})$$

Jednotkou magnetické indukce je tesla (T). Je-li magnetická indukce ve všech bodech magnetického pole stejná co do směru i co do velikosti, jsou indukční čáry rovnoběžné a stejně od sebe vzdálené. V praxi dosahujeme maximálních hodnot magnetické indukce 1 až 2T.

### Magnetický odpor a vodivost

Stejně jako v elektrických obvodech platí Ohmův zákon, tak v magnetických obvodech platí Hopkinsonův zákon. Tento zákon je tedy analogií Ohmova zákona. Hopkinsonův zákon udává vztah mezi magnetickým tokem  $\Phi$ , magnetickým napětím  $U_m$  a magnetickým odporem  $R_m$ .

**Magnetický odpor** (reluktance) je tedy veličina vyjadřující vlastnosti magnetického prostředí. Každý materiál klade magnetickému toku různý magnetický odpor. Magnetický odpor značíme  $R_m$  a jeho jednotkou je  $H^{-1}$ , a můžeme jej vyjádřit vztahem:

$$R_m = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{l}{S} \quad (H^{-1}; H \cdot m^{-1}, m, m^2)$$

Nebo jej můžeme vyjádřit z Hopkinsonova zákona, který má vyjádření:

$$\Phi = \frac{U_m}{R_m} = \frac{F_m}{R_m}$$

Magnetický odpor se tedy rovna:

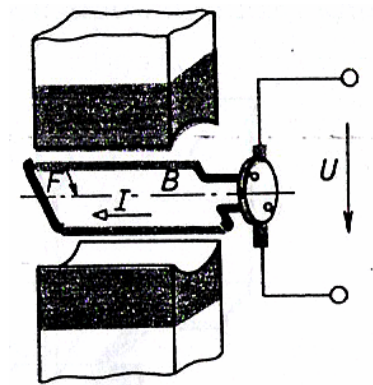
$$R_m = \frac{U_m}{\Phi} \quad (H^{-1}; A, V \cdot s)$$

**Magnetická vodivost** (permeance) je převrácená hodnota magnetického odporu. Značí se  $G_m$  a její jednotkou henry (H). Platí tedy vztah:

$$G_m = \frac{1}{R_m} \quad (H; H^{-1})$$

### Dynamické účinky elektrického proudu

Dynamické (silové) účinky elektrického proudu jsou základním jevem pro konstrukci elektromotoru a některých elektrických přístrojů (např. relé, stykačů, ale i elektrotechnických měřicích přístrojů). Dynamické účinky elektrického proudu si vysvětlíme na obrázku.



*Smyčka, kterou prochází proud*

Když vložíme do magnetického pole smyčku z drátu, zjistíme že jsou aktivní pouze vodorovné části. Dále si můžeme všimnout, že v nich proud prochází nesouhlasným směrem. Síla, která působí na vodič nahoře, mu dává stejný točivý moment jako síla, která působí dole. Výsledkem je tedy dvojnásobný točivý moment. Nyní stačí vždy ve správném okamžiku změnit směr proudu ve smyčce a smyčka se bude stále otáčet.

### **Sílové působení na vodič v magnetickém poli**

Síla, kterou působí magnetické pole na vodič, závisí na magnetické indukci  $B$ , na proudu  $I$ , který prochází vodičem a na aktivní délce vodiče, tj. délka té části vodiče, na kterou magnetické pole působí. Pro sílu v homogenním magnetickém poli platí vztah:

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (N; T, A, m)$$

Orientaci síly působící na vodič v magnetickém poli stanovíme Flemingovým pravidlem levé ruky: Levou ruku vložíme do magnetického pole tak, aby indukční čáry vstupovaly do dlaně, prsty ukazovaly směr proudu vodičem, pak odtažen palec ukazuje směr síly  $F$ .

**Indukované napětí** v přímém pohyblivém vodiči je přímo úměrné součinu magnetické indukce  $B$ , aktivní délky vodiče  $l$  a rychlosti vodiče  $v$ . Pro indukované napětí platí vztah:

$$u_i = B \cdot l \cdot v \quad (V; T, m, m \cdot s^{-1})$$

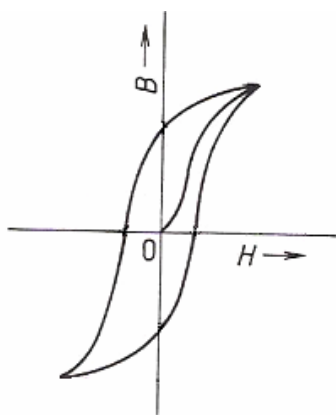
Směr proudu při elektromagnetické indukci určuje Flemingovo pravidlo pravé ruky: Pravou ruku vložíme do magnetického pole tak, aby indukční čáry vstupovaly do dlaně, palec ukazoval směr pohybu, pak natažené prsty udávají směr indukovaného elektrického napětí  $u$  a směr indukovaného proudu  $i$ .

### Ztráty hysterézní a vířivými proudy

#### **Hysterézní ztráty**

K přemagnetování feromagnetického materiálu se spotřebuje energie. Tato ztracená energie je pro jednotku objemu úměrná ploše hysterézní smyčky. Při stálém přemagnetování bude ztracená energie úměrná ploše jedné hysterézní smyčky a počtu smyček vytvořených za jednu sekundu, tedy kmitočtu proudu  $f$ . V praxi je při magnetické indukci asi 1 T plocha hysterézní smyčky úměrná druhé mocnině maximální magnetické indukce. Pak hysterézní ztráty jsou:

$$P_h \sim f \cdot B^2$$



*Hysterézní smyčka*

#### **Ztráty vířivými proudy**

Vířivé (Foucaultovy) proudy vznikají při magnetování feromagnetických materiálů časově proměnným střídavým tokem. Intenzita magnetického pole a magnetická indukce mají rovněž časově proměnný průběh. Časově proměnný magnetický tok budí elektrické pole, jehož siločáry tvoří uzavřené dráhy kolem magnetického toku. Tyto siločáry obepínají

magnetický tok leží v rovinách kolmých ke směru magnetické indukce. Protože je prostředí elektricky vodivé, vznikne v něm proudové pole. Indukované proudy působí proti příčině, která je vyvolala. Zeslabují tak budící magnetický tok. Největší zeslabení nastane uprostřed průřezu, protože ten obepínají všechny indukované proudy, které nazýváme vířivé proudy. Zeslabení celého magnetického toku vířivými proudy a zmenšení magnetické indukce ve střední části průřezu se projevují jako zmenšení poměrné permeability feromagnetického materiálu. Ztráty vzniklé vířivými proudy jsou značně závislé na frekvenci a lze je vyjádřit vztahem:

$$P_v \sim f^2 \cdot B^2$$

Ztráty vířivými proudy lze omezit:

1. Použitím navzájem izolovaných plechů, čímž dojde k rozdělení jádra.
2. Použitím materiálu z velkým elektrickým odporem (přidáním malého množství křemíku do základního materiálu).
3. Snížením indukovaného napětí.

Vířivé proudy se v praxi také využívají. V indukčních pecích se vířivými proudy kov zahřívá, případně i taví. Dále se využívají u indukčních brzd, elektroměrů a u tlumení ručky měřících přístrojů.

## Střídavý proud

### Vznik střídavého proudu a napětí

Střídavý sinusový proud a napětí může vzniknout dvěma způsoby:

#### **1. Časovou změnou magnetického toku**

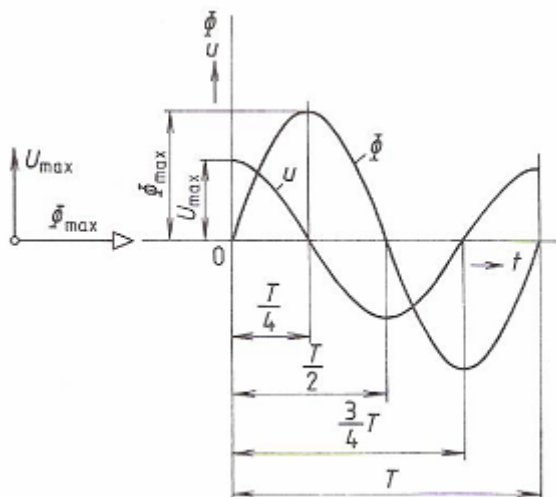
Pro cívku s  $N$  závitů platí vztah:

$$u = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Za předpokladu, že spřažený magnetický tok, který prochází jádrem cívky, má sinusový průběh daný vztahem:

$$\Phi = \Phi_{\max} \cdot \sin \omega \cdot t$$





Časový průběh spřaženého magnetického toku a indukovaného napětí v cívce

Bude se časovou změnou magnetického toku indukovat v cívce s  $N$  závitů střídavé napětí  $u$ . Při kladné změně indukčního toku se indukuje napětí kladné, při záporné časové změně pak napětí záporné. Z průběhu střídavého magnetického toku  $\Phi$  vyplývá, že časová změna toku je největší v okamžicích, kdy magnetický tok prochází nulou. V těchto okamžicích je indukované napětí největší, má hodnotu  $U_{\max}$ . V okamžicích, kdy je časová změna magnetického toku rovná nule, se indukované napětí rovná nule. Indukované napětí je kladné, je-li kladná časová změna proudu, tedy když magnetický tok roste. Při zmenšování magnetického toku je časová změna toku záporná, indukované napětí je rovněž záporné. Platí tedy, že časovou změnou střídavého magnetického toku se indukuje v cívce střídavé napětí, které předbíhá magnetický tok o  $\pi/2$ . Časový průběh indukovaného napětí je sinusový a je dán rovnicí:

$$u = U_{\max} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Maximální amplituda indukovaného napětí v ideální cívce s  $N$  závitů je dána vztahem:

$$U_{\max} = N \cdot \omega \cdot \Phi_{\max}$$

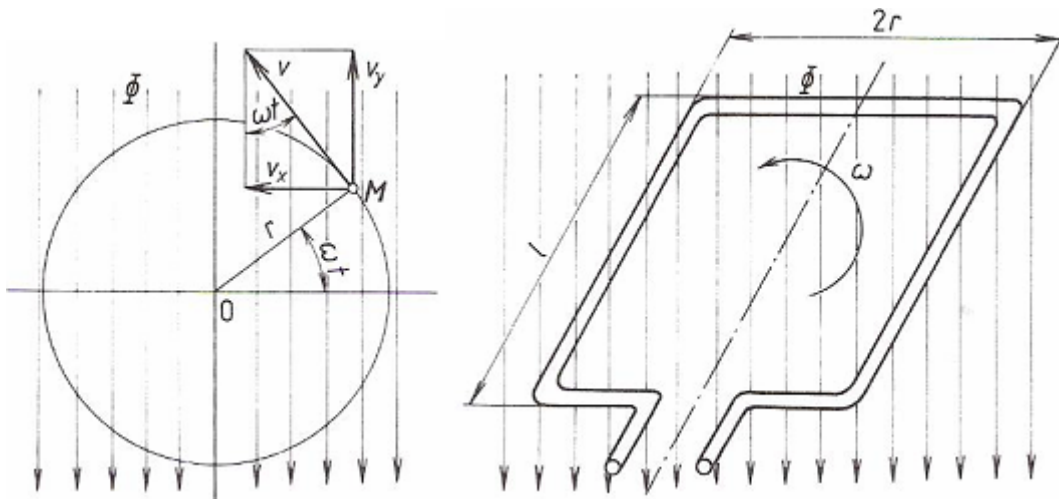
Po dosazení efektivní hodnoty indukovaného napětí, úpravě a vyčíslení dostaneme:

$$U = 4,44 f \cdot N \cdot \Phi_{\max}$$

## 2. Pohybem vodiče v magnetickém poli

Vyjdeme z úvahy, že v homogenním magnetickém poli se pohybuje po obvodu kružnice vodič  $M$  obvodovou rychlostí  $v = \omega r$ . Podle indukčního zákona se v něm indukuje napětí sinusového průběhu:

$$u = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \omega \cdot t$$



*Indukce elektrického napětí ve vodiči    Indukce elektrického napětí v závitě*

Otáčí-li se v homogenním magnetickém poli jeden závit obdélníkového tvaru, indukují se na obou stranách závitu stejně velké okamžité hodnoty napětí takového smyslu, že se jejich velikosti sčítají. Pro celkové napětí dostaneme vztah:

$$u = 2 \cdot B \cdot l \cdot v \cdot \sin \omega \cdot t$$

Po dalších úpravách dostaneme vztah pro výpočet okamžité hodnoty indukovaného střídavého napětí sinusového průběhu:

$$u = U_{\max} \cdot \sin \omega \cdot t$$

### Hodnoty elektrických veličin sinusového průběhu

Střídavý proud i napětí mají v každém okamžiku jinou velikost, proto u nich rozeznáváme tyto hodnoty:

1. **Okamžité hodnoty** – jsou hodnoty, které odpovídají určitému časovému okamžiku. Označujeme je malými písmeny i, u. Vypočteme je:

$$i = I_{\max} \cdot \sin \omega \cdot t$$

$$u = U_{\max} \cdot \sin \omega \cdot t$$

V případě, že počátek sinusového proudu nebo napětí nezačíná v nule platí:

$$i = I_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t \pm \varphi)$$

$$u = U_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t \pm \varphi)$$

Kde  $\varphi$  je úhel fázového posunu.

2. **Maximální hodnoty** – jsou největší okamžité hodnoty, označujeme je  $I_{\max}$ ,  $U_{\max}$ .

3. **Efektivní hodnoty** – tyto hodnoty střídavého proudu nebo napětí vykonávají stejné tepelné účinky jako hodnoty stejnosměrného proudu nebo napětí. Označujeme je  $I, U$ . Tyto hodnoty vypočteme:

$$I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707I_{\max}$$

$$U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707U_{\max}$$

Tyto hodnoty jsou pro praxi nejdůležitější. Tyto hodnoty napětí a proudu naměří měřicí přístroje, jsou uváděny na elektrických spotřebičích atd.

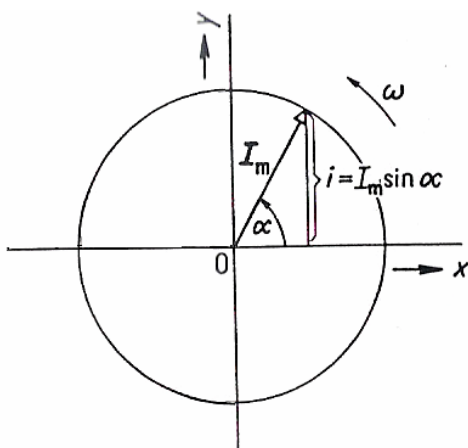
4. **Střední hodnoty** – jsou hodnoty střídavého proudu nebo napětí, které vyvolají stejné chemické účinky jako hodnoty stejnosměrného proudu nebo napětí. Označujeme je  $I_{\text{stř}}, U_{\text{stř}}$  ( $I_{\text{AV}}, U_{\text{AV}}$ ). Vypočteme je:

$$I_{\text{stř}} = \frac{2 \cdot I_{\max}}{\pi} = 0,637I_{\max}$$

$$U_{\text{stř}} = \frac{2 \cdot U_{\max}}{\pi} = 0,637U_{\max}$$

### Znázorňování sinusových veličin fázorovými diagramy

Fázor se graficky znázorňuje úsečkou. Délka úsečky odpovídá maximální hodnotě zobrazované veličiny ( $I_{\max}, U_{\max}$ ). Směr fázoru je dán úhlem  $\alpha$ , který svírá fázor s kladným směrem osy  $x$ . Orientace fázoru se vyznačuje šipkou na konci úsečky. Obrazec znázorňující sinusové veličiny pomocí fázorů nazýváme fázorový diagram.



*Znázornění střídavého proudu fázorem*

Při jeho kreslení je třeba se řídit těmito zásadami:

1. Fázor se otáčí úhlovou rychlostí  $\omega = 2\pi f$  proti směru hodinových ručiček. V diagramu je to označeno šipkou  $\omega$ .

2. Do jednotlivých diagramů můžeme zakreslit jen fázory těch sinusových veličin, které mají stejný kmitočet.
3. Fázory skládáme a rozkládáme pomocí rovnoběžníku nebo trojúhelníku.
4. Sčítat nebo odečítat můžeme fázory téže sinusové veličiny (např. fázory proudu, fázory napětí atd.).
5. Fázorové diagramy lze kreslit také pro efektivní hodnoty sinusových veličin.
6. Fázory kreslené nad osou x znázorňují kladné hodnoty, fázory kreslené pod osou x záporné hodnoty. Fázory ležící v ose x znamenají nulové okamžité hodnoty, kdežto fázory ležící v ose y odpovídají pro uvažovaný okamžik maximálnímu okamžitým hodnotám sinusových veličin.

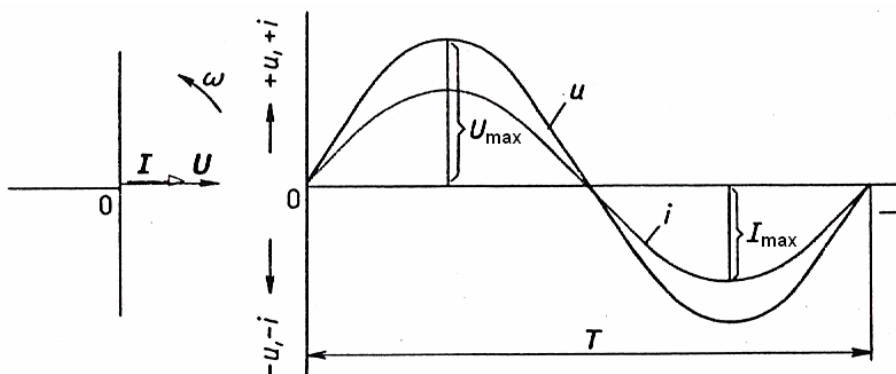
## Rezistor, cívka, kondenzátor v obvodu střídavého proudu

### **Rezistor v obvodu střídavého proudu**

Připojíme-li rezistor ke zdroji střídavého napětí na jehož svorkách je napětí  $u = U_{\max} \sin \omega t$  s frekvencí  $f$ , bude rezistorem procházet proud  $i$  podle Ohmova zákona, tedy:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_{\max} \cdot \sin \omega \cdot t}{R}$$

Tento proud má sinusový průběh se stejným kmitočtem jako napětí.



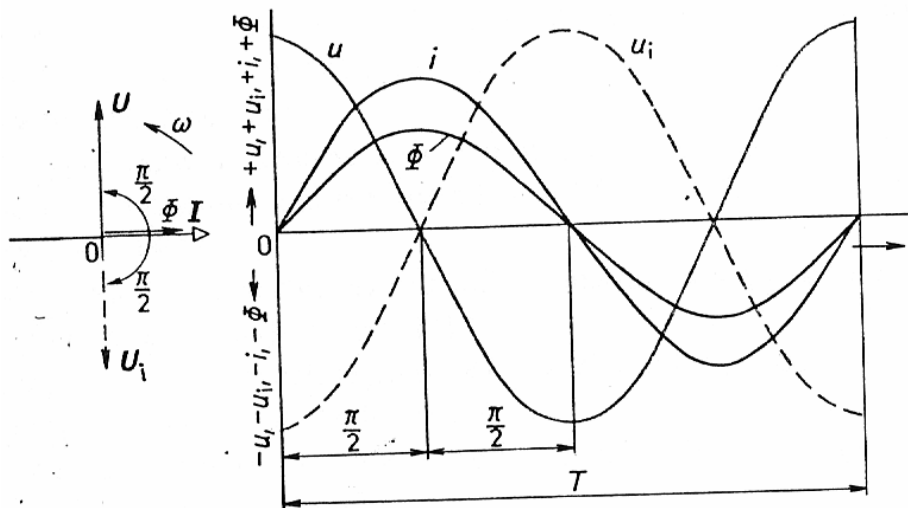
*Znázornění střídavého napětí a proudu u rezistoru v obvodu střídavého proudu*

Z průběhu proudu a napětí je patrné, že proud  $i$  sleduje přesně změny napětí  $u$ . O takovém proudu a napětí říkáme, že jsou ve fázi. Pro jednoduchý elektrický obvod střídavého proudu s rezistorem s činným odporem  $R$  platí tedy Ohmův zákon ve stejném tvaru, jako pro elektrický obvod stejnosměrného proudu a rezistorem s odporem  $R$ . Platí tedy:

$$I = \frac{U}{R}$$

### **Cívka v obvodu střídavého proudu**

Připojíme-li ke zdroji střídavého napětí  $u$  ideální cívku, bude obvodem procházet sinusový proud  $i = I_{\max} \sin \omega t$ . Sinusový proud  $i$  vybudí střídavý magnetický tok  $\Phi$ , který je ve fázi s proudem  $i$ .



Znázornění střídavého napětí a proudu  $i$  v cívce v obvodu střídavého proudu

Z průběhu střídavého proudu  $i$  je zřejmé, že časová změna proudu je největší v okamžicích, kdy proud prochází nulou. V těchto okamžicích je indukované napětí největší, má hodnotu  $U_{\max}$ . V okamžicích, kdy je časová změna proudu rovna nule, je indukované napětí rovno nule. Platí tedy, že časovou změnou sinusového proudu se indukuje v ideální cívce střídavé napětí, které předbíhá proud o  $\pi/2$ . Bude-li proud cívkou dán rovnicí:

$$i = I_{\max} \cdot \sin \omega \cdot t$$

Pak napětí na ideální cívce bude:

$$u = U_{\max} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Přesto, že ideální cívka nemá činný odpor, je střídavý proud v obvodu omezen. Dosahuje-li však určité konečné hodnoty, musí nějaký odpor mít. Odpor není činný, bude jen zdánlivý a nazývá se indukční reaktance. Značíme ji  $X_L$  a její jednotkou je ohm ( $\Omega$ ), vypočteme ji vztahem:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad (\Omega; \text{Hz}, H)$$

Převrácená hodnota indukční reaktance je indukční susceptance. Tu značíme  $B_L$  a její jednotkou je siemens (S), vypočteme ji:

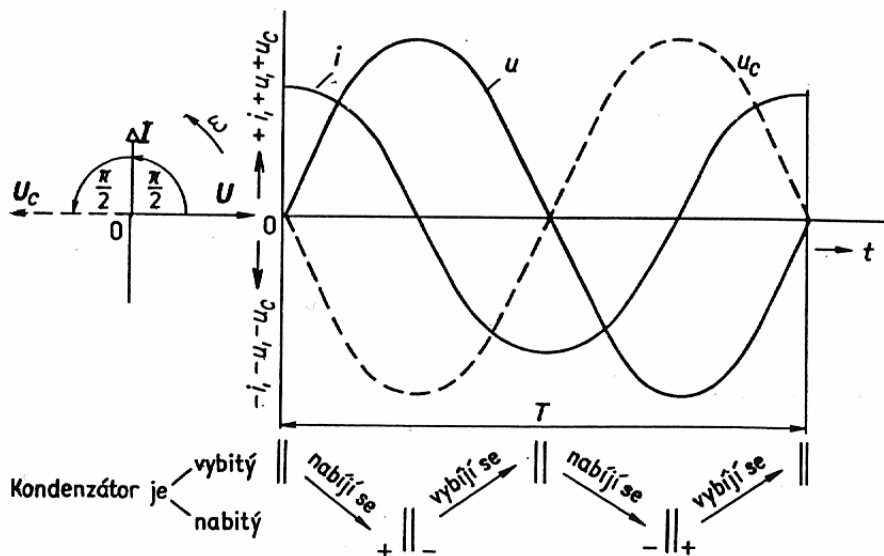
$$B_L = \frac{1}{X_L} \quad (S; \Omega)$$

Pro napětí tedy platí vztah:

$$U = I \cdot X_L$$

### Kondenzátor v obvodu střídavého proudu

Připojíme-li ke zdroji střídavého napětí  $u = U_{\max} \sin \omega t$  ideální kondenzátor, bude obvodem procházet střídavý sinusový proud  $i$ .



Znázornění střídavého napětí a proudu  $u$  kondenzátoru v obvodu střídavého proudu

Z průběhu střídavého napětí je zřejmé, že časová změna napětí je největší v okamžicích, kdy napětí prochází nulou. V těchto okamžicích je proud největší, má hodnotu  $I_{\max}$ . V okamžicích, kdy časová změna napětí je rovna nule je proud nulový. Proud je kladný je-li kladná časová změna napětí. Bude-li napětí na kondenzátoru dáno rovnicí:

$$u = U_{\max} \cdot \sin \omega \cdot t$$

Pak proud ideálním kondenzátorem bude:

$$i = I_{\max} \cdot \sin \left( \omega \cdot t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Je patrné, že proud v obvodu s ideálním kondenzátorem předbíhá napětí o  $\pi/2$ .

Stejně jako cívka má zdánlivý odpor (indukční reaktance), tak bude mít i kondenzátor zdánlivý odpor, nazýváme ho však kapacitní reaktance. Značíme ji  $X_C$  a její jednotkou je ohm ( $\Omega$ ) vypočteme ji:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (\Omega; Hz, F)$$

Převrácenou hodnotou kapacitní reaktance je kapacitní susceptance. Značíme ji  $B_C$ , její jednotkou je siemens (S), vypočteme ji:

$$B_C = \frac{1}{X_C} \quad (S; \Omega)$$

Napětí tady vypočteme:

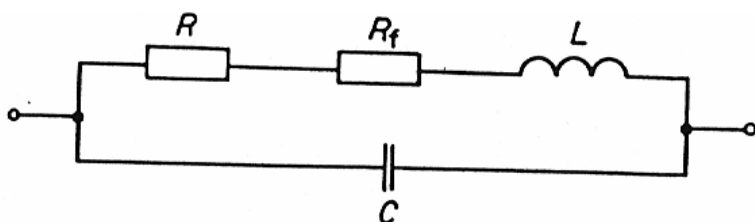
$$U = I \cdot X_C$$

## Ideální a skutečné parametry rezistoru, cívky a kondenzátoru

### **Ideální a skutečné parametry rezistoru**

Ideální rezistor je součástka, u které se neuplatňuje vliv jiné součástky. Jeho jediným parametrem je elektrický odpor.

V obvodu střídavého proudu má rezistor kromě činného odporu  $R$  ještě odpor  $R_f$  vlivem povrchového jevu. Povrchový jev (zvaný také skin efekt) způsobuje vlivem vlastní indukce uvnitř vodiče nerovnoměrné rozložení hustoty elektrického proudu ve vodiči. Největší hustota proudu je pod povrchem vodiče, což způsobuje, že při průchodu střídavého proudu vodičem klade tento vodič mnohem větší odpor než při průchodu stejnosměrného proudu. Dále má rezistor indukční reaktanci vyvolanou indukčností  $L$  a kapacitní reaktanci tvořenou kapacitou  $C$  mezi závity u rezistorů vinutých drátem a mezi vývody. Vlivem indukčnosti a kapacity se odpor rezistoru stává závislý na kmitočtu.

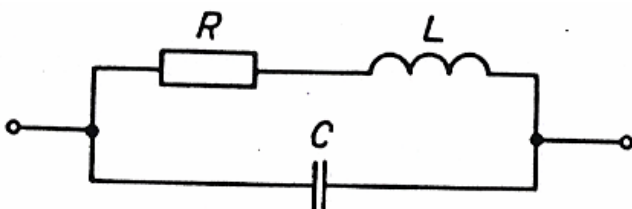


*Náhradní schéma skutečného rezistoru*

### **Ideální a skutečné parametry cívky**

Ideální cívka je součástka, u které se neuplatňuje vliv jiné součástky. Je zhotovená z dokonalého vodiče, jehož elektrický odpor se rovná nule. Její jediným parametrem je indukčnost.

V obvodu střídavého proudu má cívka kromě indukčnosti a kapacity  $C$  mezi závity ještě ztrátový odpor, jenž v sobě zahrnuje činný odpor drátu, kterým je cívka navinutá, vliv povrchového jevu a další přídavné ztráty. V praxi zpravidla kapacitu zanedbáváme, a pak je znázornění skutečné cívky obvod, ve kterém je buď rezistor s odporem  $R$  zapojený v sérii s cívkou s indukčností  $L$ , nebo rezistor s odporem  $R$  zapojený paralelně s cívkou s indukčností  $L$ . Obě schémata jsou si rovnocenná, nebo jsou to duální obvody.

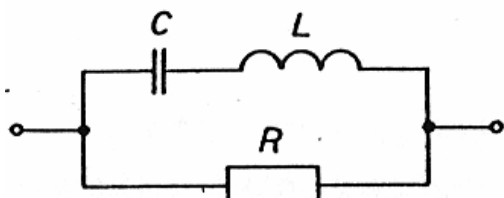


*Náhradní schéma skutečné cívky*

### **Ideální a skutečné parametry kondenzátoru**

Ideální kondenzátor je součástka, u které se neuplatňuje vliv jiné součástky. Je zhotoven z dokonale vodivých desek a z dokonalého izolantu. Jeho jediným parametrem je kapacita.

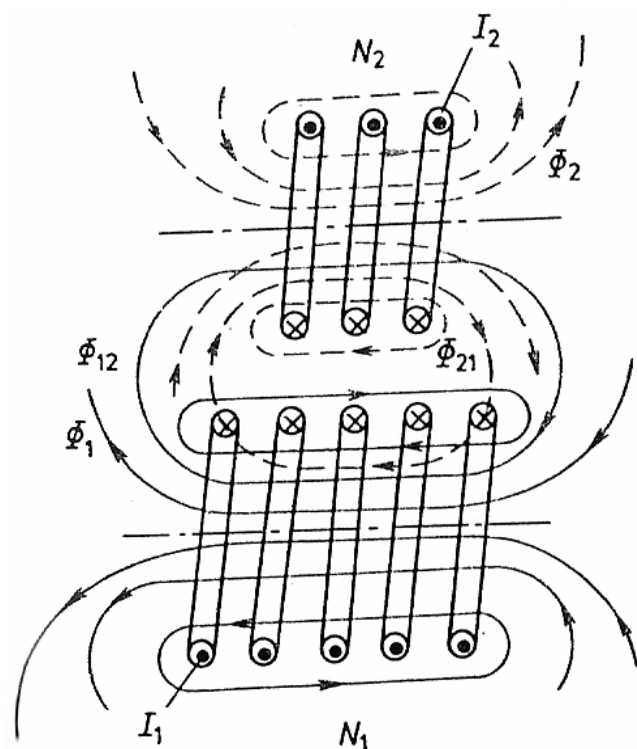
V obvodu střídavého proudu má kondenzátor kromě kapacity ještě další vlastnosti. Jsou to izolační odpor  $R_{iz}$ , odpor způsobený povrchovým jevem  $R_f$ , odpor vyjadřující ztráty v dielektriku  $R_d$  a indukčnost folií a přívodu  $L$ . Všechny odpory zahrnujeme do výsledného ztrátového odporu  $R$ . Zanedbáme-li indukčnost, dostaneme zjednodušené schéma, v němž je kondenzátor s kapacitou  $C$  zapojený paralelně s rezistorem se ztrátovým odporem  $R$ . Duální obvod tvoří kondenzátor, k němuž je v sérii zapojen rezistor.



*Náhradní schéma skutečného kondenzátoru*

## Vzájemná indukčnost cívek, řazení cívek

### **Vzájemná indukčnost**



*Dvě cívky spřažené magnetickým tokem*

Máme cívku s počtem závitů  $N_1$ , kterou protéká proud  $I_1$ , který vyvolá magnetický tok  $\Phi_1$ . Když k této cívce přiblížíme cívku druhou, která má počet závitů  $N_2$ , má s cívkou společný magnetický tok  $\Phi_{12}$ . Protože střídavý proud  $I_1$  je časově proměnný, je časově proměnný i magnetický tok  $\Phi_1$  a tedy i magnetický tok  $\Phi_{12}$ . To má za následek, že v cívce s počtem závitů  $N_2$  se indukuje napětí:



$$u_2 = M \cdot \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

Kde  $M$  je vzájemná indukčnost, jejíž jednotkou je henry (H). Vzájemná indukčnost dvou cívek závisí pouze na geometrickém uspořádání dvou cívek, a proto je vzájemná indukčnost cívky  $N_1$  vzhledem k cívce  $N_2$  stejná jako vzájemná indukčnost cívky  $N_2$  vzhledem k cívce  $N_1$ . platí tedy:

$$u_1 = M \cdot \frac{\Delta I_2}{\Delta t}$$

Jsou-li dvě cívky na společném jádru z feromagnetického materiálu, lze předpokládat, že vzniklý magnetický tok se bude uzavírat pouze v jádru, takže vzájemná indukčnost bude záviset pouze na vlastní indukčnosti jednotlivých cívek. Potom platí:

$$M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

Vzniknou-li rozptylové toky, je vzájemná indukčnost menší. Tedy:

$$M = \chi \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

Kde  $\chi$  je činitel vazby. Činitel vazby má velikost od 0 do 1. Je-li  $\chi = 1$ , je vazba těsná, pro  $\chi = 0$  je vazba volná.

### Řazení cívek

**Sériové řazení cívek** – u tohoto řazení mohou nastat tři případy:

1. Jsou-li dvě cívky s indukčnostmi  $L_1$  a  $L_2$  zařazeny do série tak, že magnetický tok vybuzený proudem jedné cívky nezasahuje druhou cívku je vzájemná indukčnost  $M = 0\text{H}$  a energie magnetického pole obou cívek je:

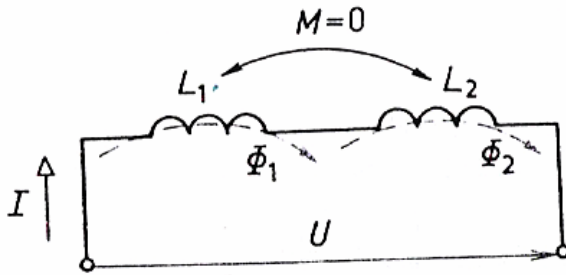
$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Kde výsledná indukčnost obou cívek je:

$$L = L_1 + L_2$$

Cívky se chovají jako jedna cívka s indukčností  $L$ . Je-li zařazeno do série několik cívek a není-li žádná dvojice cívek vázána vzájemnou indukčností, je výsledná indukčnost cívek:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$$



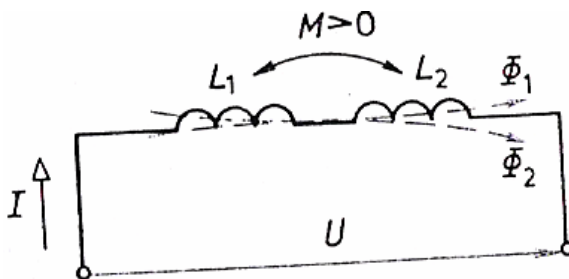
Dvě cívky zařazené do série, při vzájemném nepůsobení magnetických toků

2. Jsou-li dvě cívky s indukčnostmi  $L_1$  a  $L_2$  zařazené do série tak, že magnetické toky v obou cívkách mají stejný směr a vzájemně se protínají, je vzájemná indukčnost  $M > 0H$  a energie magnetického pole obou cívek je:

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Kde výsledná indukčnost obou cívek je:

$$L = L_1 + L_2 + 2M$$



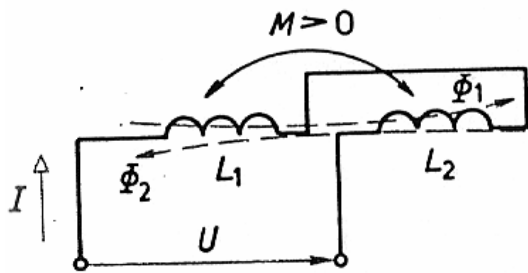
Dvě cívky zařazené do série, při působení magnetických toků ve stejném smyslu

3. Jsou-li dvě cívky s indukčnostmi  $L_1$  a  $L_2$  zařazené do série tak, že proud prochází ve druhé cívkce opačným směrem než v první cívkce, působí magnetické toky proti sobě. Zasahují-li toky cívky vzájemně, je vzájemná indukčnost  $M > 0H$  a energie magnetického pole obou cívek je:

$$W_m = L \cdot I^2$$

Kde výsledná indukčnost obou cívek je:

$$L = L_1 + L_2 - 2M$$



Dvě cívky zařazené do série, při působení magnetických toků proti sobě

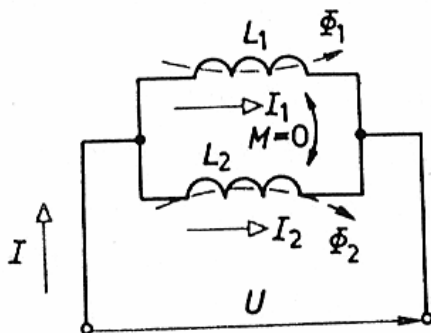
**Paralelní řazení cívek** – u tohoto řazení mohou rovněž nastat tři případy:

1. Jsou-li dvě cívky s indukčnostmi  $L_1$  a  $L_2$  zařazené paralelně tak, že magnetický tok vybuzený proudem jedné cívky nezasahuje druhou cívku je vzájemná indukčnost  $M = 0H$ . Výsledná indukčnost obou cívek je:

$$L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

Je-li paralelně řazeno několik cívek a není-li žádná dvojice cívek vázána vzájemnou indukčností je výsledná indukčnost cívek:

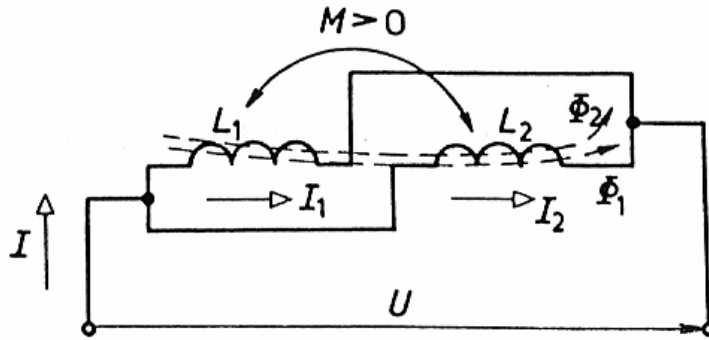
$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}$$



Dvě cívky zařazené paralelně, při vzájemném nepůsobení magnetických toků

2. Jsou-li dvě cívky s indukčnostmi  $L_1$  a  $L_2$  zařazené paralelně tak, že magnetické toky mají souhlasný směr a vzájemně se protínají, je vzájemná indukčnost  $M > 0H$ . Výsledná indukčnost obou cívek je:

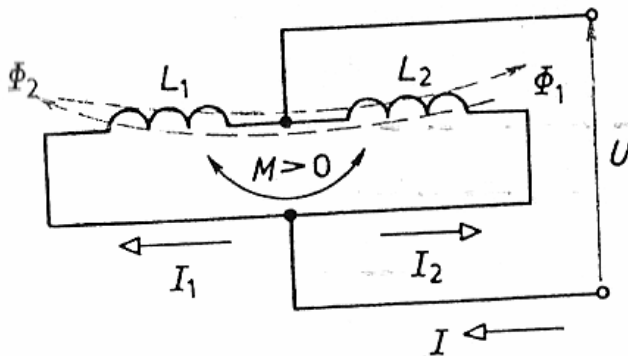
$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1 + M} + \frac{1}{L_2 + M}$$



Dvě cívky zařazené paralelně, při působení magnetických toků ve stejném smyslu

3. Jsou-li dvě cívky s indukčnostmi  $L_1$  a  $L_2$  zařazené paralelně tak, že magnetické toky působí proti sobě a obě cívky jsou jimi protínány, je vzájemná indukčnost  $M > 0H$ . Výsledná indukčnost obou cívek je:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1 - M} + \frac{1}{L_2 - M}$$

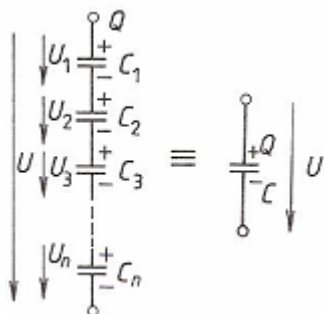


Dvě cívky zařazené paralelně, při působení magnetických toků proti sobě

## Sériové a paralelní řazení kondenzátorů

### Sériové řazení kondenzátorů

Při sériovém řazení kondenzátorů je na všech kondenzátorech stejně velký náboj  $Q$ . Na každém kondenzátoru vznikne určitý úbytek napětí  $U_1$  až  $U_n$ .



Sériové řazení kondenzátorů

Napětí na jednotlivých kondenzátorech se vypočte:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}$$

$$U_2 = \frac{Q}{C_2}$$

$$U_3 = \frac{Q}{C_3}$$

⋮

$$U_n = \frac{Q}{C_n}$$

Celkové napětí na všech kondenzátorech se vypočte:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$$

Celková kapacita se vypočte:

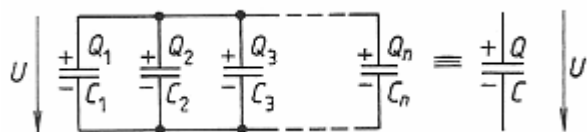
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Výsledná kapacita kondenzátorů spojených do série je vždy menší než kapacita kondenzátoru s nejmenší kapacitou. Při sériovém spojení kondenzátorů bude mít baterie kondenzátorů menší kapacitu, ale můžeme je připojit na vyšší na provozní napětí. Pro dva sériově spojené kondenzátory se v praxi pro výslednou kapacitu používá vztah:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

### Paralelní řazení kondenzátorů

Při paralelním řazení kondenzátorů je na všech kondenzátorech stejné napětí  $U$ . Každý kondenzátor má rozdílný náboj  $Q_1$  až  $Q_n$ .



Paralelní řazení kondenzátorů

Náboje na jednotlivých kondenzátorech se vypočtou:

$$Q_1 = C_1 \cdot U$$

$$Q_2 = C_2 \cdot U$$

$$Q_3 = C_3 \cdot U$$

⋮  
⋮

$$Q_n = C_n \cdot U$$

Celkový náboj se vypočte:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n$$

Celková kapacita se vypočte:

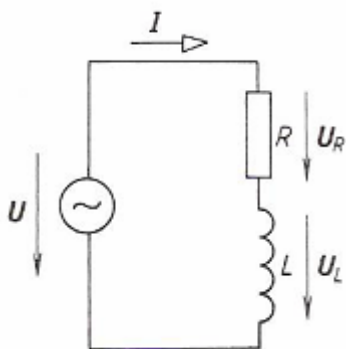
$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

Paralelním spojením kondenzátorů se zvětší kapacita při stejném provozním napětí. Zapojení můžeme připojit na takové napětí, které je menší než nejvyšší provozní napětí spojeného kondenzátoru.

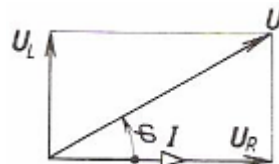
Při spojení sériově paralelním postupujeme při stanovení výsledné kapacity tak, že postupným zjednodušováním nahrazujeme sériová a paralelní spojení, až dostaneme výslednou kapacitu.

## Sériové řazení R, L, C

### **Sériové řazení R, L**



*Schéma zapojení sériového obvodu R, L*



*Fázorový diagram*

Oběma prvky prochází stejný proud I. Velikost napětí, podle Ohmova zákona, bude na ideálním rezistoru  $U_R = R \cdot I$ , které je ve fázi s proudem. Napětí na ideální cívce  $U_L = X_L \cdot I$  předbíhá proud o  $90^\circ$ .

V obvodech střídavého proudu, ve kterých jsou použity cívky a kondenzátory se používá pojem impedance, což je zdánlivý odpor. Impedance má charakter odporu. Značí se  $Z$  a udává se v ohmech ( $\Omega$ ).

Pro impedanci obvodu platí vztah:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Výsledné napětí tedy vypočteme:

$$U = Z \cdot I$$

Nebo:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$$

Proud tekoucí obvodem vypočteme:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

Převrácenou hodnotou impedance je admitance. Admitance je zdánlivá vodivost a má charakter vodivosti. Značí se  $Y$  a udává se v siemensech (S).

Admitanci vypočteme:

$$Y = \frac{1}{Z}$$

Fázový posun mezi výsledným napětím a proudem vypočteme:

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{Z}$$

$$\sin \varphi = \frac{U_L}{U} = \frac{X_L}{Z}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L}{U_R} = \frac{X_L}{R}$$

## Sériové řazení R, C

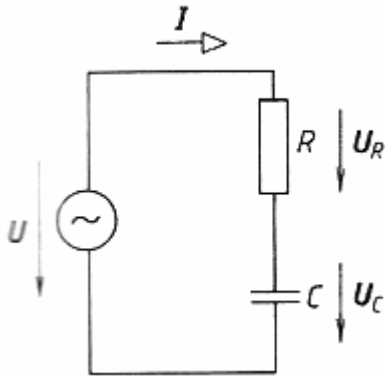
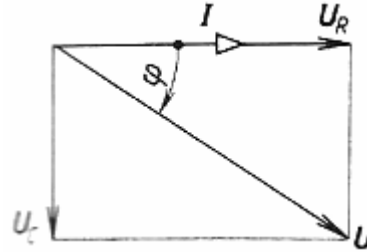


Schéma zapojení sériového obvodu R, L



Fázorový diagram

Oběma prvky prochází stejný proud  $I$ . Velikost napětí, podle Ohmova zákona, bude na ideálním rezistoru  $U_R = R \cdot I$ , které je ve fázi s proudem. Napětí na ideálním kondenzátoru  $U_C = X_C \cdot I$  se zpožďuje za proudem o  $90^\circ$ .

Pro impedanci obvodu platí vztah:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

Výsledné napětí tedy vypočteme:

$$U = Z \cdot I$$

Nebo:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$$

Proud tekoucí obvodem vypočteme:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

Admitanci vypočteme:

$$Y = \frac{1}{Z}$$

Fázový posun mezi výsledným napětím a proudem vypočteme:

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{Z}$$



$$\sin \varphi = \frac{U_C}{U} = \frac{X_C}{Z}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_C}{U_R} = \frac{X_C}{R}$$

### Sériové řazení L, C

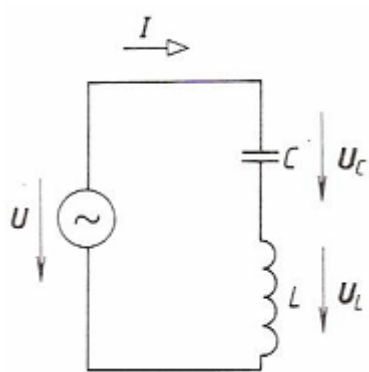
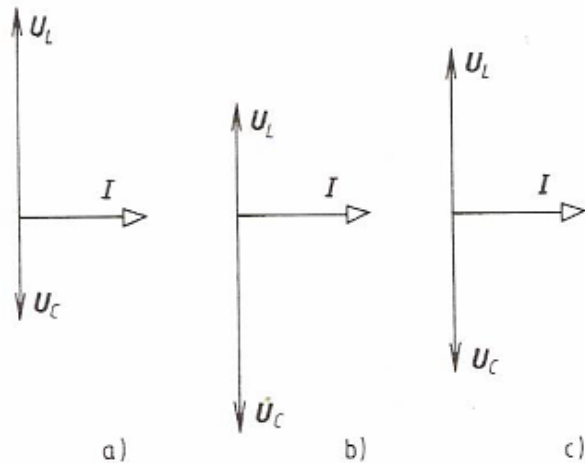


Schéma zapojení sériového obvodu L, C



Fázorové diagramy a) indukční charakter  
b) kapacitní charakter, c) rezonance

Oběma prvky prochází stejný proud I. Napětí na ideální cívce  $U_L = X_L I$  předbíhá proud o úhel  $90^\circ$ . Napětí na ideálním kondenzátoru  $U_C = X_C I$  je zpožděno za proudem o úhel  $90^\circ$ . Výsledné napětí tedy vypočteme:

$$U = U_L - U_C$$

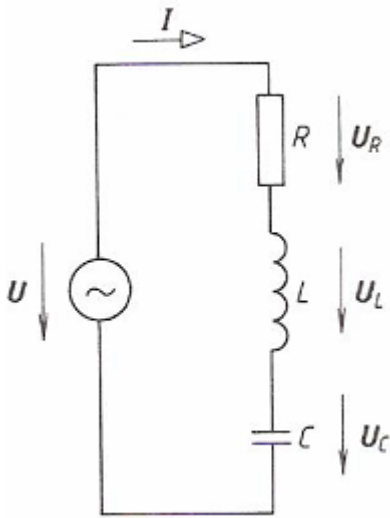
Impedanci obvodu vypočteme:

$$Z = X_L - X_C$$

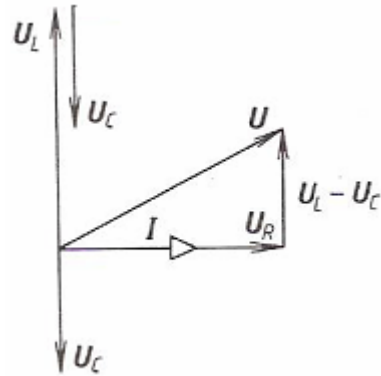
Z fázorového diagramu je patrné, že napětí na cívce a napětí na kondenzátoru jsou proti sobě. U tohoto zapojení mohou nastat tři případy:

1. Obvod má indukční charakter, ten nastane, když  $X_L > X_C$ .
2. Obvod má kapacitní charakter, ten nastane, když  $X_C > X_L$ .
3. Obvod je v rezonanci, pak platí  $X_L = X_C$ .

## Sériové řazení R, L, C



*Schéma zapojení sériového obvodu R, L, C*



*Fázorový diagram*

Všemi prvky prochází stejný proud  $I$ . Napětí na ideálním rezistoru  $U_R = R I$  je ve fázi s proudem. Napětí na ideální cívce  $U_L = X_L I$  a předbíhá proud o  $90^\circ$ . Napětí na ideálním kondenzátoru  $U_C = X_C I$  se zpožďuje za proudem o  $90^\circ$ .

Výsledná reaktance obvodu bude:

$$X = X_L - X_C$$

Impedanci obvodu vypočteme:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Výsledné napětí tedy vypočteme:

$$U = Z \cdot I$$

Nebo:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

Proud tekoucí obvodem vypočteme:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

Admitanci vypočteme:

$$Y = \frac{1}{Z}$$

Fázový posun mezi výsledným napětím a proudem vypočteme:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

$$\sin \varphi = \frac{X}{Z}$$

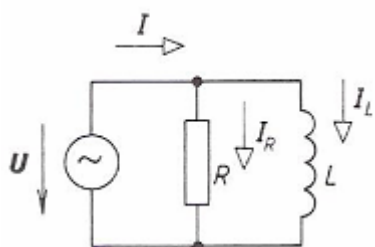
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}$$

V obvodu mohou nastat tři možné případy:

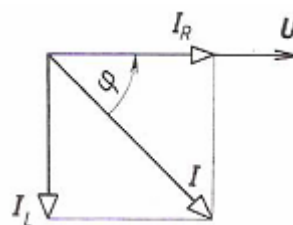
1.  $X_L > X_C$  – Obvod R, L, C bude mít indukční charakter. Rozdíl  $X_L - X_C = X$  bude kladný a proud v obvodu se bude zpožďovat za napětím o úhel  $\varphi$ . Obvod lze nahradit sériovým spojením ideálního rezistoru a ideální cívky.
2.  $X_C > X_L$  – Obvod R, L, C bude mít kapacitní charakter. Rozdíl  $X_L - X_C = X$  bude záporný a proud v obvodu bude předbíhat napětí o úhel  $\varphi$ . Obvod lze nahradit sériovým spojením ideálního rezistoru a ideální kondenzátoru.
3.  $X_L = X_C$  – při rovnosti kapacitní a indukční reaktance dochází k sériové rezonanci. Impedance obvodu se rovná odporu ideálního rezistoru.

## Paralelní řazení R, L, C

### **Paralelní řazení R, L**



*Schéma zapojení paralelního obvodu R, L*



*Fázorový diagram*

Na obou prvcích je stejné napětí U. Proud procházející ideálním rezistorem  $I_R = G \cdot U$  je ve fázi s napětím. Proud procházející ideální cívku  $I_L = B_L \cdot U$  se zpožďuje za napětím o  $90^\circ$ . Celkový proud vypočteme:

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$

Nebo:

$$I = U \cdot Y$$

Admitanci obvodu vypočteme:

$$Y = \sqrt{G^2 + B_L^2}$$

Impedanci obvodu vypočteme:

$$Z = \frac{1}{Y}$$

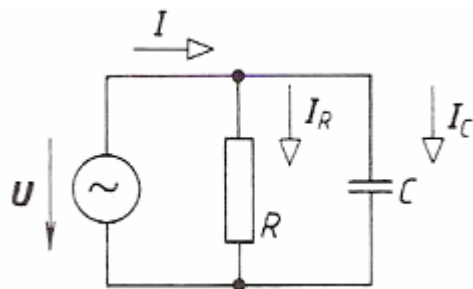
Fázový posun mezi výsledným proudem a napětím vypočteme:

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{G}{Y}$$

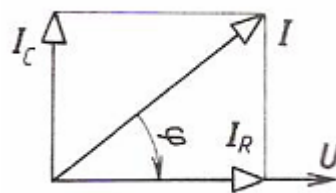
$$\sin \varphi = \frac{I_L}{I} = \frac{B_L}{Y}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_L}{I_R} = B_L \cdot R$$

### Paralelní řazení R, C



*Schéma zapojení paralelního obvodu R, C*



*Fázorový diagram*

Na obou prvcích je stejné napětí  $U$ . Proud procházející ideálním rezistorem  $I_R = G \cdot U$  je ve fázi s napětím. Proud procházející ideálním kondenzátorem  $I_C = B_C \cdot U$  předbíhá napětí o  $90^\circ$ .

Celkový proud vypočteme:

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$$

Nebo:

$$I = U \cdot Y$$

Admitanci obvodu vypočteme:

$$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2}$$

Impedanci obvodu vypočteme:

$$Z = \frac{1}{Y}$$

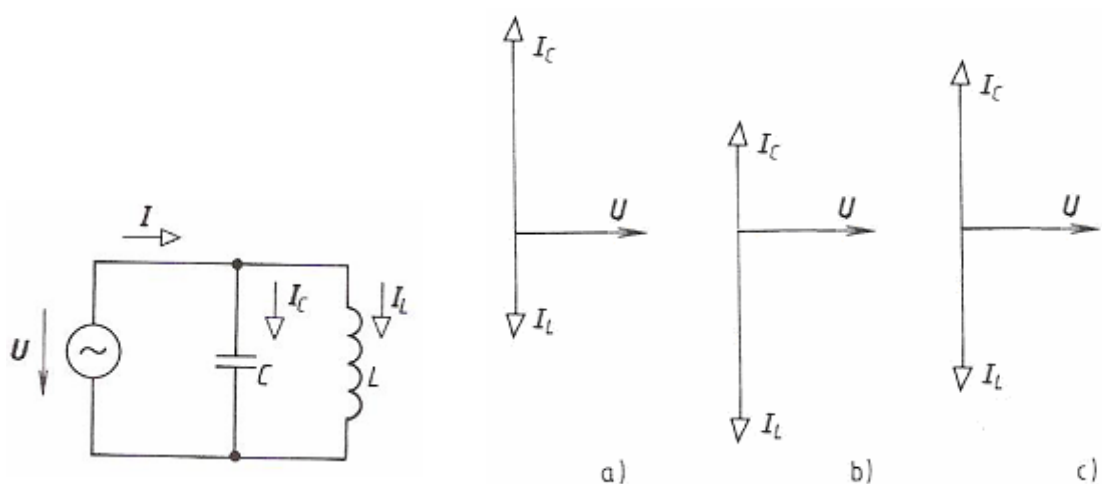
Fázový posun mezi výsledným proudem a napětím vypočteme:

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{G}{Y}$$

$$\sin \varphi = \frac{I_C}{I} = \frac{B_C}{Y}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_C}{I_R} = B_C \cdot R$$

### Paralelní řazení C, L



*Schéma zapojení sériového obvodu L, C*

*Fázorové diagramy a) kapacitní charakter, b) indukční charakter, c) rezonance*

Na obou prvcích je stejné napětí  $U$ . Proud procházející ideálním kondenzátorem  $I_C = B_C U$  předbíhá napětí o  $90^\circ$ . Proud procházející ideální cívkou  $I_L = B_L U$  se zpožďuje za napětím o  $90^\circ$ .

Celkový proud vypočteme:

$$I = I_C - I_L$$

Admitanci obvodu vypočteme:

$$Y = B_C - B_L$$

Z fázorového diagramu se patrné, že proud na kondenzátoru a proud na cívce jsou proti sobě.

U tohoto zapojení mohou nastat tři případy:

1. Obvod má kapacitní charakter, ten nastane, když  $B_C > B_L$ .
2. Obvod má indukční charakter, ten nastane, když  $B_L > B_C$ .
3. Obvod je v rezonanci, pak platí  $B_C = B_L$ .

### Paralelní řazení R, C, L

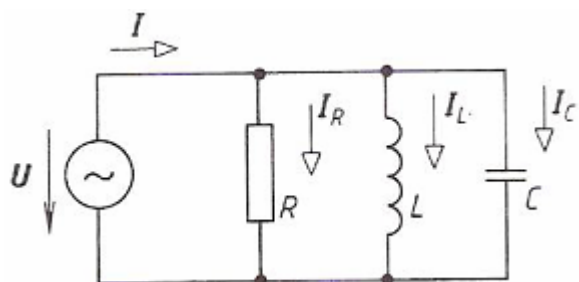
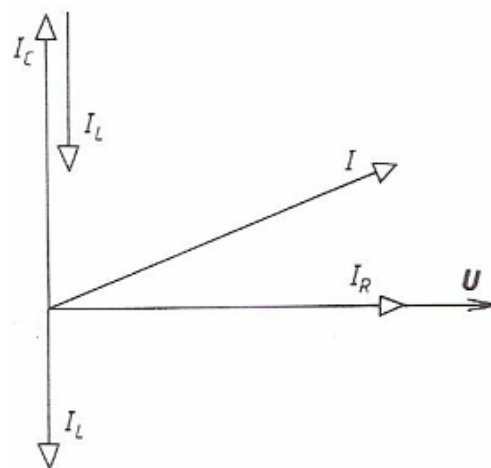


Schéma zapojení paralelního obvodu R, C, L



Fázorový diagram

Na všech prvcích je stejné napětí  $U$ . Proud procházející ideálním rezistorem  $I_R = G \cdot U$  je ve fázi s napětím. Proud procházející ideálním kondenzátorem  $I_C = B_C \cdot U$  předbíhá napětí o  $90^\circ$ . Proud procházející ideální cívku  $I_L = B_L \cdot U$  se zpožďuje za napětím o  $90^\circ$ . Výsledná susceptance obvodu bude:

$$B = B_C - B_L$$

Admitance obvodu vypočteme:

$$Y = \sqrt{G^2 - B^2}$$

Celkový proud vypočteme:

$$I = U \cdot Y$$

Nebo:

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}$$

Napětí vypočteme:

$$U = \frac{I}{Y} = \frac{I}{\sqrt{G^2 - B^2}}$$

Fázový posun mezi výsledným napětím a proudem vypočteme:

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{G}{Y}$$

$$\sin \varphi = \frac{I_C - I_L}{I} = \frac{B_C - B_L}{Y}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_C - I_L}{I_R} = \frac{B_C - B_L}{G}$$

V obvodu mohou nastat tři možné případy:

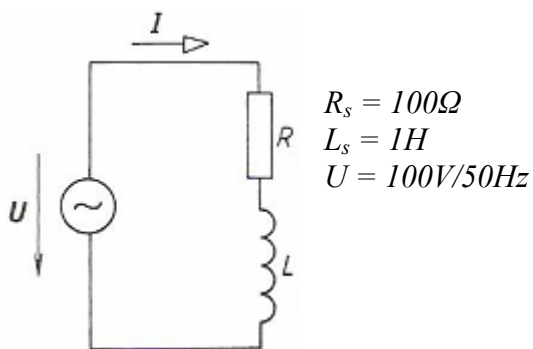
4.  $B_C > B_L$  – Obvod R, C, L bude mít kapacitní charakter. Rozdíl  $B_C - B_L = B$  bude kladný a výsledný proud v obvodu bude předbíhat napětí o úhel  $\varphi$ . Obvod lze nahradit paralelním spojením ideálního rezistoru a ideálního kondenzátoru.
5.  $B_L > B_C$  – Obvod R, C, L bude mít indukční charakter. Rozdíl  $B_L - B_C = B$  bude kladný a výsledný proud v obvodu se bude zpožďovat za napětím o úhel  $\varphi$ . Obvod lze nahradit paralelním spojením ideálního rezistoru a ideální cívky.
6.  $B_C = B_L$  – při rovnosti kapacitní a indukční susceptance dochází k paralelní rezonanci. Admitance obvodu se rovná vodivosti ideálního rezistoru.

## Duální obvody

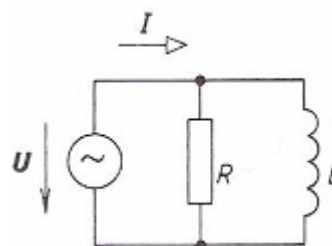
Duálními obvody rozumíme dva obvody, z nichž jeden je obvodem sériovým řazením R, L nebo R, C a druhý je paralelním řazením R, L nebo R, C. Tyto dva obvody mají při stejné frekvenci stejnou impedanci a stejný fázový posun. Zjednodušeně lze říci, že sériový obvod R, L nebo R, C lze přepočítat na paralelní obvod R, L nebo R, C, přičemž jsou tyto obvody rovnocenné. Přepočítat lze také paralelní obvod R, L nebo R, C na sériový obvod R, L nebo R, C.

### Názorný příklad přepočtu obvodu R, L:

Při přepočtu ze sériového obvodu R, L na paralelní obvod R, L budeme postupovat následujícím způsobem. Pro lepší názornost budeme přepočet provádět s konkrétními hodnotami .



*Sériový obvod R, L*



*Paralelní obvod R, L*

Nejdříve si musíme vypočítat kapacitní reaktanci:

$$X_{Ls} = 2\pi \cdot f \cdot L = 2\pi \cdot 50 \cdot 1 = 314,2\Omega$$

Potom vypočteme impedanci sériového obvodu:

$$Z = \sqrt{R_s^2 + X_{Ls}^2} = \sqrt{100^2 + 314,2^2} = 329,7\Omega$$

Následně vypočteme fázový posun, který bude stejný pro sériový i paralelní obvod:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{100}{329,7} = 0,30331 \Rightarrow \varphi = 72^\circ 20'$$

Potom vypočteme admitanci paralelního obvodu:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{329,7} = 3,033mS$$

Potom si ze vztahu pro výpočet fázového posunu paralelního zapojení R, L, který zní:

$$\cos \varphi = \frac{G_p}{Y}$$

Vyjádríme rovnici pro výpočet vodivosti rezistoru pro paralelním obvodu:

$$G_p = \cos \varphi \cdot Y = 0,30331 \cdot 3,033 \cdot 10^{-3} = 919,9\mu S$$

Rezistor v paralelním obvodu bude mít hodnotu:

$$R_p = \frac{1}{G_p} = \frac{1}{919,9 \cdot 10^{-6}} = 1087\Omega$$

Potom si vypočteme susceptanci cívky pro paralelní obvod:

$$B_{Lp} = \sqrt{Y^2 - G_p^2} = \sqrt{(3,033 \cdot 10^{-3})^2 - (919,9 \cdot 10^{-6})^2} = 2,89mS$$

Ze susceptance si vyjádříme reaktanci paralelní cívky:

$$X_{Lp} = \frac{1}{B_{Lp}} = \frac{1}{2,89 \cdot 10^{-3}} = 346\Omega$$



Cívka v paralelním obvodu bude mít hodnotu:

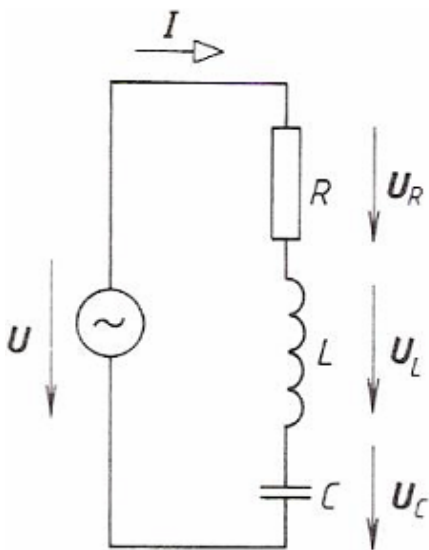
$$L_p = \frac{X_{Lp}}{2\pi \cdot f} = \frac{346}{2\pi \cdot 50} = 1,1H$$

Ze sériového zapojení rezistoru a cívky, ve kterém platilo:  $R_s = 100\Omega$  a  $L_s = 1H$  jsme dostali paralelní zapojení rezistoru a cívky, ve kterém platí:  $R_p = 1087\Omega$  a  $L_p = 1,1H$ .

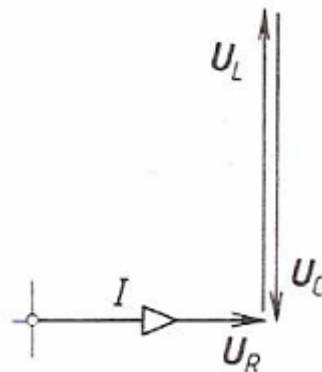
Při přepočtu ze sériového zapojení R, C na paralelní zapojení R, C je postup obdobný. Obdobným způsobem se posupuje při převodu z paralelního zapojení R, L nebo R, C na sériové zapojení R, L nebo R, C.

### Rezonance v sériovém obvodu

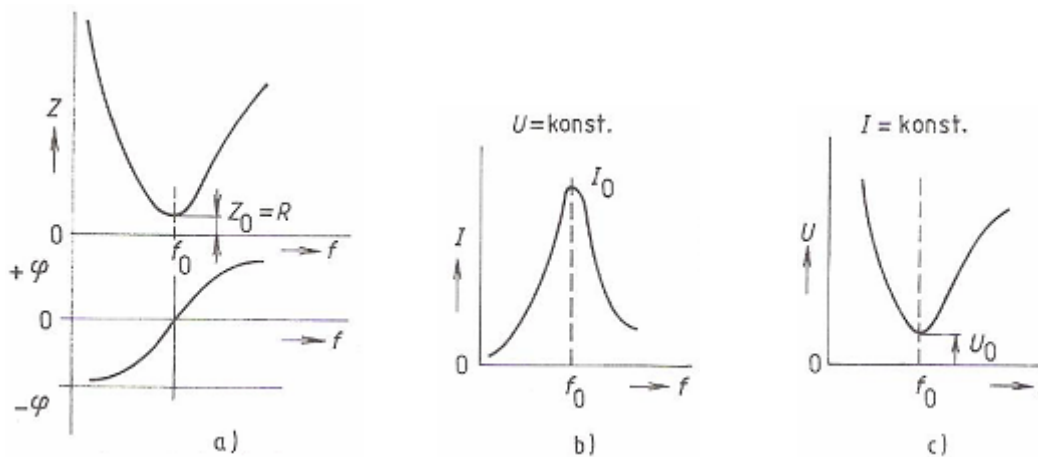
V praxi je tento obvod tvořen sériovým spojením skutečné cívky a skutečného kondenzátoru. Při stanovení vlastností budeme vycházet ze sériového spojení R, L, C. V praxi jsou ztráty ve skutečném kondenzátoru zanedbatelné, uplatňují se zejména ztráty skutečné cívky.



*Schéma sériového rezonančního obvodu*



*Fazorový diagram*



Rezonanční křivky sériového rezonančního obvodu a) závislost impedance a fázového posunu na frekvenci, b) závislost proudu na frekvenci, c) závislost napětí na frekvenci

Impedance obvodu je dána vztahem:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Je-li  $X = 0$ , pak jsou kapacitní a indukční reaktance stejně velké  $X_L = X_C$ . Tomuto stavu dojde při určité frekvenci, kterou nazýváme rezonanční frekvenci. Nastane zvláštní vztah vyjádřený fázorovým diagramem. Napětí  $U_L$  a  $U_C$  jsou stejně velká a jejich rozdíl je nulový. Účinky se navzájem ruší. Napětí na ideální cívce a ideálním kondenzátoru mohou mít nebezpečnou, několikrát větší hodnotu, než je napětí na svorkách obvodu. Pro sériovou rezonanci používáme taky výraz napěťová rezonance. Výsledné napětí obvodu se bude rovnat úbytku napětí na rezistoru  $R$  a bude s proudem ve fázi. Platí vztah:

$$U = R \cdot I$$

Při proudu rezonanční frekvence se bude obvod chovat jako činný odpor. Impedance při rezonanci je:

$$Z_0 = R$$

Obvodem prochází největší proud, a to :

$$I_0 = \frac{U}{R}$$

Z podmínky rezonance, kdy  $X_L = X_C$ , stanovíme rezonanční frekvenci. Bude dána vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (\text{Hz}; H, F)$$

Tento vztah se také nazývá Thomsonův vzorec. Rezonanční křivka znázorňuje závislost impedance  $Z$  rezonančního obvodu na frekvenci. Je-li frekvence rovná nule, je impedance obvodu nekonečně velká. S rostoucí frekvencí impedance obvodu klesá až do rezonance, kdy je nejmenší. Dále pak s rostoucí frekvencí opět vzrůstá. Úhel fázového posunu je rovněž závislý na frekvenci. Do rezonanční frekvence je úhel záporný, obvod má kapacitní charakter. Nad rezonanční frekvenci je úhel kladný, obvod má indukční charakter.

## Rezonance v paralelním obvodu

V praxi bývá obvykle tvořen paralelním spojením skutečné cívky a skutečného kondenzátoru. K paralelní rezonanci dochází, když se jalové složky proudu obou větví navzájem ruší. Tento stav nastává pro rezonanční frekvenci. Paralelní rezonanci říkáme také proudová rezonance. Obvod má při rezonanci charakter činného odporu. Při frekvenci nižší, než je frekvence rezonanční, je proud  $I_C$  menší než při rezonanci, proud  $I_{RL}$  je naopak větší, takže výsledný proud  $I$  je za napětím  $U$  zpožděn. Obvod má indukční charakter. Při frekvenci vyšší než je frekvence rezonanční, je proud  $I_C$  větší než při rezonanci. Impedance skutečné cívky se zvětšuje. Výsledný proud  $I$  předbíhá napětí  $U$ . Obvod má kapacitní charakter.

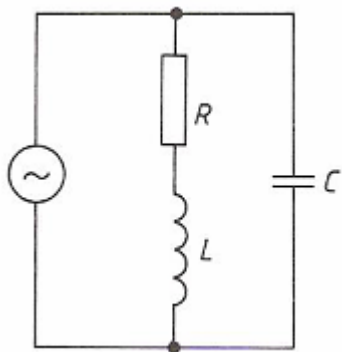
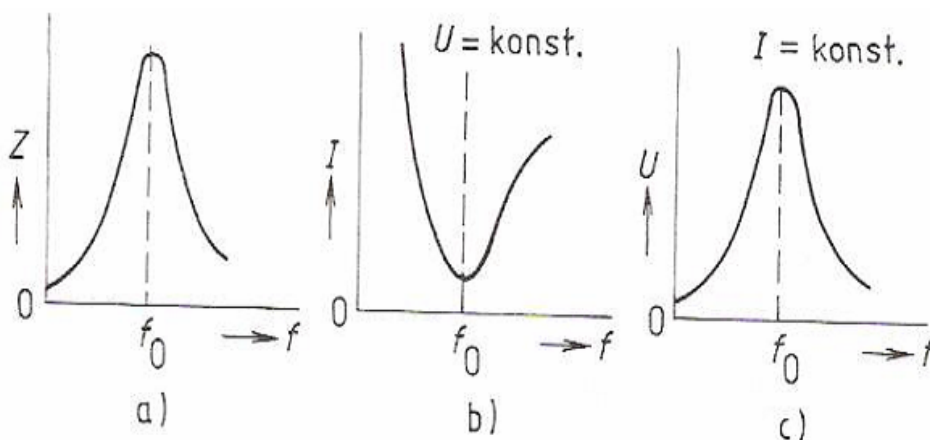
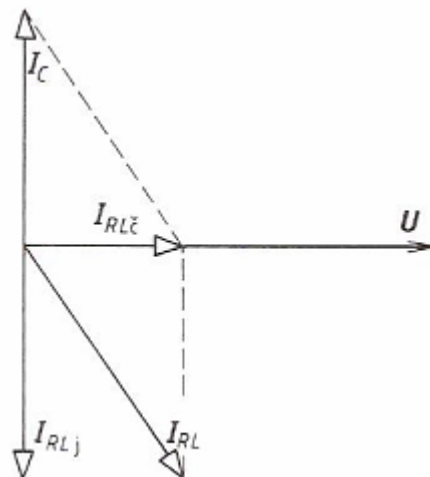


Schéma paralelního rezonančního obvodu  
Fázorový diagram



Rezonanční křivky sériového rezonančního obvodu a) závislost impedance na frekvenci, b) závislost proudu na frekvenci, c) závislost napětí na frekvenci

Rezonanční frekvence se vypočte:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \left(\frac{R}{L}\right)^2}$$

Při výpočtech v praxi obvykle zanedbáváme druhý člen  $(R/L)^2$  pod odmocninou neboť bývá proti prvnímu členu zanedbatelně malý. V praxi používáme pro výpočet rezonanční frekvence sériového a paralelního rezonančního obvodu stejný vztah, a to známý Thomsonův vzorec:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (\text{Hz}; H, F)$$

Impedance při rezonanci je:

$$Z_0 = \frac{L}{R \cdot C}$$

Paralelní rezonanční obvod má při rezonanci největší impedanci. Proud dodávaný zdrojem je nejmenší možný, který může obvodem procházet při napětí zdroje  $U$  a různých frekvencích. Rezonanční křivka znázorňuje závislost impedance, proudu a napětí na frekvenci. Při nulové frekvenci je impedance rovná činnému odporu skutečné cívky. S rostoucí frekvencí se zvětšuje a při rezonanční frekvenci je impedance největší. Dále pak s rostoucí frekvencí opět klesá. Při rezonanci má obvod největší impedanci, a proto obvodem prochází nejmenší proud. Napětí při rezonanci je maximální.

### Thomsonův vzorec

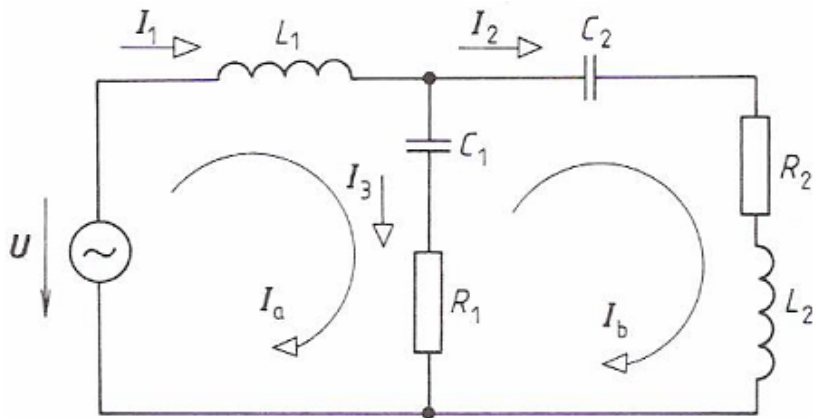
Thomsonův vzorec nám udává rezonanční kmitočet, který se používá u sériového a paralelního rezonančního obvodu. Tohoto vzorce se také využívá při stanovení oscilační frekvence u oscilátorů. Thomsonův vztah vypadá:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

### Řešení obvodů střídavého proudu

#### **Metoda smyčkových proudů**

Postup při řešení obvodů je obdobný jako s proudem stejnosměrným. V symbolicko-komplexní metodě jsou všechny veličiny komplexní čísla stejně jako smyčkové proudy.



Metoda smyčkových proudů

Pro smyčku se smyčkovým proudem  $\mathbf{I}_a$  platí:

$$j\omega \cdot L_1 \cdot \mathbf{I}_a + \left( R_1 - \frac{j}{\omega \cdot C_1} \right) \cdot (\mathbf{I}_a - \mathbf{I}_b) - \mathbf{U} = 0$$

Pro smyčku se smyčkovým proudem  $\mathbf{I}_b$  platí:

$$\left( R_2 - \frac{j}{\omega \cdot C_2} + j\omega \cdot L_2 \right) \cdot \mathbf{I}_b + \left( R_1 - \frac{j}{\omega \cdot C_1} \right) \cdot (\mathbf{I}_b - \mathbf{I}_a) = 0$$

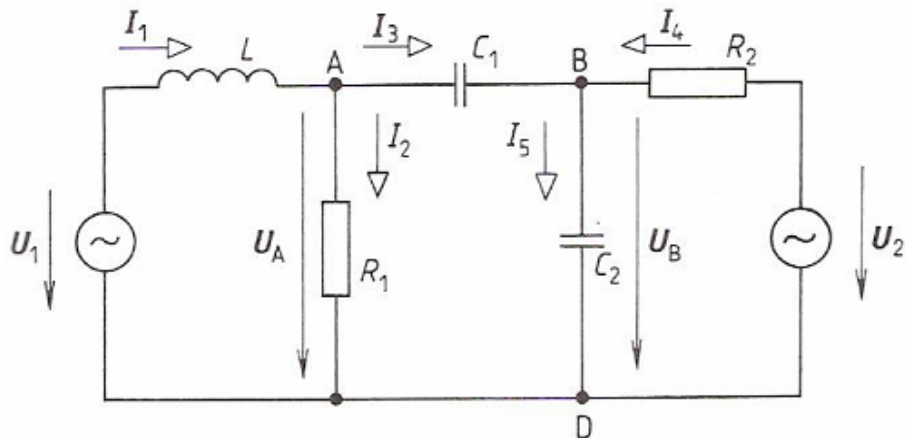
Obvodové rovnice upravíme a vypočteme smyčkové proudy  $\mathbf{I}_a$  a  $\mathbf{I}_b$ , které budou představovány komplexními čísly. Vypočet skutečných proudů stanovíme z proudů smyčkových a dostaneme:

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_a \quad \mathbf{I}_2 = \mathbf{I}_b \quad \mathbf{I}_3 = \mathbf{I}_a - \mathbf{I}_b$$

Absolutní hodnoty jednotlivých proudů určíme jako absolutní hodnotu příslušného komplexního čísla.

### Metoda uzlových napětí

Postup při řešení obvodů se střídavým proudem je obdobný jako s proudem stejnosměrným. Všechny veličiny jsou komplexní čísla, stejně jako uzlová napětí. Neznámými jsou napětí mezi nezávislými uzly a referenčním uzlem. Referenční uzel volíme tam, kde se stýká největší počet obvodových prvků. Je-li takových možností víc, pak zvolíme za referenční uzel jeden pól zdroje napětí, neboť druhý má již známé svorkové napětí.



### Metoda uzlových napětí

V obrázku jsme zvolili jako referenční uzel D. Pro tento obvod lze psát dále uvedené rovnice. Pro uzel A:

$$\begin{aligned}
 -\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_3 &= 0 \\
 -(\mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_A) \cdot (-jB_L) + \mathbf{U}_A \cdot G_1 + (\mathbf{U}_A - \mathbf{U}_B) \cdot jB_{C_1} &= 0
 \end{aligned}$$

Pro uzel B:

$$\begin{aligned}
 -\mathbf{I}_3 - \mathbf{I}_4 + \mathbf{I}_5 &= 0 \\
 -(\mathbf{U}_A - \mathbf{U}_B) \cdot jB_{C_1} - (\mathbf{U}_2 - \mathbf{U}_B) \cdot (-jB_L) \cdot G_2 + \mathbf{U}_B \cdot jB_{C_2} &= 0
 \end{aligned}$$

Z uvedených rovnic vypočteme uzlová napětí  $\mathbf{U}_A$  a  $\mathbf{U}_B$ .

Proudy procházející jednotlivými prvky vypočteme pomocí uzlových napětí:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{I}_1 &= (\mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_A) \cdot (-jB_L) \\
 \mathbf{I}_2 &= \mathbf{U}_A \cdot G_1 \\
 \mathbf{I}_3 &= (\mathbf{U}_A - \mathbf{U}_B) \cdot jB_{C_1} \\
 \mathbf{I}_4 &= (\mathbf{U}_2 - \mathbf{U}_B) \cdot G_2 \\
 \mathbf{I}_5 &= \mathbf{U}_B \cdot jB_{C_2}
 \end{aligned}$$

Napětí na jednotlivých prvcích obvodu je:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U}_L &= \mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_A \\
 \mathbf{U}_{R_1} &= \mathbf{U}_A \\
 \mathbf{U}_{C_1} &= \mathbf{U}_A - \mathbf{U}_B \\
 \mathbf{U}_{C_2} &= \mathbf{U}_B \\
 \mathbf{U}_{R_2} &= \mathbf{U}_2 - \mathbf{U}_B
 \end{aligned}$$

Skutečnou velikost proudu nebo napětí stanovíme jako absolutní hodnotu příslušného komplexního čísla.

## Elektrická práce a výkon střídavého proudu, složky výkonu střídavého proudu

Okamžitý výkon v obvodu střídavého proudu je dán součinem okamžitých hodnot napětí a proudu:

$$p = u \cdot i$$

V obvodech střídavého proudu můžeme rozeznat tři druhy výkonů:

1. **Výkon činný** – tento výkon je závislý na úhlu fázového posunu mezi proudem a napětím. Značíme ho  $P$ , udává se ve wattech (W). Vypočteme ho:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (W; V, A)$$

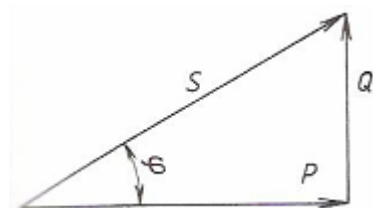
Činný výkon měříme wattmetrem.

2. **Výkon jalový** – tento výkon je rovněž závislý na fázovém posunu mezi proudem a napětím. Značíme ho  $Q$ , udává se v voltampérech reaktančních (var). Vypočteme ho:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (\text{var}; V, A)$$

3. **Výkon zdánlivý** – tento výkon je velmi důležitý. Dimenzují se podle něj elektrické stroje a elektrovedné sítě. Určuje se podle něj skutečný proud. Zdánlivý výkon se počítá z údajů voltmetru a ampérmetru, tedy z efektivních hodnot proudu a napětí. Značí se  $S$ , jeho jednotkou je voltampér (VA). Vypočteme jej:

$$S = U \cdot I \quad (\text{VA}; V, A)$$



Trojúhelník výkonů

Z trojúhelníku proudů vyplývá, že výkony mají mezi sebou určité vztahy. Zdánlivý výkon se tedy dá vypočítat:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

### **Práce střídavého proudu**

Elektrickou práci může konat pouze činný výkon. Elektrickou práci střídavého proudu tedy určíme násobíme-li činný výkon časem. Dostaneme tedy vztah:

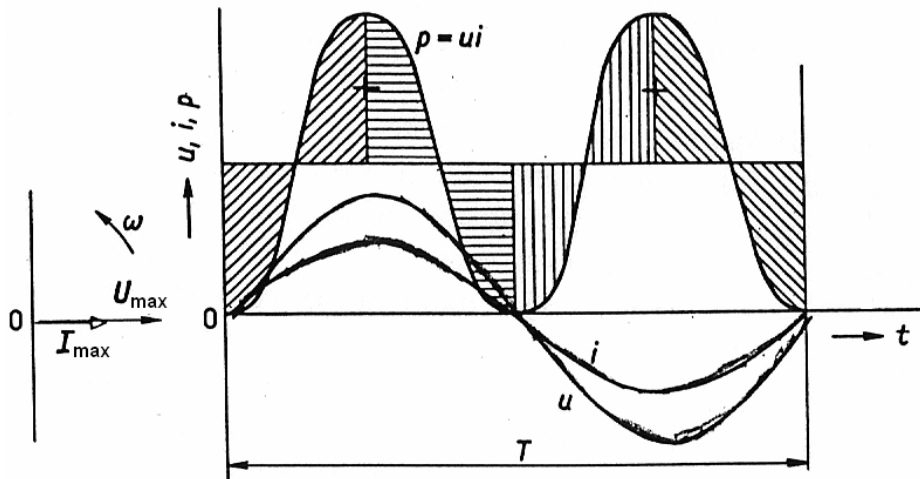
$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot (\cos \varphi) \cdot t$$

Elektrickou práci měříme elektroměrem. Jednotkou elektrické práce je joule (J), ale častěji se udává v jednotce watt sekunda (W's), nebo v některé z jeho vyšších násobků (např. kWh). Přitom platí, že  $1\text{J} = 1\text{ W's}$ .

### Fázový posun proudu a napětí, účinník

**Fázový posun mezi proudem a napětím** můžeme rozdělit do čtyř kategorií:

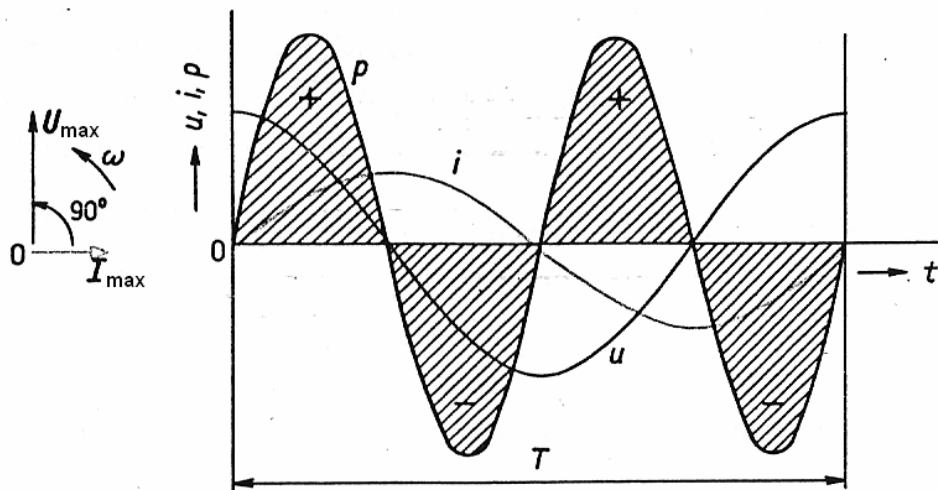
1. **Napětí a proud jsou ve fázi** – při této variantě je okamžitý výkon v kladné i záporné polovině periody kladný. Křivka výkonu je sinusoida, ale její osa leží nad osou času a má dvojnásobný kmitočet. Sinusoida nemá záporné hodnoty, neboť v polovině periody, kdy okamžité hodnoty proudu a napětí mají záporné hodnoty, a proto je jejich součin kladný. Obsah plochy omezené osou času a sinusoidou výkonu znamená práci střídavého proudu za periodu při proměnném výkonu.



*Proud a napětí ve fázi*

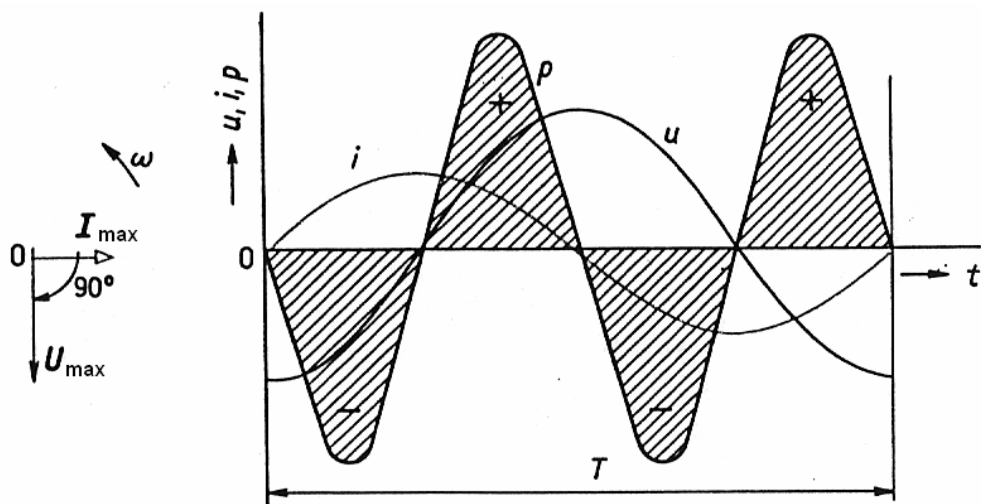
2. **Napětí předbíhá proud o  $90^\circ$**  - okamžitý výkon má v jedné čtvrtině periody hodnotu kladnou a v následující čtvrtině hodnotu zápornou. Střední hodnota práce za celou periodu je nulová.





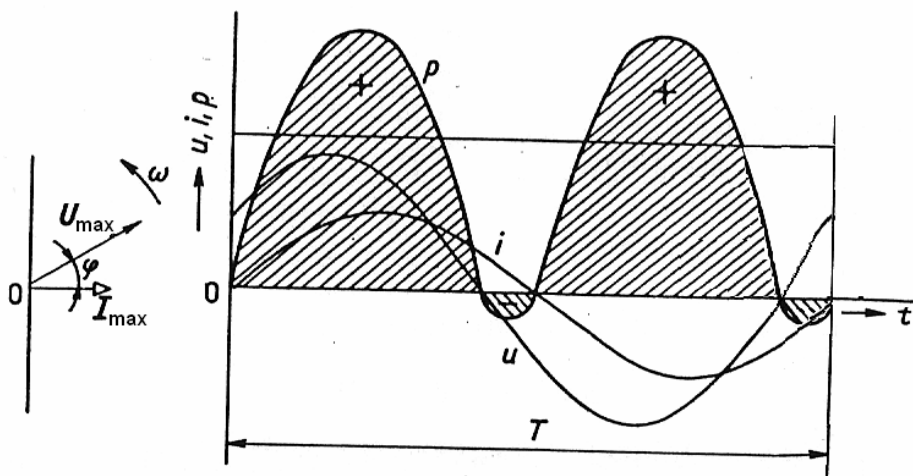
Napětí předbíhá proud o  $90^\circ$

3. **Napětí je zpožděno za proudem o  $90^\circ$**  - střední hodnota práce střídavého proudu je nulová.



Napětí je zpožděno za proudem o  $90^\circ$

4. **Napětí předbíhá proud o úhel  $\varphi$**



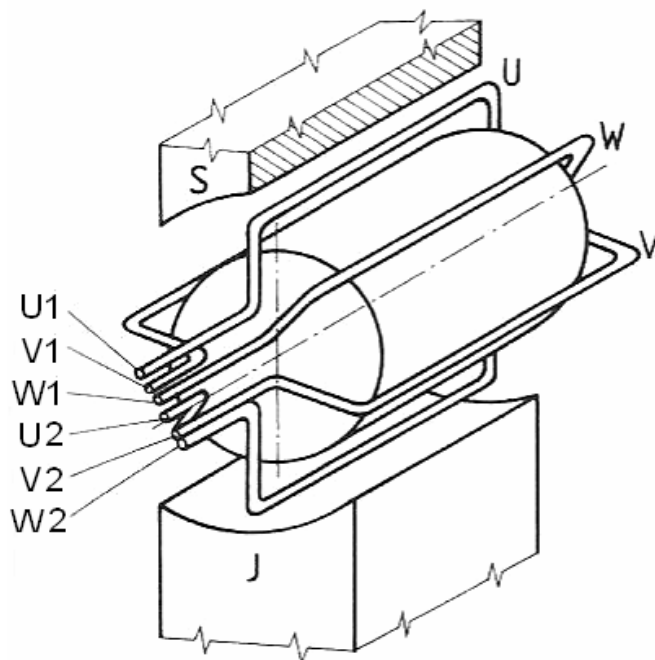
Napětí předbíhá proud o úhel  $\varphi$

**Účinník** - určuje fázový posun mezi napětím a proudem. Vypočteme jej:

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{P}{S}$$

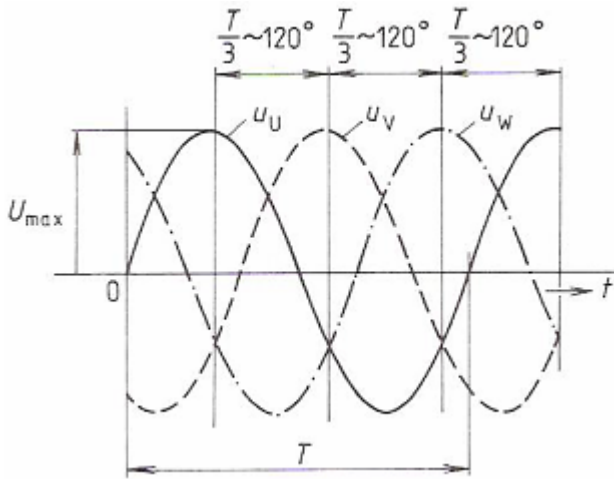
### Vznik trojfázového napětí

Trojfázové napětí se vyrábí v alternátoru. Stroj má soustavu tří cívek vzájemně pootočených o 120°. Každé vinutí, jež se nazývá fázé, může samostatně dodávat elektrický proud. Zdroje takové soustavy dodávají současně několik stejně velkých napětí, která mají stejnou frekvenci a liší se jen vzájemným fázovým posunem. Použití trojfázové soustavy je pro přenos elektrické energie a využití elektrických strojů hospodárnější. Nehybná část alternátoru se nazývá stator a pohyblivá část rotor.

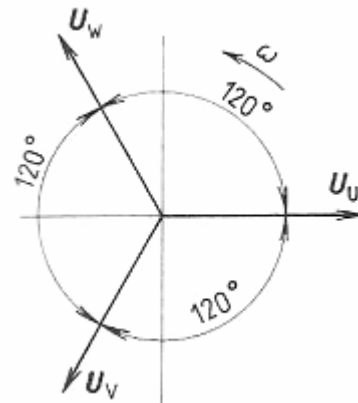


*Vznik trojfázového napětí*

Rotor se otáčí v magnetickém poli vyvolané státorem, jehož prostorové rozložení podél obvodu je sinusové. Na rotoru jsou vinutí tří fází, které se označují U, V, W. Konce vinutí jednotlivých cívek jsou označeny U1, U2, V1, V2, W1, W2. Jednotlivá vinutí jsou vyvedená na kroužky, na něž dosedají kartáče. Při otáčení rotoru se indukují v jednotlivých cívkách – fázích napětí. Napětí na fázových vinutích budou mít stejnou frekvenci a stejnou amplitudu. Cívky všech tří fází jsou navzájem natočeny o 120°, a fázový posun mezi napětími je proto stejný a je 120°.



Časový průběh trojfázového napětí



Fázorový diagram

Pro indukovaná napětí v jednotlivých cívkách lze napsat rovnice pro okamžité hodnoty:

$$u_U = U_{\max} \cdot \sin \omega \cdot t$$

$$u_V = U_{\max} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_W = U_{\max} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Součet okamžitých hodnot všech tří fází je v každém okamžiku nula. Platí tedy vztah:

$$u_U + u_V + u_W = 0$$

## Spojení trojfázového spotřebiče do trojúhelníku a do hvězdy

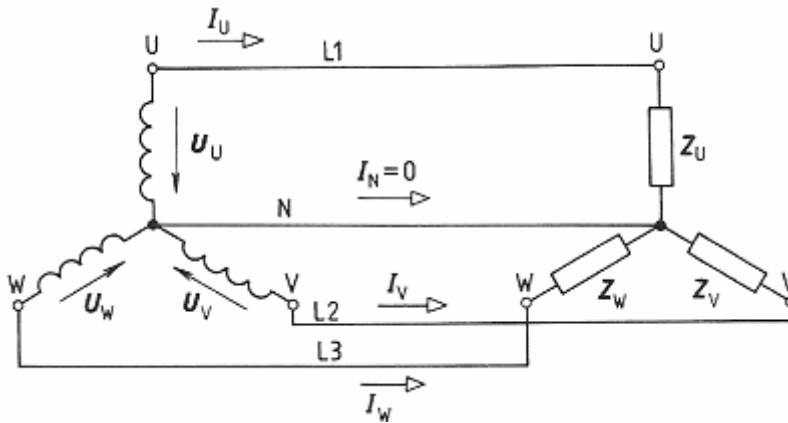
### **Spojení trojfázového spotřebiče do hvězdy**

Jsou-li spotřebiče a alternátor spojeny do hvězdy, je možný buď čtyřvodičový rozvod, je-li vyveden střední vodič, nebo trojvodičový rozvod středního vodiče.

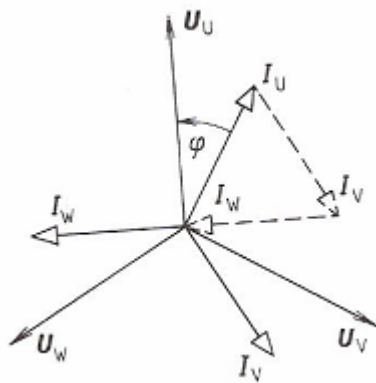
Při zapojování spotřebičů do hvězdy rozeznáváme dva druhy zatížení:

#### **1. Souměrné zatížení**

Proud ve vedení se rovná fázovému proudu ve fázích alternátoru i spotřebiče. Směr fázových proudů pokládáme za kladný ve směru od alternátoru ke spotřebiči. Proud ve středním vodiči má kladný směr od spotřebiče k alternátoru. V souměrně zatížené trojfázové soustavě je maximální hodnota všech fázových napětí na spotřebičích stejná a fázory napětí a proudů svírají úhel 120°.



*Souměrné zatížení alternátoru v zapojení do hvězdy*



*Fázorový diagram při souměrném zatížení*

Pro fázové proudy tedy platí:

$$\mathbf{I}_U + \mathbf{I}_V + \mathbf{I}_W = 0$$

Každou fází spotřebiče prochází stejně velký fázový proud:

$$\mathbf{I}_f = \mathbf{I}_U = \mathbf{I}_V = \mathbf{I}_W$$

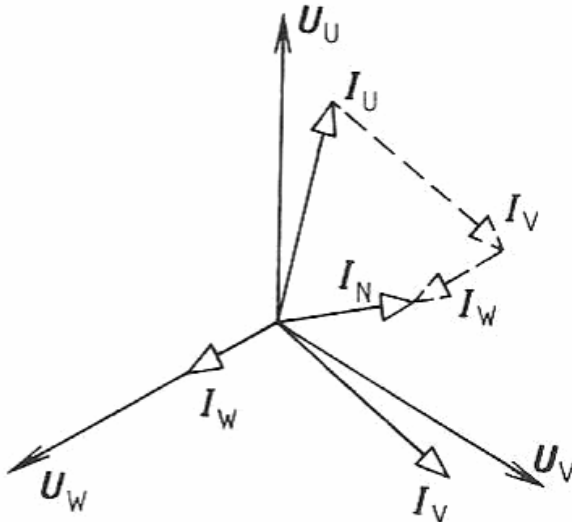
Fázový proud také prochází vodiči sítě. Spotřebiči připojenými k jednotlivým fázím prochází proud, který stanovíme z Ohmova zákona:

$$\mathbf{I}_U = \frac{\mathbf{U}_U}{\mathbf{Z}_U} \quad \mathbf{I}_V = \frac{\mathbf{U}_V}{\mathbf{Z}_V} \quad \mathbf{I}_W = \frac{\mathbf{U}_W}{\mathbf{Z}_W}$$

To znamená, že středním vodičem neprochází žádný proud  $I_N = 0$ , a střední vodič je zde zbytečný. Trojfázový spotřebič nemusí být spojen s alternátorem středním vodičem. Střední vodič neovlivňuje stav elektrického obvodu. Dostáváme tak trojvodičovou rozvodnou soustavu. V praxi je to velice častý případ zatížení a vzniká zejména připojením elektromotorů. Pro případ porušení souměrnosti spotřebičů se v rozvodných sítích používá čtyřvodičový rozvod. Trojvodičová soustava se používá pouze u dálkových přenosů vysokým a velmi vysokým napětím.

## 2. Nesouměrné zatížení

Nesouměrné zatížení sítě je způsobeno připojením několika různých jednofázových spotřebičů. Obytné domy jsou připojeny na čtařvodičové vedení. Jednotlivé byty jsou však připojeny jen na jednu fázi. Nejčastěji dochází k tomu, že souměrný zdroj je zatěžován nesouměrně, neboť je velice obtížné předem odhadnout, jak budou obyvatelé zatěžovat jednotlivé fáze spotřebiči.



*Fázorový diagram při nesouměrném zatížení*

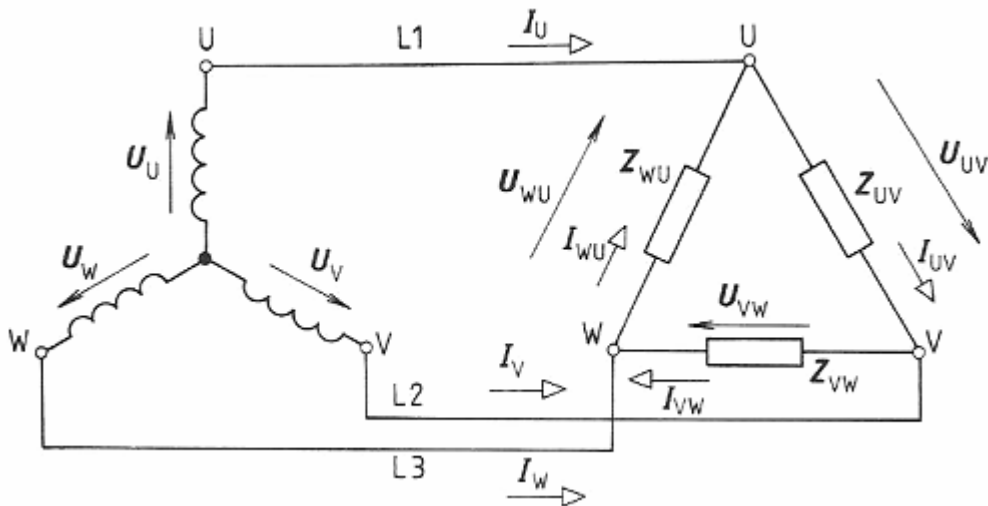
Součet fázorů proudu jednotlivých fází určuje fázor proudu ve středním vodiči. Platí:

$$\mathbf{I}_U + \mathbf{I}_V + \mathbf{I}_W = \mathbf{I}_N$$

Při nesouměrném zatížení prochází středním vodičem proud  $I_N$ . Proud v nulovacím vodiči je vždy menší než proudy ve fázových vodičích. V sítích nízkého napětí se proto nesmí střední vodič přerušit a nesmí se do něho vřazovat ani vypínače, ani pojistky.

### **Spojení trojfázového spotřebiče do trojúhelníku**

Na zapojení alternátoru, zda do hvězdy nebo trojúhelníka, nezáleží. Při zapojení do hvězdy a známých fázových napětích snadno stanovíme sdružená napětí. Kladný směr proudu se shoduje s kladným směrem fázových napětí.



Zatížení alternátoru v zapojení do trojúhelníka

Proudy v jednotlivých impedancích jsou:

$$\mathbf{I}_{UV} = \frac{\mathbf{U}_{UV}}{\mathbf{Z}_{UV}} \quad \mathbf{I}_{VW} = \frac{\mathbf{U}_{VW}}{\mathbf{Z}_{VW}} \quad \mathbf{I}_{WU} = \frac{\mathbf{U}_{WU}}{\mathbf{Z}_{WU}}$$

Síťové proudy jsou:

$$\mathbf{I}_{UV} = \mathbf{I}_U - \mathbf{I}_V \quad \mathbf{I}_{VW} = \mathbf{I}_V - \mathbf{I}_W \quad \mathbf{I}_{WU} = \mathbf{I}_W - \mathbf{I}_U$$

Uvedené vztahy platí obecně. Nezáleží tady na tom, zda jsou napětí alternátoru nebo spotřebiče souměrná nebo nesouměrná. Připojíme-li na souměrný alternátor souměrný spotřebič, bude soustava fázových a síťových proudů souměrná. Při řešení obvodu stačí stanovit obvodové veličiny pro jednu fázi. Při nesouměrném zatížení různými jednofázovými spotřebiči spojenými do trojúhelníka jsou proudy v jednotlivých fázích různé a jejich fázory nesvírají úhel 120°. Trojfázové spotřebiče nebo jednotlivé jednofázové spotřebiče lze bez ohledu na zapojení fází alternátoru zapojovat do hvězdy nebo do trojúhelníka.

## Práce a výkon v třífázovém obvodu

### **Výkon trojfázového proudu**

Výkon v trojfázové soustavě je dán součtem jednotlivých fází:

$$P = P_U + P_V + P_W$$

Činný výkon v jedné fázi je např.  $P_U = U_f I_f \cos \varphi$ .

Úhel  $\varphi$  je fázový posun mezi fázovým napětím  $U_f$  a fázovým proudem  $I_f$ . Při souměrném zatížení trojfázové soustavy je tedy činný výkon:

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

Zpravidla počítáme výkon v trojfázové soustavě pomocí sdružených napětí a proudů. Tímto způsobem vyjde pro činný výkon vztah:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (W, V, A)$$

Nezáleží při tom, jestli jsou vinutí zapojena do trojúhelníku nebo do hvězdy. Pro jalový výkon trojfázové soustavy platí vztah:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (\text{var}, V, A)$$

Pro zdánlivý výkon trojfázové soustavy platí vztah:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (VA, V, A)$$

### **Práce trojfázového proudu**

Když vyjdeme z toho, že práce je dána výkonem za určitý čas, dostaneme vztahy:

Pro činnou práci:

$$A = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot t \cdot \cos \varphi$$

Pro jalovou práci:

$$A_j = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot t \cdot \sin \varphi$$

Pro zdánlivou práci:

$$A_z = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot t$$

## **Přechodové jevy ve stejnosměrných obvodech**

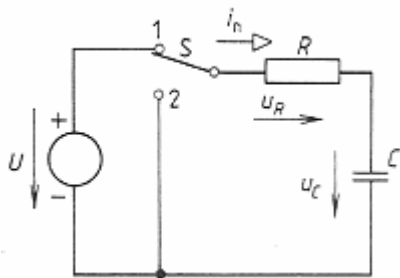
### Přechodový jev při zapínání a vypínání obvodu R, C

U obvodu R, C lze přechodný jev charakterizovat časovým intervalem, který trvá od okamžiku připojení zdroje stejnosměrného napětí až do okamžiku, kdy je kondenzátor nabitý. Při odpojení zdroje se do obvodu dodává energie akumulována v elektrickém poli ideálního kondenzátoru. Přechodný jev trvá tak dlouho, než se akumulovaná elektrická energie spotřebuje na energii tepelnou v rezistoru.

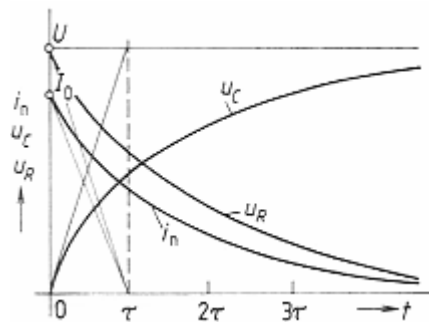
### **Nabíjení ideálního kondenzátoru**

V obvodu je ideální rezistor v sérii s ideálním kondenzátorem. Po připojení zdroje stejnosměrného napětí spínačem S do polohy 1 začne obvodem procházet nabíjecí proud  $i_n$ :

$$i_n = \frac{U - u_C}{R}$$



Obvod přechodového jevu R, C



Průběhy napětí a proudu v obvodu při nabíjení kondenzátoru

Za předpokladu, že kondenzátor není nabitý ( $u_C = 0$ ) obvodem prochází největší možný nabíjecí proud  $I_0$ . Platí vztah:

$$I_0 = \frac{U}{R}$$

Z rovnice je zřejmé, že nabíjecí proud je tím menší, čím větší je napětí na ideálním kondenzátoru. Napětí na ideálním kondenzátoru bude:

$$u_C = U - R \cdot i_n$$

Blíží-li se napětí na ideálním kondenzátoru  $u_C$  k napětí zdroje  $U$ , nabíjecí proud  $i_n$  se blíží nule. Pokud nabíjecí proud řešíme jako rovnici času, dostaneme:

$$i_n = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Kde  $\tau$  je časová konstanta, která se vypočte:

$$\tau = R \cdot C$$

Její jednotkou je sekunda (s).

Kdyby napětí na kondenzátoru narůstalo lineárně nabil by se ideální kondenzátor na dobu  $t = \tau$ . Napětí na ideálním rezistoru bude:

$$u_R = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Napětí na ideálním kondenzátoru bude:

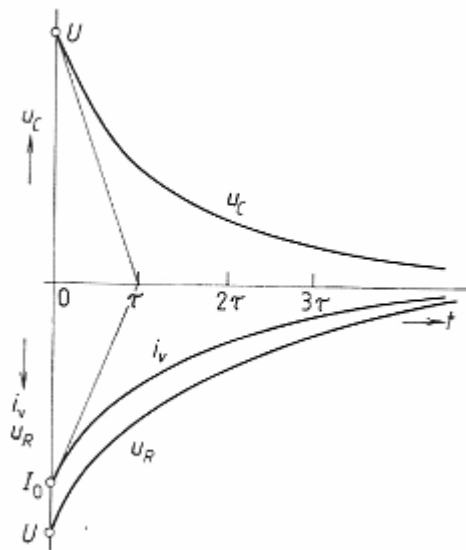


$$u_c = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Nabíjení ideálního kondenzátoru trvá teoreticky nekonečně dlouho, avšak již za dobu  $t = 3\tau$  dosáhne napětí na něm hodnoty 95% napětí zdroje a vybíjecí proud klesne přibližně na hodnotu 5% z  $I_0$ .

### Vybíjení ideálního kondenzátoru

Přepneme-li spínač S do polohy 2, působí nabitý ideální kondenzátor jako zdroj elektrické energie, která se mění v ideálním rezistoru na energii tepelnou.



*Průběhy napětí a proudu v obvodu při vybíjení kondenzátoru*

Vybíjení ideálního kondenzátoru trvá teoreticky nekonečně dlouhou dobu, ale v praxi považujeme za dobu  $3\tau$  ideální kondenzátor prakticky za vybitý, obvodem prochází proud 5% z proudu maximálního. Kdyby napětí na kondenzátoru klesalo lineárně, vybil by se za dobu  $\tau$ . Řešením vybíjecího proudu jako funkci času, dostaneme vztah:

$$i_v = -I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Vybíjecí proud má opačný smysl vzhledem k nabíjecímu proudu. Napětí na ideálním rezistoru:

$$u_R = -U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Napětí na ideálním kondenzátoru:

$$u_c = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

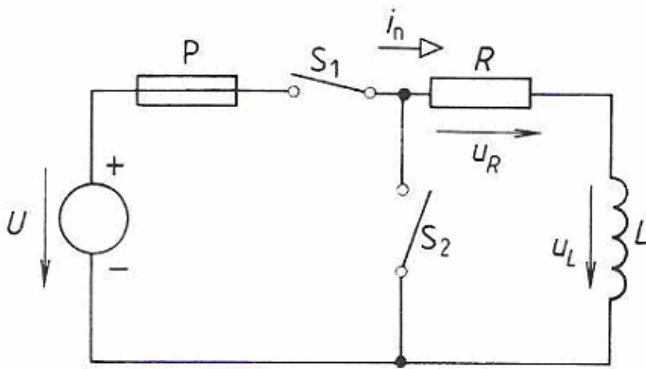
## Přechodový jev při zapínání a vypínání obvodu R, L

U obvodu R, L je časový interval od okamžiku připojení zdroje stejnosměrného napětí až do stavu, kdy obvodem prochází ustálený proud. Při odpojení zdroje se do obvodu dodává energie akumulovaná v magnetickém poli ideální cívky. Přechodný jev trvá tak dlouho, než se akumulovaná elektrická energie spotřebuje na energii tepelnou v rezistoru.

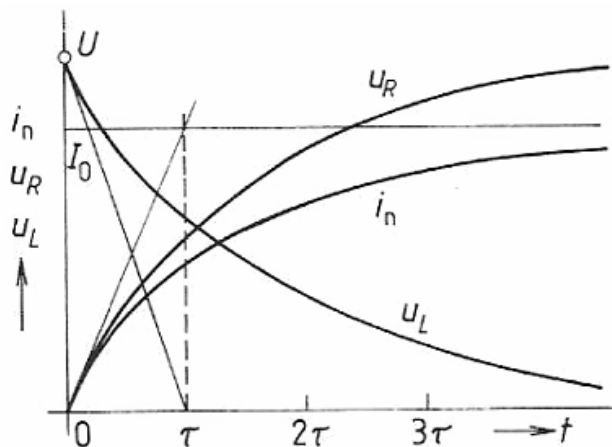
### **Vznik ustáleného proudu**

Spínačem  $S_1$  připojíme ke zdroji stejnosměrného napětí sériové spojení ideálního rezistoru a ideální cívky. Na ideální cívce se bude indukovat podle Lencova principu napětí:

$$u_L = L \cdot \frac{\Delta i_n}{\Delta t}$$



*Obvod přechodového jevu R, L*



*Průběhy napětí a proudu v obvodu při vzniku ustáleného proudu*

Toto napětí bude stejně velké jako je napětí zdroje  $U$ . Na ideálním rezistoru je napětí rovno nule. V magnetickém poli ideální cívky není žádná energie. Obvodem začne procházet proud, který vytváří magnetické pole. Magnetické pole se zvětšuje a to má za následek, že v ideální cívce se indukují napětí. Proud procházející obvodem začne narůstat a ustálí se teprve tehdy, když časový přírůstek proudu v ideální cívce se rovna nule. V čase  $t$  po připojení zdroje napětí prochází obvodem proud:

$$i_n = \frac{U - u_L}{R}$$

Pokud nabíjecí proud řešíme jako rovnici času dostaneme:

$$i_n = I_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Kde časovou konstantu vypočteme vztahem:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Časová konstanta vyjadřuje dobu, za kterou by proud dosáhl hodnoty ustáleného proudu  $I_0$ , kdyby vzrůstal lineárně. Při konstantním proudu by za dobu  $t = \tau$  bylo na ideální cívce napětí  $u_L = 0$ . Napětí na ideálním rezistoru je dáno vztahem:

$$u_R = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Napětí na ideální cívce je dáno vztahem:

$$u_L = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

### **Zánik ustáleného proudu**

Proud budeme sledovat po vyřazení zdroje napětí. Zdroj vyřadíme tím, že jej spojíme nakrátko spínačem  $S_2$  při zapnutém spínači  $S_1$ . Dojde k přerušení tavné pojistky  $P$  zkratovým proudem. Zdroj napětí se vyřadí, aniž dojde k přerušení proudu v obvodu. Velikost indukovaného napětí závisí na proudu, který rozpojujeme, a na odporu, který zapojujeme. V okamžiku sepnutí spínače  $S_2$  se v ideální cívce indukuje napětí opačné polarity, která se bude snažit, podle Lencova principu, zpomalit zánik magnetického pole. Ssměr proudu je proto stejný jako při spojení spínače  $S_1$ . Energie magnetického pole ideální cívky se bude měnit v ideálním rezistoru na energie tepelnou (Joulovo teplo).

Řešením vybíjecího proudu jako funkci času, dostaneme vztah:

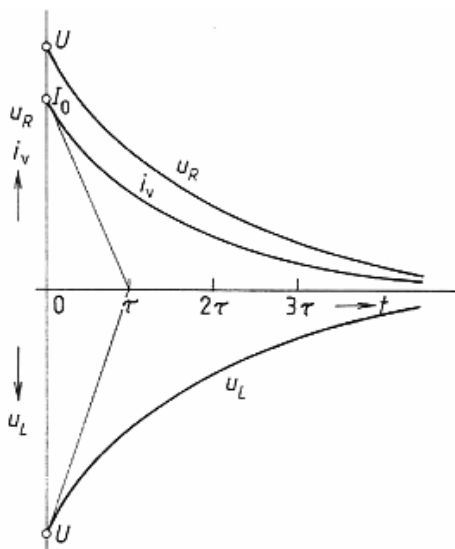
$$i_v = -I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Kde  $I_0$  je proud, který prochází obvodem v okamžiku zániku napětí zdroje. Napětí na ideálním rezistoru je dáno vztahem:

$$u_R = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Napětí na ideální cívce je dáno vztahem:

$$u_L = -U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$



*Průběhy napětí a proudu v obvodu při zániku ustáleného proudu*

## Elektrotechnické kreslení

### Normalizace v elektrotechnice

Normalizace je usměrnění lidské činnosti z hlediska hospodárnosti, materiálu, jakosti a vyměnitelnosti výrobku podle určitých zásad.

**Normalizované formáty výkresů** – vhodnou velikost výkresu je třeba volit jednak podle velikosti a složitosti zařízení nebo částí, které mají být nakresleny. Pro elektrotechnické výkresy a ostatní technickou dokumentaci jsou určeny formáty řady A (A0, A1, A2, A3, A4, výjimečně A5).

**Normalizované druhy čar** – srozumitelnost zobrazování na elektrotechnických výkresech si vyžaduje používat čáry různých druhů a tloušťek. Tloušťky čar se musí volit z normalizované řady, odstupňované přibližně v geometrické řadě v souladu s tloušťkou technického písma. Tloušťky čar jsou: 0,18; 0,25; 0,35; 0,5; 0,7; 1,4; 2mm.

## Rozdělení elektrotechnických schémat

Elektrotechnická schémata jsou základním podkladem grafické dokumentace. Pomocí značek se na nich znázorňují elektrické funkční části zařízení a spojení mezi nimi.

*Elektrotechnická schémata se rozdělují podle účelu, na který jsou určena, na čtyři skupiny:*

1. Schémata celkové informace o zařízení
  - 1.1. Přehledová schémata – znázorňují hlavní části zařízení, jejich účel a vzájemné spojení.
  - 1.2. Funkční schémata – objasňují určité pochody, které probíhají v jednotlivých funkčních částech zařízení, případně v celém zařízení.
2. Schémata vyznačující skladbu zařízení
  - 2.1. Obvodové schéma – objasňuje všechny funkční jednotky a spoje mezi nimi a dává podrobnou představu o činnosti zařízení.
  - 2.2. Náhradní schéma – používá se na rozbor funkce, výpočet parametrů a charakteristických funkčních částí, případně celého zařízení.
3. Schémata elektrických spojení
  - 3.1. Zapojovací schéma vnitřních spojů – znázorňuje elektrické zapojení částí zařízení a určuje vodiče, svazky vodičů a kabelů, kterými se tato zapojení uskutečňují a také místa jejich připojení a přechodů.
  - 3.2. Zapojovací schéma vnějších spojů – znázorňují části celku a elektrické zapojení mezi nimi.
  - 3.3. Svorkovnicové schéma – znázorňuje vnější připojovací body a na ně připojené vodiče.
4. Schémata rozmístění funkčních jednotek
  - 4.1. Situační schéma – rozděljuje rozmístění jednotlivých částí zařízení, případně jejich elektrických spojů.
  - 4.2. Situační schéma rozvodu – zobrazuje rozmístění jednotlivých částí zařízení v budovách, na konstrukcích a případně jejich elektrické zapojení.
  - 4.3. Situační schéma sítě – zobrazuje prostorové rozmístění částí zařízení, případně jejich elektrické zapojení.

## Zásady kreslení v elektrotechnice

Značky a čáry spojů se mají rozmísťovat na kreslicím listu tak, aby co nejlépe podaly představu o uspořádání výrobku a o vzájemných vztazích jeho částí. Čáry spojů se skládají z horizontálních a vertikálních úseků, mají mít co nejmenší počet zlomů a křížení. Velikost mezery mezi dvěma čarami nemá být menší než 2 mm. Při větším počtu rovnoběžných čar je vhodné vynechat po třech čarách dvojnásobnou mezeru. Elektrotechnická schémata se mohou kreslit do rastru. Schéma se umísťuje na kreslicím listu v jeho základní poloze, může být otočené oproti základní poloze o 90°. Na schématu se může ohraničit určité zařízení nebo funkční část. Příslušné úseky schématu se oddělují tenkou čerchovanou čarou. Na popis elektrotechnických schémat se musí používat technické písmo. Textové údaje se píšou rovnoběžně, výjimečně je povoleno psát údaje také svislé. Pro rozlišování je dovoleno na jednom schématu psát různou velikostí písma.

## Kreslení schématických značek

Schématické značky jsou symbolické znaky, které znázorňují elektrické součástky, nebo zařízení. Nedávají přehled o konstrukci a mechanických nebo elektrických rozměrech. Proto stačí jedna značka pro všechny konstrukční tvary a obměny stejné části, bez ohledu na typ, napětí, výkon nebo velikost. Schématické značky můžeme kreslit libovolně velké, neboť to nemá vliv na její význam. Jediné co je předepsané, a co se musí dodržovat, jsou poměry mezi jednotlivými částmi značky, úhly mezi některými částmi.

## Kreslení blokových značek

Blokové značky znázorňují elektrickou část, jednotku nebo soubor. Nejčastěji se zobrazují čtvercovými nebo obdélníkovými políčky, do kterých se slovy nebo značkou wpisuje charakteristická vlastnost zobrazované části.

## Zásady pro sestavování a čtení schémat v elektrotechnice

Elektrotechnická schémata sestavujeme tak, aby byla co nejpřehlednější. Nepoužíváme zbytečně moc čar a uzlů, snažíme se aby schéma bylo co nejjednodušší a dalo se v něm dobře orientovat. Schémata sestavujeme zleva doprava. Při sestavování elektrotechnických schémat je pro lepší orientaci si výkres rozdělit na orientační pole. Při čtení elektrotechnických schémat nám mohou posloužit orientační pole. Elektrotechnická schémata se čtou stejným způsobem jako byly sestavena tedy zleva doprava.

## **Elektrotechnické předpisy**

### Elektrizační zákon

Dnem 1.1.1995 vstupuje v platnost nový energetický zákon č. 222/1994 Sb, který nahrazuje řadu dosud platných právních předpisů v oblasti energetiky, mimo jiné i dosud platný elektrizační zákon. Tento nový energetický zákon upravuje podmínky podnikání v elektroenergetice, plynárenství a teplárenství, stanovuje práva a povinnosti fyzických nebo právnických osob s tím spojené a vymezuje výkon státní správy na úseku elektroenergetiky, plynárenství a teplárenství. Nový zákon stanovuje podmínky, za kterých je možno, aby fyzické nebo právnické osoby podnikaly v energetických odvětvích. Za předmět podnikání se tímto zákonem považuje výroba elektřiny, plynu nebo tepla a rozvod elektřiny, plynu nebo tepla fyzickým nebo právnickým osobám, zajišťované ve veřejném zájmu. Podnikat v energetických odvětvích mohou fyzické nebo právnické osoby pouze na základě státní autorizace udělené Ministerstvem průmyslu a obchodu. Autorizace se uděluje na dobu určitou.

## Připojování elektrických odběrových zařízení

Odběrným elektrickým zařízením se rozumí zařízení u konečného zákazníka sloužící pro konečnou spotřebu elektřiny připojené k přenosové soustavě nebo distribuční soustavě, a to přímo, elektrickou přípojkou nebo prostřednictvím domovní instalace. Elektrická přípojka je část vedení, které odbočuje od rozvodného zařízení ke spotřebiteli. Elektrickou přípojkou se přivede elektrická energie do domovní pojistkové skříně, nebo do domovní kabelové skříně, a následně se přivede na měřicí zařízení. Z měřicího zařízení se přes hlavní a vedlejší jističe přivádí ke konkrétním odběrovým zařízením.

## Vyhláška č. 50/1978 Sb

Vyhláška stanovuje stupně odborné způsobilosti pracovníků, kteří se zabývají činností na elektrických zařízeních, projektováním elektrických zařízení, řízením činnosti nebo projektováním na elektrických zařízeních v organizacích, které vyrábějí, montují, provozují nebo projektují elektrická zařízení, nebo provádějí na elektrických zařízeních činnost dodavatelským způsobem. Dále stanoví podmínky pro získání kvalifikace a povinnosti organizací a pracovníků v souvislosti s kvalifikací. Za elektrická zařízení se pro účely této vyhlášky považují zařízení, u nichž může dojít k ohrožení života, zdraví nebo majetku elektrickým proudem, a zařízení k ochraně před účinky atmosférické nebo statické elektřiny. Pracovníci vykonávající činnosti na elektrických zařízeních musí být tělesně a duševně způsobilí a musí splňovat podmínky stanovené touto vyhláškou.

### Přehled kvalifikačních stupňů:

1. Pracovníci bez odborného elektrotechnického vzdělání
  - 1.1. Pracovníci seznámení – §3
  - 1.2. Pracovníci poučení – §4
2. Pracovníci s odborným elektrotechnickým vzděláním
  - 2.1. Pracovníci znalí – §5
  - 2.2. Pracovníci znalí s vyšší kvalifikací
    - 2.2.1. Pro samostatnou činnost – §6
    - 2.2.2. Pro řízení činnosti – §7
    - 2.2.3. Pro řízení činnosti dodavatelským způsobem – §8a
    - 2.2.4. Pro řízení provozu – §8b
    - 2.2.5. Pro provádění revizí – §9
    - 2.2.6. Pracovníci pro samostatní projektování – §10
    - 2.2.7. Pracovníci pro řízení projektování – §10
3. Pracovníci s kvalifikací ve zvláštních případech – §11

## Ochrana před nebezpečným dotykem

### **1. Ochrana před nebezpečným dotykem živých a neživých částí**

- 1.1. Ochrana malým napětím SELV a PELV
- 1.2. Ochrana omezením ustáleného proudu a náboje – tato ochrana se týká hlavně obvodů sdělovací techniky, které přestože pracují s různým napětím, frekvencí či náboji, nejsou schopny při dotyku způsobit úraz elektřinou.
- 1.3. Obvod FELV – pokud je z funkčních důvodů použito malé napětí kategorie I, ale nejsou splněny podmínky pro ochranu SELV či PELV nebo pokud obvod obsahuje

předměty – transformátory, stykače apod. jejichž izolace není dostatečná vzhledem k obvodům vyššího napětí, pak se jedná o obvod FELV.

## **2. Ochrana před nebezpečným dotykem živých částí**

- 2.1. Ochrana polohou – ochrana polohou spočívá v umístění živých částí mimo dosah k zabránění nahodilého dotyku živých částí.
- 2.2. Ochrana zábranou – zábrany jsou určeny k tomu, aby zabránily nahodilému dotyku živých částí.
- 2.3. Ochrana kryty nebo přepážkami – kryty nebo přepážky zabraňují jakémukoliv dotyku živých částí a jsou součástí elektrického zařízení.
- 2.4. Ochrana izolací – živé části musí být pokryty izolací, kterou lze odstranit pouze jejím zničením. Musí odolávat mechanickým, chemickým, elektrickým či tepelným námahám, kterým je během provozu vystaveno.
- 2.5. Ochrana doplňkovou izolací – tato ochrana spočívá ve vybavení elektrického zařízení izolačním stanovištěm nebo v použití ochranných pracovních pomůcek.
- 2.6. Doplňková ochrana proudovým chráničem – jedná se o ochranu která zlepšuje jiná opatření proti úrazu elektrickým proudem při normálním provozu a působí např. v případě selhání nebo poškození jiné ochrany.

## **3. Ochrana před nebezpečným dotykem neživých částí**

- 3.1. Ochrana samočinným odpojením od zdroje – původně se pod tímto termínem skrývaly ochrany nulováním, zemněním, ale také proudovým či napěťovým chráničem. I když mnohé podmínky ochrany jsou stejné, některé požadavky jsou podle nových kritérií přísnější.
- 3.2. Ochrana použitím zařízení s dvojitou nebo zesílenou izolací – ochrana spočívá v doplnění základní izolace další izolací tak, aby bylo zabráněno výskytu nebezpečného napětí na přístupných částech zařízení při porušení základní izolace.
- 3.3. Ochrana elektrickým oddělením – jedná se v podstatě o ochranu oddělením obvodu, jejíž podstata spočívá ve vytvoření dokonalého izolačně oddělného proudového obvodu od obvodů rozvodné soustavy.
- 3.4. Ochrana nevodivým okolím – jedná se o ochranu, která spočívá v zabránění současného dotyku částí, které mohou mít při porušení základní izolace živých částí různý potenciál.
- 3.5. Ochrana neuzemněných místním pospojováním – podstatou této ochrany je zabránit výskytu nebezpečného dotykového napětí.

## Obsluha a práce na elektrických zařízeních

Elektrická zařízení mají specifické požadavky na zajištění bezpečnosti provozu a to jak z hlediska konstrukce a vývoje, tak při zhotovení a uvedení do provozu a dále při údržbě, opravách, práci na zařízení a revizích. Z tohoto vyplývají základní právní předpisy. Pro práci na elektrickém zařízení je třeba odborné způsobilosti. Ta je stanovena vyhláškou č. 50/1978 Sb. Jednou z podmínek bezpečnosti práce je v tomto směru ČSN 34 3100 a nyní nově ČSN EN 50 110, kde jsou obsažena základní ustanovení pro obsluhu a práci na elektrických zařízeních.

## Revize elektrických zařízení

Každé elektrické zařízení musí být před uvedením do provozu prohlédnuto a vyzkoušeno v rámci výchozí revize. Účelem revize je ověřit, zda jsou splněny dále uvedené podmínky a požadavky k zajištění bezpečnosti zařízení.



Revize obsahuje:

1. Prohlídku
2. Zkoušení
3. Měření

Pracovníci pro provádění revizí elektrických zařízení jsou pracovníci znalí s vyšší kvalifikací, kteří mají ukončené odborné vzdělání elektrotechnického směru, předepsanou minimální praxi a složili zkoušku u ITI.