

Základy elektrotechniky I

152

SNTL

Učebnice vysvětluje základní pojmy, vlastnosti a vztahy z oblasti stejnosměrného proudu, elektrostatiky, elektrochemie, magnetismu a střídavého proudu.

Je určena žákům 1. ročníků elektrotechnických učebních a studijních oborů středních odborných učilišť.

Lektoři prvního vydání: Ing. Hubert Meluzin
PaedDr. Ota Malinovský

Redakce elektrotechnické literatury
Hlavní redaktor Ing. Josef Řiha
Odpovědný redaktor Ing. Rostislav Zeman

© Ing. Ladislav Voženílek, PhDr. Miloš Řešátko. 1984

Tabulka 1. Základní jednotky SI

Veličina	Značka veličiny	Jednotka	Značka jednotky
délka	$l, a, b \dots$	metr	m
hmotnost	m	kilogram	kg
čas	t	sekunda	s
teplota	$\theta (T)$	kelvin	K
	$\vartheta (t)$	Celsiův stupeň	°C
elektrický proud	I	ampér	A
svítivost	I	kandela	cd
látkové množství	n	mol	mol

Tabulka 2. Doplňkové jednotky

Veličina	Značka veličiny	Jednotka	Značka jednotky
rovinný úhel	$\alpha, \beta, \gamma \dots$	radián	rad
prostorový úhel	ω	steradián	sr

Tabulka 3. Předpony jednotek

tera	T	10^{12}	mili	m	10^{-3}
giga	G	10^9	mikro	μ	10^{-6}
mega	M	10^6	nano	n	10^{-9}
kilo	k*	10^3	piko	p	10^{-12}

* Na součástkách se používá velké písmeno.

VIDEO

Obsah

PŘEDMLUVA	9
1. ÚVOD	13
1.1. Význam, vývoj a úkoly elektrotechniky	13
2. ZÁKLADNÍ POJMY	16
2.1. Fyzikální veličiny a jejich jednotky	16
2.2. Mezinárodní soustava jednotek	16
2.3. Stavba látek	18
2.4. Rozdělení látek podle elektrické vodivosti	20
2.5. Elektrický náboj	22
2.6. Otázky a cvičení	25
3. STEJNOSMĚRNÝ PROUD	27
3.1. Jednoduchý elektrický obvod	28
3.2. Zdroje stejnosměrného napětí	32
3.2.1. Galvanické články	32
3.2.2. Akumulátory	36
3.2.3. Palivové články	36
3.3. Otázky a cvičení	37
3.4. Elektrický odpor	38
3.4.1. Výpočet odporu	38
3.4.2. Rezistory	41
3.5. Vodivost	42
3.6. Závislost odporu vodiče na teplotě	44
3.7. Elektrický proud ve vodiči	46
3.8. Otázky a cvičení	49
3.9. Ohmův zákon	51
3.10. Úbytek napětí ve vodiči	53
3.11. Účinky elektrického proudu na lidský organismus	55
3.12. Otázky a cvičení	58
3.13. Elektrická práce, elektrický výkon	59
3.13.1. Elektrická práce	59
3.13.2. Elektrický výkon	60
3.13.3. Příkon a výkon, účinnost	62
3.14. Řazení rezistorů	63
3.14.1. Sériové řazení rezistorů	63
3.14.2. Paralelní řazení rezistorů	65

3.14.3.	Směšené řazení rezistorů	68
3.14.4.	Transfigurace rezistorů řazených do trojúhelníku	70
3.15.	Otázky a cvičení	70
3.16.	Joulův–Lenzův zákon	73
3.17.	Přeměna elektrické energie v teplo	75
3.18.	Otázky a cvičení	76
3.19.	Kirchhoffovy zákony	77
3.20.	Řešení složených elektrických obvodů stejnosměrného proudu	79
3.20.1.	Řešení elektrických obvodů postupným zjednodušováním obvodu	80
3.20.2.	Řešení elektrických obvodů pomocí prvního a druhého Kirchhoffova zákona	81
3.20.3.	Řešení elektrických obvodů metodou smyčkových proudů	83
3.20.4.	Řešení elektrických obvodů pomocí transfigurace zapojení rezistorů do trojúhelníku na zapojení do hvězdy	84
3.20.5.	Řešení elektrických obvodů graficko-početní metodou	91
3.21.	Otázky a cvičení	96
3.22.	Elektrický zdroj a jeho náhradní schéma	101
3.23.	Děliče napětí	106
3.23.1.	Nezatížený dělič	106
3.23.2.	Zatížený dělič	109
3.24.	Otázky a cvičení	110
3.25.	Théveninova poučka	112
3.26.	Řazení elektrických zdrojů	119
3.26.1.	Sériové řazení elektrických zdrojů	119
3.26.2.	Paralelní řazení elektrických zdrojů	120
3.26.3.	Kombinované řazení elektrických zdrojů	121
3.27.	Největší výkon odebíraný z elektrického zdroje	123
3.28.	Otázky a cvičení	123
4.	ELEKTROSTATIKA	126
4.1.	Elektrické pole	126
4.2.	Coulombův zákon a plošná hustota náboje	129
4.2.1.	Coulombův zákon	129
4.2.2.	Plošná hustota náboje	132
4.3.	Působení elektrického pole na vodič a na dielektrikum	133
4.3.1.	Elektrický potenciál a napětí	133
4.3.2.	Vodič v elektrickém poli	134
4.3.3.	Dielektrikum v elektrickém poli	136
4.3.4.	Elektrická indukce, elektrická pevnost	138
4.4.	Kapacita, kondenzátory	139
4.5.	Otázky a cvičení	145
5.	ZÁKLADY ELEKTROCHEMIE	147
5.1.	Vedení elektrického proudu v kapalinách	147
5.2.	Faradayovy zákony	149

5.3.	Elektrolýza a její využití	150
5.4.	Chemické zdroje napětí	152
5.4.1.	Olověné akumulátory	152
5.4.2.	Oceloniklové akumulátory	154
5.4.3.	Niklokadmiové a další akumulátory	155
5.5.	Otázky a cvičení	155
6.	MAGNETY A MAGNETICKÉ POLE	157
6.1.	Trvalé magnety a magnetické vlastnosti látek	157
6.1.1.	Trvalé magnety	157
6.1.2.	Magnetické vlastnosti látek	158
6.2.	Magnetické pole magnetu	162
6.3.	Magnetické pole přímého vodiče	162
6.4.	Magnetické pole válcové cívky	164
6.4.1.	Válcová cívka	164
6.4.2.	Intenzita magnetického pole	165
6.4.3.	Magnetická indukce	166
6.4.4.	Magnetický indukční tok	167
6.5.	Magnetické pole prstencové cívky	168
6.6.	Otázky a cvičení	169
6.7.	Magnetické obvody	171
6.8.	Hopkinsonův zákon	174
6.9.	Řešení magnetických obvodů	176
6.9.1.	Sériové řazení magnetických obvodů	176
6.9.2.	Paralelní řazení magnetických obvodů	178
6.9.3.	Základní vztahy pro řešení magnetických obvodů	180
6.10.	Pohyb vodiče v magnetickém poli	181
6.10.1.	Pohyb osamoceneného vodiče	181
6.10.2.	Vzájemné působení dvou vodičů	183
6.11.	Dynamické účinky elektrického proudu	185
6.12.	Otázky a cvičení	188
6.13.	Elektromagnetická indukce	190
6.13.1.	Indukované napětí	190
6.13.2.	Vlastní indukce	193
6.14.	Otázky a cvičení	195
6.15.	Ztráty ve feromagnetických materiálech	195
6.15.1.	Hysterezní ztráty	195
6.15.2.	Ztráty vířivými proudy	198
6.16.	Otázky a cvičení	199
7.	STŘÍDAVÝ PROUD	201
7.1.	Základní veličiny sinusového průběhu	201
7.2.	Vznik sinusového napětí a proudu	204
7.3.	Hodnoty střídavého proudu a napětí	207
7.4.	Znárodnování sinusových veličin fázory	210

7.5.	Rezistor v elektrickém obvodu střídavého proudu	211
7.6.	Otázky a cvičení	213
7.7.	Indukčnost	215
7.7.1.	Vlastní indukčnost	215
7.7.2.	Vzájemná indukčnost	218
7.8.	Řazení cívek	219
7.8.1.	Sériové řazení cívek	219
7.8.2.	Paralelní řazení cívek	220
7.9.	Cívka v elektrickém obvodu střídavého proudu	222
7.10.	Otázky a cvičení	225
7.11.	Kondenzátor v elektrickém obvodu střídavého proudu	226
7.12.	Řazení kondenzátorů	229
7.12.1.	Sériové řazení kondenzátorů	229
7.12.2.	Paralelní řazení kondenzátorů	230
7.12.3.	Sériově paralelní řazení kondenzátorů	231
7.13.	Otázky a cvičení	233
7.14.	Složené obvody střídavého proudu	234
7.14.1.	Skutečná cívka v elektrickém obvodu střídavého proudu	234
7.14.2.	Skutečný kondenzátor v elektrickém obvodu střídavého proudu	237
7.14.3.	Sériové zapojení cívky a kondenzátoru	239
7.14.4.	Sériové zapojení rezistoru, cívky a kondenzátoru	241
7.14.5.	Paralelní zapojení rezistoru a cívky	244
7.14.6.	Paralelní zapojení rezistoru a kondenzátoru	245
7.14.7.	Paralelní zapojení cívky a kondenzátoru	247
7.14.8.	Paralelní zapojení rezistoru, cívky a kondenzátoru	249
7.15.	Otázky a cvičení	255
7.16.	Duální obvody střídavého proudu	256
7.17.	Náhradní schéma rezistoru, cívky a kondenzátoru	261
7.18.	Rezonance	265
7.18.1.	Sériová rezonance	265
7.18.2.	Paralelní rezonance	268
7.19.	Výkon a práce v obvodu střídavého proudu	272
7.20.	Otázky a cvičení	278
7.21.	Trojfázová soustava	280
7.21.1.	Spojení trojfázového vinutí do hvězdy	281
7.21.2.	Spojení trojfázového vinutí do trojúhelníku	284
7.22.	Výkon a práce v trojfázové soustavě	287
7.23.	Točivé magnetické pole	289
7.24.	Otázky a cvičení	292
8.	VÝSLEDKY CVIČENÍ	294
	LITERATURA	301

Předmluva

Tato učebnice je určena pro výuku základního odborného předmětu Základy elektrotechniky ve studijních a učebních oborech elektrotechnických. Obsahuje proto maximum učiva.

Podle učebních osnov je v některých učebních oborech pro jednotlivé tematické celky předepsán různý počet vyučovacích hodin, protože je v těchto učebních oborech učivo buď zkráceno, nebo rozšířeno na úkor jiných tematických celků. Proto učitelé před zpracováním svých tematických plánů porovnají rozsah učiva v učebnici s platnou učební osnovou a výklad buď zestruční, nebo některé celky vůbec vynechají.

Při vyučování se navazuje na učivo z předmětů fyzika a pracovní vyučování na základní škole. Učivo označené v učebnici:

- se probírá v učebních oborech stručně.
-
- ▼ se probírá jen ve studijních oborech,
- ▲
- ▽ je určeno pro zájemce o teoretickou elektrotechniku.
- △

V Praze, v dubnu 1982

Autoři

VELIČINY A JEDNOTKY POUŽÍVANÉ V ELEKTROTECHNICE

Veličina	Značka veličiny	Jednotka	Značka jednotky
plošný obsah	S	čtverečný metr	m^2
objem	V	krychlový metr	m^3
rychlost	v	metr za sekundu	$m \cdot s^{-1}$
úhlová rychlost	ω	radián za sekundu	$rad \cdot s^{-1}$
zrychlení	a	metr za sekundu na druhou	$m \cdot s^{-2}$
hustota	ρ	kilogram na krychlový metr	$kg \cdot m^{-3}$
síla	F	newton	N
tlak	p	pascal	Pa
energie	E	joule	J
práce	W	joule	J
teplo	Q	joule	J
měrná tepelná kapacita	c	joule na kilogram a kelvin	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
výkon	P	watt	W
napětí	U	volt	V
elektrický potenciál	φ	volt	V
odpor	R	ohm	Ω
vodivost	G	siemens	S
rezistivita	ρ	ohm metr	$\Omega \cdot m$
hustota proudu	J	ampér na čtverečný metr	$A \cdot m^{-2}$
náboj	Q	coulomb	C
plošná hustota náboje	σ	coulomb na čtverečný metr	$C \cdot m^{-2}$

Veličina	Značka veličiny	Jednotka	Značka jednotky
intenzita elektrického pole	E	volt na metr	$V \cdot m^{-1}$
permitivita	ϵ	farad na metr	$F \cdot m^{-1}$
kapacita	C	farad	F
impedance	Z	ohm	Ω
reaktance	X	ohm	Ω
magnetická indukce	B	tesla	T
magnetický indukční tok	Φ	weber	Wb
intenzita magnetického pole	H	ampér na metr	$A \cdot m^{-1}$
permeabilita	μ	henry na metr	$H \cdot m^{-1}$
indukčnost	L	henry	H
magnetomotorické napětí	F_m	ampér	A
magnetický odpor	R_m	reciproký henry	H^{-1}

420

1. Úvod

1.1. VÝZNAM, VÝVOJ A ÚKOLY ELEKTROTECHNIKY

Elektrotechnika se zabývá výrobou, rozvodem a spotřebou elektrické energie a zařízeními, která se pro tyto účely používají.

Dělí se na silnoproudou a slaboproudou elektrotechniku. Pod *silnoproudou elektrotechnikou* se původně řadila výroba elektrické energie v elektrárnách, její rozvod a spotřeba ve svítilnách, topných tělesech a v elektromotorech. Silnoproudá elektrotechnika vznikla v minulém století. Roku 1820 sestrojil M. Faraday [feredy] první laboratorní elektromotor, 1876 vynalezl P. N. Jablotkov první elektrický zdroj světla — obloukovou lampu, ale teprve 1882 postavil T. A. Edison [edyzn] první elektrárnu.

Slaboproudá elektrotechnika má svůj začátek v roce 1796, kdy A. Volta sestrojil první elektrický článek. Ve svých začátcích se zabývala přenosem zpráv. P. L. Šilling zřídil roku 1832 první elektrický telegraf, A. G. Bell v roce 1876 sestrojil první telefon. V roce 1920 bylo zahájeno první pravidelné rozhlasové vysílání (u nás v roce 1923) a v roce 1935 první televizní vysílání (u nás v roce 1953). První kapesní kalkulátory se prodávaly na začátku sedmdesátých let a digitální hodinky od poloviny sedmdesátých let našeho století.

Dnes již nemůžeme odlišovat slaboproudou elektrotechniku od silnoproudé podle proudů, které tato odvětví používají. Ve vysílačích jsou proudy až několik tisíc ampérů, zatímco motorkem kazetového magnetofonu procházejí pouze desetiny ampéru. Vysílač patří ovšem do slaboproudé elektrotechniky, kdežto elektromotory do silnoproudé elektrotechniky.

Elektrotechnika je jedním z nejvýznamnějších odvětví národního hospodářství. Jako příklad jejího uplatnění uvedeme elektrický pohon strojů v průmyslu a zemědělství, elektrické lokomotivy, elektrické osvětlení, tavení a zušlechťování kovů v elektrických pecích a elektrické svařování. Bez elektrických zařízení by nemohly jezdit automobily a další motorová vozidla. Elektrické jevy nám umožňují sledovat rozhlasové a televizní pořady. Mnoha lidem již zachránily život elektronické přístroje v nemocnicích.

Elektrická měření a zpracování fyzikálních veličin v počítačích značně ovlivnily výrobu. Roste počet strojů a provozů řízených počítačem. Také administrativa se s využitím počítačů automatizuje.

Rozsáhlá porucha v dodávce elektrické energie působí obrovské potíže i v běžném životě. Nejenže přestane svítit elektrické osvětlení, ale po krátké době neteče voda, nefunguje vytápění, přestanou jezdit tramvaje a elektrické vlaky. Náš život je dnes těsně spojen s využitím elektrické energie. Stěží si dovedeme představit, že ještě v minulém století byl člověk na elektrické energii nezávislý.

Elektrina a elektrické jevy jsou známy téměř dva a půl tisíce let. Název elektrina je odvozen od řeckého výrazu pro jantar. Elektrické jevy se totiž projevovaly nejvíce při tření, kdy se třením elektricky nabíjely jantarové součástky kolovrátků.

Elektrické jevy se dlouho považovaly za zajímavost, která nemá praktické uplatnění. Teprve Voltovy galvanické články umožnily zkoumat jevy spojené s průchodem elektrického proudu vodiči. Zprvu se elektřinou zabývala jen fyzika, později se vytvořila elektrotechnika jako technické odvětví a nakonec vznikla teoretická elektrotechnika jako věda. Významným odvětvím elektrotechniky je elektronika, do níž patří např. rozhlasová a televizní technika, výpočetní technika a elektrická měřicí technika.

V této učebnici se seznámíte s řadou dalších využití elektrické energie.

Elektrotechnická povolání jsou náročná; musí se v nich pracovat velmi odpovědně a s využitím velkého množství teoretických poznatků. V začátcích elektrotechniky se obvody zkoušely velmi jednoduchými prostředky. Pro silnoproudé obvody byla např. hlavní pomůckou při hledání poruch žárovková zkoušečka. Dnes již tyto prostředky zdaleka nestačí. S využitím elektronických přístrojů spolehlivě a bez výkopů vyhledáváme i místo přerušení kabelu uloženého v zemi. Měřením velmi rychle najdeme mezi tisíci součástkami počítače vadný díl. Musíme však dobře znát funkci každé součástky v základních elektrických obvodech a funkci každého obvodu v přístroji. Neodborným zásahem se elektrotechnická zařízení většinou poškodí nebo dokonce zničí, popř. se zařízení stane nebezpečným.

Předpisy, kterými se musí elektrotechnici při své práci řídit, shrnují *československé státní normy (ČSN)*.

Elektrotechnika je perspektivní obor, který se i v příštích letech bude rychle rozvíjet. V období vědeckotechnické revoluce ji čekají velké úkoly. V energetice např. musíme výstavbou jaderných elektráren zajistit dostatek elektrické energie. V elektronice je třeba rozšířit součástkovou zá-

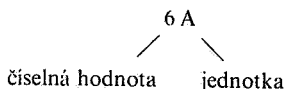
kladnu, abychom mohli rozvíjet zejména automatizační a výpočetní techniku, investiční a spotřební elektroniku aj. Elektrotechnika může v současné etapě významně přispět k růstu celkové produktivity práce, ke snižování nákladů, spotřeby energie a materiálů i ke zlepšování pracovních a životních podmínek. K tomu je třeba daleko více využívat nejnovější poznatky vědy a techniky při mezinárodní dělbě práce a zejména při spolupráci zemí RVHP.

2. ZÁKLADNÍ POJMY

2.1. FYZIKÁLNÍ VELIČINY A JEJICH JEDNOTKY

S řadou fyzikálních veličin jste se již seznámili ve fyzice. Patří mezi ně délka, hmotnost, čas, elektrické napětí a elektrický proud. Na základní škole jste poznali, že fyzikální veličiny mají dohodu stanovené značky, např. pro proud používáme značku I . Tyto značky se tisknou ležatým písmem (kurzivou). Také jednotky mají značky, např. A je značka ampéru. Značky jednotek se tisknou stojatým písmem.

Každá fyzikální veličina má číselnou hodnotu a jednotku, např.



Mezi číselnou hodnotou a jednotkou necháváme vždy mezeru. Jednotky nesmíme v zápisech vypustit, protože bez nich není veličina určena. Zápis délka 6 může stejně dobře znamenat 6 mm jako 6 km.

- ▽ Také ve výpočtech se nesmějí vynechávat jednotky. Pišeme tedy $U = RI = 6 \Omega \cdot 5 \text{ A} = 30 \text{ V}$. Dříve používaný zápis $U = RI = 6 \cdot 5 = 30 \text{ V}$ je matematicky chybný. Podle pravidel algebry je v zápise porušena rovnost, neboť $6 \cdot 5 \neq 30 \text{ V}$. Dále značka U je vyhrazena pro napětí a neplatí ani $U = 30$, protože napětí musíme udávat vždy číselnou hodnotou i jednotkou, tedy $U = 30 \text{ V}$.
- △

2.2. MEZINÁRODNÍ SOUSTAVA JEDNOTEK

Jednotlivé fyzikální jednotky se většinou odvozují z jiných jednotek. Podle toho, které jednotky se považují za základní, vznikají různé soustavy jednotek. V šedesátých letech byla u nás uzákoněna Mezinárodní soustava jednotek, kterou označujeme zkratkou SI. Má sedm základních jednotek (tab. 1 na předsádce). K nim se řadí dvě doplňkové jednotky (tab. 2 na předsádce), o nichž dosud není rozhodnuto, zda mají být také základními jednotkami. Radián znáte z matematiky, měříme jím rovinné úhly; steradián se používá pro měření prostorových úhlů.

Všechny ostatní jednotky Mezinárodní soustavy jednotek (zkráceně jednotky SI) se odvozují ze základních jednotek. Způsob odvození je popsán v ČSN. U jednotek pro elektřinu a magnetismus jej budeme uvádět. S definicemi (vymezením) ostatních jednotek se seznámíme ve fyzice.

Odvozenou jednotkou SI je např. metr za sekundu. Pro tuto jednotku používáme při běžném psaní do sešitů zápis $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. V tisku se píše šikmá zlomková čára, protože vodorovná zlomková čára vyžaduje větší odstup řádků. V teoretické elektrotechnice se používá také zápis jednotek se záporným exponentem (mocnitelem), např.

$$\frac{\text{m}}{\text{s}} = \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{nebo} \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Záporný exponent tedy označuje jednotku, která patří do jmenovatele. Mezi jednotkami složenými ze dvou jednotek píšeme násobící tečku.

Některé odvozené jednotky mají vlastní název, např. ohm a volt. Přehled nejdůležitějších jednotek, které se používají v elektrotechnice, je na začátku učebnice (str. 10 a 11).

Z praxe znáte některé další jednotky, které nepatří mezi jednotky SI. Mnohé zanikají, protože se podle ČSN od roku 1980 nesmějí používat. Mezi dovolené (tzv. vedlejší) jednotky patří např. minuta, hodina, den, tuna, úhlová vteřina, úhlová minuta, úhlový stupeň, litr a kilowatt hodina.

Pro vyjádření určitých veličin jsou jednotky někdy příliš malé, jindy zase příliš velké. Proto používáme *předpony jednotek*; pro jednotky SI jsou to předpony SI (tab. 3 na předsádce).

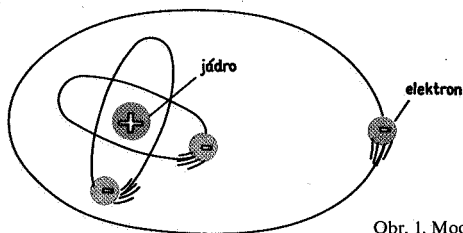
V elektrotechnice jsou předpony SI významné také proto, že se jimi zkracuje zápis na součástkách a ve schématech (např. 3 300 000 Ω zapíšeme 3,3 M Ω , protože pro milión máme předponu mega a značku M). V tab. 3 jsou také značky, které se tisknou na součástky při označování předpon. Na součástkách se však předpona kilo značí K. Na rozdíl od běžných zápisů se umísťují značky předpon místo desetinné čárky, která by byla špatně čitelná a mohli bychom ji přehlédnout. Píšeme tedy 2K2, což znamená 2,2 k Ω . U jednotek se místo desetinné čárky píše značka R, tedy 6,8 Ω bude na součástce vyjádřeno zápisem 6R8. Toto označení používáme také ve schématech. Nesmíme je však použít při výpočtech a při zápisech jednotek ve výsledku měření.

Až na výjimky budeme do všech fyzikálních vztahů dosazovat v jednotkách SI, a to bez předpon. Podobně jako při zápisu jednotek využijeme mocniny. Ze základní školy již víte, jak se mocninami čísla 10 zapisují

velká a malá čísla, např. $1\,000\,000 = 10^6$ a $0,000\,5 = 5 \cdot 10^{-4}$. K odstranění předpon použijeme mocniny z tab. 3, např. místo $26\,\mu\text{A}$ napíšeme $26 \cdot 10^{-6}\,\text{A}$. Podobně údaj $1\text{M}\Omega$ o odporu, který má součástka, zapíšeme $1,5\,\text{M}\Omega = 1,5 \cdot 10^6\,\Omega$. Do vztahů dosazujeme převážně s mocninami, protože zápisy jsou kratší a snáze se s nimi počítá.

2.3. STAVBA LÁTEK

Z chemie víte, že látky jsou složeny z *molekul* a molekuly z *atomů*. Každý atom má tzv. *elektronový obal*, tvořený *elektrony*, a *jádro*, tvořené *jadernými částicemi*, ze kterých nás v elektrotechnice zajímají *protony*. Uspořádání částic v atomu je značně složité a nedovedeme je zatím ani přesně popsat, natož znázornit. Proto používáme pro výklad uspořádání částic v atomu různé modely.



Obr. 1. Model atomu lithia

Model nevystihuje přesně skutečnost, ale usnadňuje pochopení některých vztahů, dějů nebo jevů, které vysvětlujeme. Pro začátek použijeme jednoduchý model atomu (obr. 1), ve kterém si představujeme elektrony jako kuličky a jádro atomu také jako kuličku. Zdůrazňujeme, že ve skutečnosti to tak není. Elektrony také neobíhají po přesně vymezených drahách, je pouze určitá pravděpodobnost, že elektron bude na naznačené dráze. Elektrony vytvářejí tzv. *slupky*. V jedné slupce může být jen určitý největší počet elektronů (obr. 2a), někdy však může být slupka obsazena jen částečně nebo vnější slupky nejsou obsazeny vůbec. Slupky se začínají obsazovat vždy směrem od jádra. Z chemie víte, že různé prvky se liší počtem protonů v jádře a mají také různý počet elektronů v elektronovém obalu.

- ▼ Hmotnost elektronu je asi $9 \cdot 10^{-31}$ kg, tedy nesmírně malá. Pro představu uvedeme, že hmotnost 1 kg by mělo přibližně 10^{30} elektronů. Pokud bychom hmotnost každého elektronu zvětšili na 1 g, mělo by 10^{30} elektronů hmotnost 170 zeměkoulí.

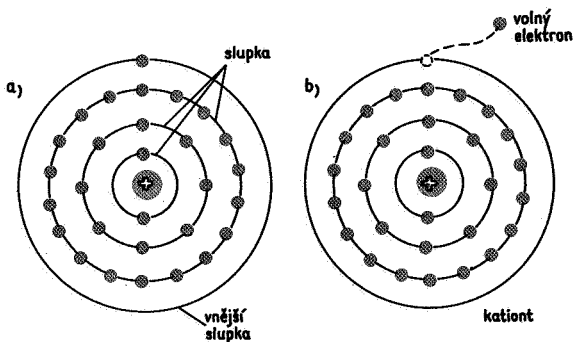
- ▲ Protony mají hmotnost asi 1840krát větší než elektrony. V jádru je drží jaderné síly, které jsou podstatně větší než síly, jimiž jsou udržovány elektrony ve slupkách.

Ze základní školy již víte, že proton a elektron jsou *elektricky nabité částice*. Náboj protonu je stejně velký jako náboj elektronu, ale liší se od sebe svými vlastnostmi. Proto označujeme *náboje elektronů* jako *záporné* a *náboje protonů* jako *kladné*. Toto označení je dohodnuté a nevyjadřuje žádnou velikost ani polohu. Stejně dobře bychom mohli náboje označovat např. A místo + a B místo –.

Atom má stejný počet protonů v jádru jako elektronů v obalu. Účinky kladných nábojů protonů a záporných nábojů elektronů se navzájem ruší a atom je *elektricky neutrální*. Pokud je v elektronovém obalu méně elektronů, než odpovídá počtu protonů v jádru, jde o kladný iont, tzv. *kationt*. Uvázne-li naopak v elektronovém obalu jeden elektron nebo více elektronů navíc, vzniká záporně nabitý iont, nazývaný *aniont*.

Ve vnější slupce atomů kovů jsou pouze jeden až dva valenční elektrony. Vlivem vnějších sil se tyto elektrony mohou uvolnit a putují kovem jako tzv. *volné elektrony* (obr. 2b).

Podle elektronové teorie tyto *volné elektrony vedou elektrický proud kovem*.



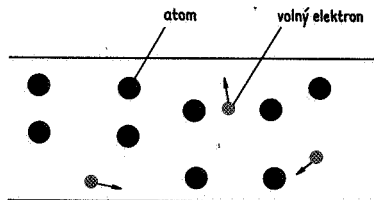
Obr. 2. a) Model rozložení elektronů v elektronovém obalu mědi;
b) kladný iont mědi a volný elektron

Poznámka: Místo elektrický proud říkáme zkráceně proud. Také v dalších případech, kdy nemůže dojít k omylu, budeme slovo elektrický vynechávat.

Elektronová teorie kovů vznikla kolem roku 1900. Vychází z představy, že kovy jsou složeny z nepatrných krystalků, ve kterých jsou atomy uspořádány do mřížek. Elektrony uvolněné z vnější slupky atomů se pohybují volně v krystalové mřížce a odtud je odvozen jejich název volné elektrony (obr. 3).

Elektronová teorie nedovede vysvětlit všechny jevy. Fyzikové propočítávali další teorie, které lépe objasňují průchod elektronů krystalovou mřížkou. Jsou to však velmi složité teorie, a proto budeme převážně používat jednodušší elektronovou teorii.

Obtíže v objasňování struktury hmoty působí především nesmírně malé rozměry a hmotnosti jednotlivých látkových částic. Zatím nedovedeme žádným přístrojem dosáhnout takového zvětšení, které by nám dovolilo přímo pozorovat elektrony nebo protony. O jejich existenci se přesvědčujeme pouze na základě jejich účinků.



Obr. 3. Volné elektrony ve vodiči

2.4. ROZDĚLENÍ LÁTEK PODLE ELEKTRICKÉ VODIVOSTI

Látky mají různou vnitřní stavbu, a tím také různou schopnost vést elektrický proud. Znáte již *vodiče*, mezi které patří *kovy*. Jak naznačuje jejich název, vedou dobře proud. V elektrotechnice používáme jako vodiče nejčastěji *měď* a *hliník*. Proud velmi dobře vede také *stříbro*, ale jeho cena je tak vysoká, že se používá jen zřídka. Jako vodiče slouží i ocel a některé slitiny kovů, např. bronz a mosaz.

V kapalinách, např. ve vodném roztoku kyselin, nevedou proud elektrony, ale ionty. Kapalné vodiče označujeme společným názvem *elektrolyty*. V elektrolytech dochází k rozpadu molekul na ionty disociací (štěpením) (čl. 5.1).

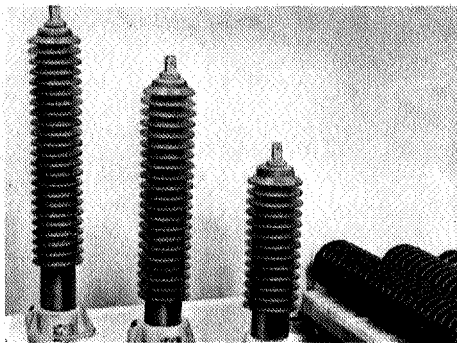
Všechny kapaliny nevedou elektrický proud, např. oleje a tekutý parafín. Proud však vede velmi dobře pramenitá voda, dešťová voda a vlhké látky, např. zeminy.

Látky, které nevedou elektrický proud, jsou *izolanty*. Vnější slupky jejich atomů jsou obsazeny větším počtem elektronů a elektrony se z nich uvolňují velmi nesnadno. Všechny izolanty mají společný znak – nejsou v nich žádné částice, které by zprostředkovaly průchod proudu. Mezi pevné izolanty patří *plasty* (např. PVC), *slída*, *sklo*, *tkaniny*, *papír* a *keramické látky*, z nichž nejznámější je porcelán. K tekutým izolantům řadíme již zmíněný *tekutý parafín* a *oleje*. Výborným izolantem je vakuum a suchý vzduch.

Dokonalé izolanty však neexistují, neboť v látkách jsou vždy nečistoty. Dostávají se do nich již při výrobě nebo později ze vzduchu nebo z jiného okolí. V pevných izolantech se stárnutím vytvářejí trhlinky, do nichž vniká z okolního prostředí voda a další látky. Tyto nepříznivé složky mohou vést k tzv. průrazu izolantu. V izolantu se vytvoří otvor, kterým prochází proud. Časté jsou také povrchové vrstvy nečistot, které např. na keramických izolátorech mohou vést proud.

Poznámka: Rozlišujte izolant a izolátor. Izolant je druh látky, izolátor (obr. 4) je součástka vyrobená z izolantu.

Samostatnou skupinou látek jsou *polovodiče*. Tvoří předěl mezi izolanty a vodiči. Mají však řadu zajímavých vlastností, se kterými se seznámíte později.



Obr. 4. Izolátor

2.5. ELEKTRICKÝ NÁBOJ

Poznali jsme, že látky obsahují elektricky nabitě částice. Tyto částice – protony a elektrony, nesou elektrický náboj, zkráceně *náboj* (Q). Zavedením pojmu náboj vyjadřujeme schopnost částic působit na sebe elektrickými silami, které jsou řádově 10^{39} krát větší než gravitační síly mezi těmito částicemi.

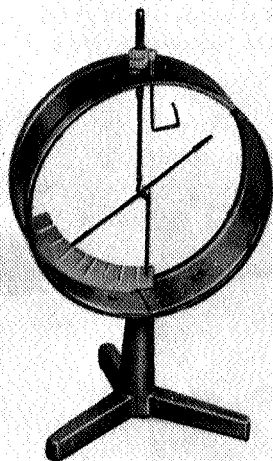
Pro měření náboje používáme jednotku *coulomb* [kulón] (C). Všechna měření svědčí o tom, že náboj protonu a náboj elektronu jsou nejmenší náboje, které mohou existovat. Nazýváme je *elementární* (základní) *náboje*. Elementární náboj je

$$e \doteq 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Jeho hodnota se nemění vnějšími vlivy, např. rychlým pohybem.

Elementární náboj je nesmírně malý. Nelze jej oddělit od částic, které jej nesou.

Pojem elektrický náboj vznikl v době, kdy se ještě nevědělo nic o elektronech a protonech. Z té doby se uchovaly často používané obraty, jako přenášet náboj, náboj je rozložen apod. Vždy si však musíme uvědomit, že nejde o samotný náboj, ale současně o částice, které náboj nesou.



Obr. 5. Elektrometr

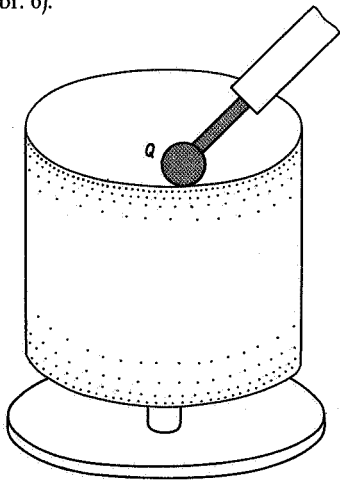
K rozlišení nábojů používáme název *vázaný náboj* a *volný náboj*. Vázaný náboj nelze přenášet, volný náboj můžeme přemístit.

Každé těleso má obrovský počet elektricky nabitých částic. Je-li počet protonů a elektronů v tělese stejný a jsou-li tyto částice v tělese rovnoměrně rozloženy, nepozorujeme žádné elektrické síly kolem tělesa. Říkáme, že *těleso je elektricky neutrální*.

Třením nebo jiným způsobem můžeme převést některé volné elektrony z jednoho tělesa na druhé. Získáme tak *elektricky nabitě těleso*. V tělese, ze kterého jsme odebrali elektrony, převažuje vliv elektrických sil působených protony. Takové těleso je *kladně nabitě*. Naopak těleso, na kterém se shromáždí více elektronů než odpovídá neutrálnímu stavu, je *záporně nabitě*. Z fyzikálních pokusů víte, že skleněná tyč se nabíjí kladně, kdežto vinidurová tyč se třením nabíjí záporně. Při tření přecházejí elektrony ze skleněné tyče na tkaninu a naopak z tkaniny na vinidurovou tyč.

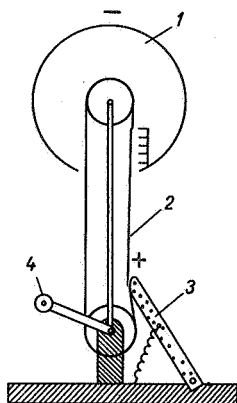
Pro zjištění nabitých těles používáme *elektrometr* (obr. 5). Je to jednoduchý přístroj, s izolačně oddělenou kovovou tyčkou, na níž je připevněn proužek z hliníkové fólie. Jakmile se elektrometr nabije, proužek se vychýlí. Při větším náboji, který na elektrometr přeneseme, je výchylka proužku větší.

Pokus: Válcovou nádobu nabijeme a přenášením náboje malou kuličkou na elektrometr zjišťujeme, jaký je volný náboj na různých místech nádoby (obr. 6).



Obr. 6. Náboj na různých částech nádoby

Pozorujeme, že největší náboj přeneseme z hran nádoby a menší z rovinných nebo málo zaoblených částí povrchu tělesa. Ve vnitřní části nádoby však volný náboj vůbec není. To tedy znamená, že náboje přenášené při tření látek zůstávají *na povrchu těles*.



Obr. 7. Řez pásovým generátorem: 1 – dutá koule, 2 – tkanina, 3 – plastová deska, 4 – klička

Protony se přenášení nábojů nezúčastňují, protože je nelze tak snadno oddělit z atomu jako elektrony. V elektricky neutrálním tělese každý proton váže jeden elektron. Mnoha pokusy se zjistilo, že platí zákon *zachování elektrického náboje*: *Elektrický náboj se nedá vytvořit ani zničit.*

Dále víme, že celkový počet kladně nabitých částic v přírodě je stejný jako počet částic nabitých záporně. Vyjadřujeme to tvrzením, že *příroda je jako celek elektricky neutrální*. Neznamená to ovšem, že by se nemohly určité části přírody elektricky nabíjet, např. při bouřce vznikají mezi jednotlivými mraky nebo mezi mrakem a zemí odlišné náboje.

Některé tkaniny se při nošení samovolně nabíjejí tzv. *elektrostatickými náboji* (náboji v klidu). Tento jev je nejen nepříjemný, ale ve výbušném prostředí dokonce velmi nebezpečný. Elektrostaticky se rovněž nabíjejí některé další výrobky, např. papír při převíjení, plasty atd. Elektrostatický náboj se získá také při čerpání benzínu. V době přečerpávání benzínu musí proto být cisterny uzemněny, aby se náboj sváděl do země a nemohl se hromadit na cisterně.

Větší elektrostatické náboje získáme *pásovým generátorem* (obr. 7). Náboj vzniká třením látkového pásu o destičku z plastu, snímá se z pásu hroty a shromažďuje se na kouli v horní části přístroje.

2.6. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Uvedte několik fyzikálních veličin. Na příkladech vysvětlíte, co je číselná hodnota a co je jednotka fyzikální veličiny.
2. Proč se nesmí vynechávat v zápise fyzikální veličiny jednotka?
3. Která základní jednotka SI je určena pro měření elektrických veličin?
4. Vyhledejte několik odvozených jednotek SI, které jste na základní škole používali při probírání učiva o elektřině. Jaké veličiny se jimi měří?
5. S využitím záporných exponentů vyjádřete:
 - a) m/s; b) km/h; c) kg/m³; d) l/s
6. Vyjádřete s využitím exponentů:

a) 300 000	d) 0,003
b) 7 000 000	e) 0,000 000 7
c) 9 600 000	f) 0,000 017
7. Napište číslem bez exponentů:

a) $7 \cdot 10^6$	e) $0,5 \cdot 10^6$
b) $3,2 \cdot 10^3$	f) $18 \cdot 10^{-6}$
c) $2 \cdot 10^{-3}$	g) $5 \cdot 10^9$
d) $3,6 \cdot 10^{-3}$	h) $3,8 \cdot 10^{-9}$
8. Uvedte názvy předpon jednotek, kterými vyznačíte:

a) 1000; b) 10 ⁶ ; c) 10 ¹² ; d) 10 ⁹ ; e) 0,001; f) 10 ⁻⁶ ; g) 10 ⁻⁹
--
9. Napište bez předpon:

a) 18 mA	d) 50 μ A	g) 35 ¹ GW
b) 2 M Ω	e) 51 k Ω	h) 0,5 ¹ TW
c) 400 kV	f) 0,17 μ A	i) 13 pm
10. Vyznačte údaje uvedené ve cvičení 8. a) až f) zápisem, který se používá na součástkách.
11. V jednom časopise omylem vytiskli místo značky MW značku mW. Kolikrát tím zmenšili výkon?
12. Na součástkách je tento údaj o odporu: 1R2, 3M3, 4K7, 68R. Zapište jej s využitím jednotky ohm.
13. Jaké částice jsou v elektronovém obalu? Jak modelujeme jejich umístění?
14. Jaký je poměr hmotnosti protonu vzhledem k hmotnosti elektronu?

15. Jak označujeme elektrický náboj protonu a jak náboj elektronu?
16. Kdy je atom elektricky neutrální? Kdy je těleso elektricky neutrální?
17. Které částice podle elektronové teorie vedou proud kovem?
18. Jak dělíme látky podle jejich schopnosti vést elektrický proud?
19. Proč nemůže dokonalým izolantem procházet proud? Čím je způsobeno, že nedovedeme vyrobit dokonalé izolanty?
20. Jmenujte několik vodičů a několik izolantů, které se používají v elektrotechnice.
21. Jak na sebe působí elektricky nabitá tělesa? Které tři elektrické stavy může mít těleso? Kolik elektronů musíte přemístit, aby přenesly náboj 1 C?
22. Jak se rozmístí volné elektrony, které přeneseme na těleso nabíjením?
23. Vysvětlete zákon zachování elektrického náboje.
24. Čím mohou být elektrostatické náboje nebezpečné?

3. Stejnosměrný proud

V základní škole jste poznali, že proud může být *stejnosměrný* (značka $-$) nebo *střídavý* ($\sim$). Název stejnosměrného proudu je odvozen z toho, že proud nemění svůj směr, kdežto střídavý proud mění (střídá) neustále směr. *Dohodnutý směr stejnosměrného proudu je od kladného pólu k zápornému pólu.*

Také napětí může být buď stejnosměrné, nebo střídavé. *Zdroj stejnosměrného napětí* má na jedné svorce trvalý přebytek elektronů. Tato svorka se nazývá *záporná svorka* zdroje napětí. Na druhé, tzv. *kladné svorce* zdroje napětí je trvalý nedostatek elektronů. Mezi kladnou a zápornou svorkou je *stejnosměrné napětí* (U).

Na základní škole jste také poznali střídavé napětí. Na svorkách zdrojů střídavého napětí je po krátkou dobu vždy střídavě kladné a záporné napětí. V okamžiku, kdy je na jedné svorce kladné napětí, je na druhé svorce záporné napětí a naopak. Říkáme, že se mění *polarita napětí* na svorkách.

Jak již víte, napětí se měří *voltmetrem* a jednotkou napětí je *volt* (V). Proud se měří *ampérmetrem* a jednotkou proudu je *ampér* (A).

Stejnosměrné napětí získáváme např. z *chemických zdrojů* (monočlánků, tužkových článků, akumulátorů apod.), střídavé napětí je např. v elektrických zásuvkách v bytech. V elektrotechnice se napětí dělí na *malé napětí* (do 50 V), *nízké napětí* (od 50 V do 300 V), *vysoké napětí* (od 300 V až do 38 kV) a *velmi vysoké napětí* (tj. vyšší než 38 kV). Napětí, která ohraničují jednotlivé druhy napětí, se nesmějí překročit mezi kterýmkoliv vodičem a zemí. Běžně se setkáváme se střídavým napětím 220 V, které je mezi dutinkami (zdíčkami) zásuvek v domácnostech. Podle uvedeného rozdělení je to nízké napětí.

Nyní se budeme zabývat jen stejnosměrným napětím a stejnosměrným proudem.

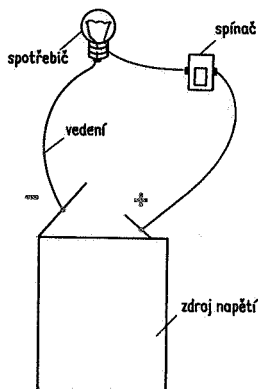
3.1. JEDNODUCHÝ ELEKTRICKÝ OBVOD

Při fyzikálních pokusech na základní škole jste poznali, že *jednoduchý elektrický obvod* tvoří a) zdroj napětí, b) spotřebič, c) vedení, d) spínač (obr. 8).

S některými zdroji napětí se seznámíte v čl. 3.2, další – např. dynamo, poznáte později.

Spotřebič je každé elektrické zařízení, ve kterém se účelně mění elektrická energie v jinou požadovanou energii. Žárovka je tedy spotřebič, protože se v ní mění elektrická energie ve světelné záření. V elektromotoru dochází k přeměně elektrické energie v mechanickou energii, v elektrických kamnech dochází k přeměně v teplo. Jsou to tedy spotřebiče. I rozhlasový přijímač je spotřebič, protože se v něm mění elektrická energie ve zvuk.

Každý spotřebič je konstruován na určité napětí. Toto napětí se označuje *jmenovité napětí* (U_N). Většinou se uvádí na *štítku přístroje* (obr. 9) nebo v návodu. Překročením jmenovitého napětí se spotřebič poškodí. Při nižším než jmenovitém napětí pracují spotřebiče špatně (nebo nepracují vůbec) a někdy se poškodí.



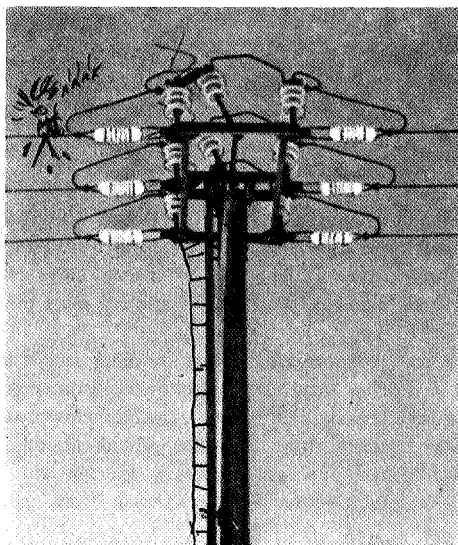
Obr. 8. Jednoduchý elektrický obvod

S různými spotřebiči se budete seznamovat postupně. Poznáte např. točivé stroje, ale také telefony.

Vedení elektronů a tedy elektrického proudu mezi zdrojem napětí a spotřebičem obstarávají *vodiče*. Kovové vodiče jsou buď *holé*, nebo *izolované*. Holé vodiče se upevňují na *izolátorech* připevněných k *podpěrám* (obr. 10).

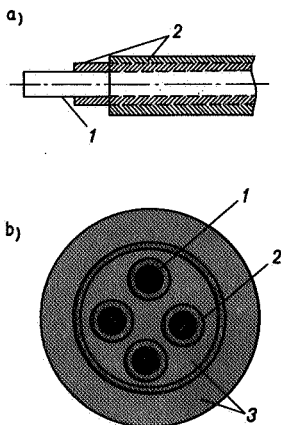


Obr. 9. Štítek přístroje



Obr. 10. Izolátory
na podpěře

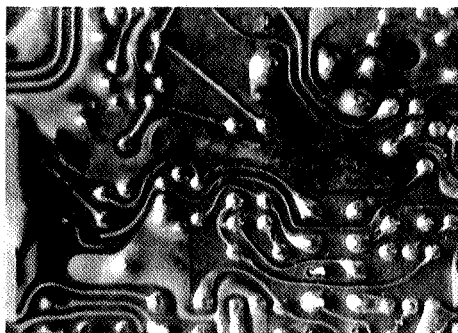
Izolované vodiče mají nejrůznější provedení. Jsou jednožilové nebo několikažilové (obr. 11a, b), jsou určeny pro *pevné uložení* (např. do omítky) nebo pro *pohyblivé přívody* (např. k přenosným spotřebičům – žehličkám a vysavačům). Kabely jsou vodiče pro ztížené podmínky. Mají několikanásobnou izolaci nebo i ochranný kovový obal. Některé se používají jako pohyblivé přívody, jiné se vedou jako povrchové vedení na konstrukcích, jiné se ukládají do země.



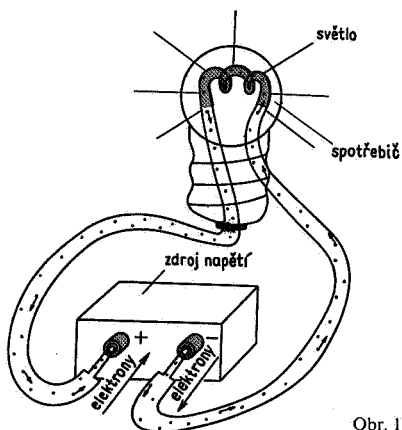
Obr. 11. a) Jednožilový instalační vodič s dvojí izolací AY: 1 – hliníkové jádro, 2 – izolace;
b) řez několikažilovým vodičem CGGU: 1 – měděné jádro, 2 – izolace pryž, 3 – izolace chloropren

Vodiče mají různý tvar, nejčastěji kruhový. V rozvodnách jsou vodiče ve tvaru obdélníkových pásů. Zcela zvláštním druhem vodičů jsou *plošné spoje* (obr. 12). Na desce se odleptá měděná fólie v místech, kudy nemá procházet proud. Zbývá část fólie pak tvoří vodivé spojení mezi místy, ke kterým se připojují součástky.

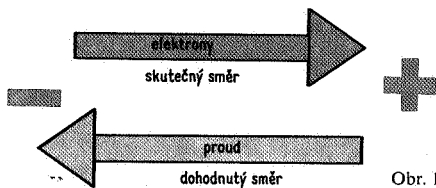
Správným spojením zdroje a spotřebiče vodiče vznikne *jednoduchý elektrický obvod*. Obvod je uzavřen, když všechny jeho části jsou spojeny tak, aby jimi mohl procházet proud. V obvodu stejnosměrného proudu vstupují elektrony ze záporné svorky zdroje do vodiče, procházejí vodičem do spotřebiče a ze spotřebiče vystupují opět do vodiče, který je vede na kladnou svorku zdroje napětí (obr. 13). *Směr pohybu elektronů* je tedy opačný než dohodnutý směr proudu (obr. 14).



Obr. 12. Deska plošných spojů



Obr. 13. Uzavřený obvod



Obr. 14. Dohodnutý směr proudu

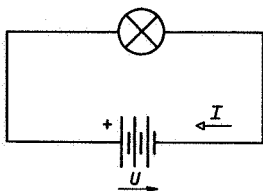
- ▼ Později se seznámíte s příslušenstvím elektrických vedení, např. pojistkami, jističi, zásuvkami. Poznáte, že elektrická vedení jsou podstatně složitější než v jednoduchém elektrickém obvodu, který je např. v kapesní svítilně. Vedení mohou být jednovodičová, dvouvodičová nebo vícevodičová a jeden vodič se někdy nahrazuje zemí – uzemněním. Vždy však platí:

Proud prochází obvodem za těchto podmínek: 1. *Mezi svorkami zdroje je napětí.* 2. *Obvod je uzavřen.* Obě tyto podmínky zkoumáme vždy, když hledáme poruchu, na kterémkoli elektrickém zařízení.

V jednoduchém elektrickém obvodu přerušujeme proud nejčastěji *spínači*. Pro menší proudy se vyrábějí převážně jako *vypínače* (např. kolébkové, tlačítkové, tahové aj.).

Obvod lze přerušit také jiným způsobem, např. vytažením vidlice ze zásuvky. Po přerušení vodivého spojení je *obvod otevřen*.

K znázornění elektrických obvodů používáme *značky pro elektrotechnická schémata*, které jsou na zadní předsádce. Některé tyto značky znáte ze základní školy. Ze značek sestavujeme *elektrotechnická schémata*. S různými druhy schémat se seznámíte postupně. Zpočátku budeme používat *nauková schémata* (obr. 15), ze kterých snáze pochopíte činnost obvodů. Zvykněte si od začátku sledovat ve schématech průchod proudu uzavřenými elektrickými obvody, nejlépe od jedné svorky zdroje ke druhé. Schéma však kreslíme zpravidla pro *otevřený obvod* (klidový stav).



Obr. 15. Naukové schéma obvodu z obr. 13

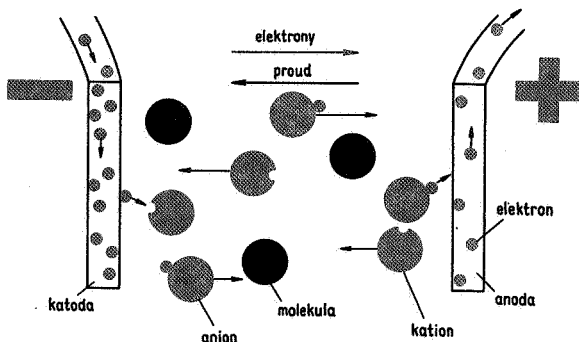
3.2. ZDROJE STEJNOSMĚRNÉHO NAPĚTÍ

3.2.1. Galvanické články

Již v úvodu jsme uvedli, že nejstarší použitelné zdroje napětí jsou *galvanické články*. Umožňují dodávat do obvodů trvalý elektrický proud.

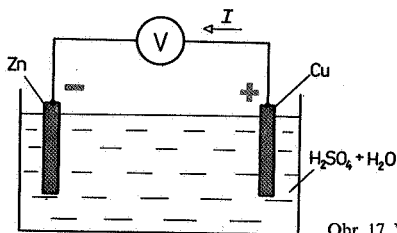
Galvanické články patří do skupiny elektrochemických článků. Jak je patrné z názvu, zdrojem napětí v nich je přeměna chemické energie na elektrickou. Probíhá při oxidačně redukční reakci.

V elektrochemickém článku přecházejí ionty z elektrolytu na elektrody. Tím se mezi elektrodami (tj. deskami článků) vytváří napětí, neboť kladné ionty trvale odčerpávají elektrony ze záporné elektrody článku. Záporné ionty naopak odevzdávají elektrony kladné elektrodě článku (obr. 16).



Obr. 16. Model průchodu proudu elektrochemickým článkem

- ▼ Galvanické články vznikly při biologických pokusech italského lékaře Galvaniho. Všiml si, že za určitých okolností dochází ke stahům tkáně mrtvých živočichů. Domníval se, že objevil živočišnou elektrinu. Jeho přítel A. Volta však zjistil, že stahy tkáně působí elektrický proud vzniklý mezi dvěma různými kovy umístěnými v různých částech tkáně, která se chová jako elektrolyt. Vyhledal řadu kovů a určil napětí, která mezi nimi vznikají.
- ▲



Obr. 17. Voltův článek

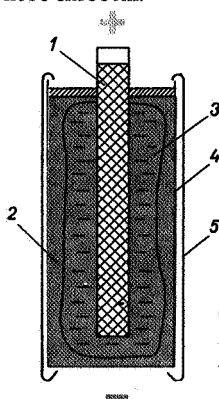
Článek, který se po něm nazývá *Voltův článek*, má zinkovou elektrodu a měděnou elektrodu, ponořené do vodného roztoku kyseliny sírové (obr. 17).

Pokus: Sestavte Voltův článek. Při různém ponoření elektrod do elektrolytu měřte napětí mezi elektrodami. K článku připojte žárovku a ampérmetr. Sledujte proud, který vzniká při různém ponoření elektrod do elektrolytu.

Pokusy zjistíme, že napětí Voltova článku je asi 1,1 V. Toto napětí nezávisí na tom, jaký plošný obsah desek je ponořen v elektrolytu. Ale proud, který můžeme z článku odebírat, je větší, ponoříme-li větší část desek do elektrolytu.

V tabulkách vyhledáte řadu kovů, ze kterých je možné sestavit jiné galvanické články. Největší napětí (asi 4,5 V) získáme mezi lithiovou elektrodou a zlatou elektrodou. Z cenových důvodů se však takový článek nepoužívá.

Dodnes si zachovaly význam *suché články*, které znáte z kapesních svítilen a z přenosných rozhlasových přijímačů. Jsou to články s rosolovitým elektrolytem, který vzniká zahuštěním salmiaku (tj. chloridu amonného) moukou nebo škrobem.



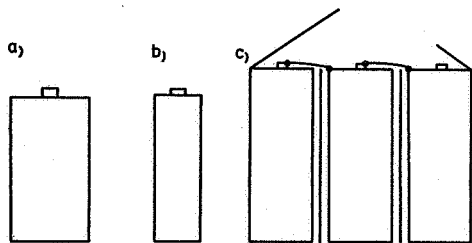
Obr. 18. Salmiakový suchý článek: 1 — uhlík, 2 — škrob, 3 — burel, 4 — zinek, 5 — papírový obal

Kladnou elektrodou suchého článku je *uhlíkový váleček* (obr. 18), který je obklopen směsí koksu a buřely (tj. dvojchromanu draselného). Proud, který prochází článkem, vytváří kolem uhlíkové elektrody bublinky vodíku. Vodík se však oxidací dvojchromanem draselným mění ve vodu. Na elektrodě tedy nemůže vzniknout povlak plynu, který by zabránil

průchodu proudu. Kromě toho se do elektrolytu vrací voda. Zápornou elektrodou suchého článku je *zinkový kalíšek*, který tvoří obal článku.

Napětí čerstvého článku je asi 1,5 V, postupně však klesá a při napětí asi 0,9 V až 0,6 V končí životnost článku buď proděravěním zinkového kalíšku, nebo tím, že elektrolyt vyschne.

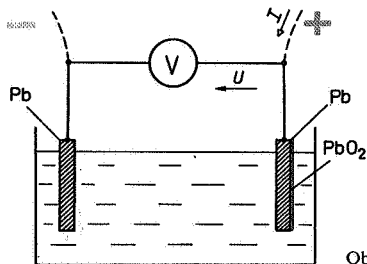
Suché články lze skladovat jen krátkou dobu, většinou 2 až 7 měsíců. Výrobce udává maximální dovolený proud, který se smí z článku odebírat. Jeho překročením podstatně zmenšíme životnost článku.



Obr. 19. a) Monočlánek;
b) tužkový monočlánek;
c) baterie článků

Jednotlivé suché články se prodávají pod názvem monočlánek (obr. 19a) nebo *tužkový monočlánek* (obr. 19b). Spojením několika suchých článků vznikají *baterie článků* (obr. 19c).

Upozornění: Salmiak, který může vytékat ze suchých článků, vážně poškodí elektronická zařízení. Nyní se pro tato zařízení vyrábějí články se zdvojeným nepropustným obalem, odkud elektrolyt tak snadno nevytéká. Přesto však nenecháváme vybité články v přístrojích. Monočláanky nebo baterie vyjmeme také z přístrojů, které ukládáme na dlouhou dobu.



Obr. 20. Princip olověného akumulátoru

3.2.2. Akumulátory

Základní nevýhodou galvanických článků je jejich malá životnost. Výhodnější jsou *akumulátory*, které je možné mnohokrát nabíjet a vybíjet.

Pokus: Do vodného roztoku kyseliny sírové ponoříme dvě olovené elektrody (obr. 20) a měříme napětí mezi elektrodami. Potom jednu elektrodu spojíme s kladným pólem a druhou se záporným pólem zdroje stejnosměrného napětí. Asi po pěti minutách zdroj odpojíme a k elektrodám připojíme voltmetr a potom uzavřený obvod se žárovkou.

Pokusy jsme zjistili, že mezi *olověnými* elektrodami *akumulátoru* nejprve nebylo napětí. Po připojení elektrod ke zdroji stejnosměrného napětí se začal akumulátor *nabíjet*. Po chvíli se kladná elektroda pokryla hnědou vrstvou oxidu olovičitého, zatímco záporná elektroda zůstala šedivá. Olovo na ní nepodléhalo změnám.

Obvodem se žárovkou jsme akumulátor začali *vybíjet*. Žárovka krátkou dobu svítila, ale přitom postupně mizel hnědý povlak oxidu olovičitého z kladné elektrody. Z toho je zřejmé, že v akumulátoru vzniká chemická energie z elektrické a naopak při vybíjení dochází k přeměně chemické energie na elektrickou. Galvanický článek dodává napětí ihned po sestavení, zatímco akumulátor až po nabití. Proto akumulátor nazýváme *sekundární (druhotný) článek*.

Po nabití má *olověný akumulátor* napětí asi 2,7 V. Při vybíjení toto napětí rychle klesá a ustálí se asi na 2 V. Jakmile napětí oloveného akumulátoru klesne na 1,8 V, musí se akumulátor ihned nabít, protože by se poškodil. S konstrukcí akumulátorů se seznámíte později.

Ocelová elektroda a niklová elektroda ve vodném roztoku hydroxidu draselného vytvářejí *oceloniklový akumulátor*. Z chemických značek obou prvků, které tvoří elektrody, vznikl zkrácený název *akumulátor NiFe*.

Obdobnou konstrukci mají *niklokadmiové akumulátory* (NiCd), které jsou vhodné především pro malé proudy.

▽ 3.2.3. Palivové články

V *palivových člancích* vzniká elektrická energie při slučování plynného paliva (např. vodíku) s okysličovadlem (např. vzduchem nebo kyslíkem). Hořením při velkém tlaku se molekuly plynného paliva rozpadají a uvolněné elektrony se hromadí na *vodíkové elektrodě*. Tím se tato elektroda nabíjí *záporně*. *Kyslíková elektroda* je *kladná*. Palivové články proto patří také mezi elektrochemické články.

V tomto tzv. *kyslíko-vodíkovém palivovém článku* vzniká chemickou reakcí voda, která se odpařuje. Články se konstruují pro nízkou teplotu spalování (asi do 100 °C) a střední teplotu spalování (asi do 550 °C). Jejich elektrody jsou pórovité. Vodíková elektroda je z práškového karbonylového niklu. Kyslíková elektroda se vyrábí z různých oxidů. Teoreticky se v těchto článcích může měnit až 90 % tepla v elektrickou energii. Ve skutečnosti je to však méně. Palivový článek dodává stejnosměrné napětí přibližně 1 V.

△ *Poznámka:* Ke zdrojům napětí připojujeme elektrické obvody, takže ze zdrojů napětí odebíráme elektrický proud. Někdy proto hovoříme o *zdrojích proudu*. Zdrojem elektrického proudu je každý zdroj napětí, ze kterého se odebírá proud.

3.3. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Jaké druhy proudů a napětí znáte? Co je jednotkou proudu a napětí?
2. K čemu slouží zdroj napětí?
3. Čím se liší napětí na svorkách stejnosměrného zdroje napětí od napětí na svorkách střídavého zdroje napětí?
4. Jak se dělí napětí podle jeho číselné hodnoty? Mezi jaká napětí patří podle tohoto dělení napětí 220 V?
5. Které části má jednoduchý elektrický obvod? Vysvětlete jejich účel v obvodu.
6. Co se děje ve spotřebiči? Jmenujte pět různých spotřebičů a vysvětlete, jaké přeměny v nich probíhají.
7. Co je jmenovité napětí spotřebiče? Jaký vliv na spotřebič má překročení jeho jmenovitého napětí?
8. Čím je zprostředkováno vedení proudu mezi zdrojem napětí a spotřebičem?
9. Které druhy vodičů se používají v elektrotechnice a kde?
10. Vysvětlete, co je izolátor a co izolant.
11. Za jakých podmínek prochází proud elektrickým obvodem?
12. Načrtněte schéma uzavřeného obvodu a) se žárovkou, b) se zvonkem a zvonkovým tlačítkem.
13. Jakým směrem se pohybují elektrony v kovovém vodiči a jaký je dohodnutý směr proudu?
14. Proč se začala elektrotechnika rozvíjet teprve po objevu galvanických článků?
15. Jaká přeměna energie probíhá v elektrochemických článcích?

16. Jak je konstruován Voltův článek? Záviseí jeho a) napětí, b) proud na plošném obsahu ponořené části elektrod?
17. Jak je sestaven suchý článek? Rozeberte vybitý mnobčlánek a prohlédněte si jeho části.
18. Co je základní nevýhodou suchých článků ve srovnání s akumulátory? Objasněte nabíjení a vybíjení olověného akumulátoru.
19. Které části má ocelo-niklový akumulátor?
20. Proč se akumulátor nazývá sekundární článek?
- ▽
- △ 21. Jak je sestaven kyslíko-vodíkový palivový článek?

3.4. ELEKTRICKÝ ODPOR

3.4.1. Výpočet odporu

Uvedli jsme, že kovový vodič je tvořen obrovským počtem mikroskopických krystalků. Tyto krystalky obsahují velký počet atomů uspořádaných do krystalových mřížek. Společným znakem všech atomů je jejich kmitání kolem rovnovážné polohy.

Vzhledem k atomům kovů mají elektrony nepatrnou hmotnost. Volné elektrony při svém pohybu narážejí do jednotlivých atomů, a mění tak svůj směr. Dokud vodičem neprochází proud, je pohyb elektronů *neuspořádaný* (chaotický). Za delší dobu projde průřezem vodiče jedním směrem stejný počet elektronů, jaký projde opačným směrem. Elektrony z vodiče nevystupují.

Víme také, že připojí-li se konce vodiče ke zdroji napětí, uvedou se volné elektrony do *uspořádaného pohybu*, kdy na jedné straně do vodiče vstupují a na druhé z něho vystupují. Avšak srážky s atomy brzdí pohyb elektronů. Projevuje se *elektrický odpor* vodiče, zkráceně *odpor* (R). Jednotkou odporu je *ohm* (Ω). Odpor měříme *ohmmetrem*.

Poznámka: U většiny měřicích přístrojů je nula vlevo, na ohmmetru je však převážně na pravém konci stupnice. Vlevo je nekonečný odpor.

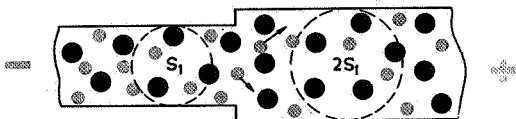
Pokus 1: Ohmmetrem měříme odpor několika metrů ocelového drátku s velmi malým průřezem. Zjišťujeme, jak odpor závisí na délce vodiče.

Z měření vyplývá, že *odpor vodiče je tím větší, čím je vodič delší*. Tento poznatek souhlasí s výkladem vedení proudu podle elektronové teorie. Čím delší je vodič, tím více srážek musí elektrony překonat při své cestě vodičem. Zvětšuje se tedy odpor vodiče.

Pokus 2: Měříme odpor drátu ze stejného materiálu, stejné délky, ale s dvojnásobným průřezem, než měl drát při předcházejícím pokusu.

Zjistíme, že ve srovnání s prvním pokusem je odpor drátu poloviční. Z dalších měření je zřejmé, že *odpor vodiče je tím menší, čím větší je jeho průřez.*

I tento poznatek vysvětlíme elektronovou teorií. Vzhledem k tomu, že průřez vodiče je dvojnásobný, prochází jednotkovým průřezem pouze poloviční počet elektronů (obr. 21). Srážek je méně.



Obr. 21. Znázornění závislosti odporu na průřezu vodiče

Pokus 3: Ocelový drátek se nahradí nikelinovým, který má stejné rozměry jako drátek při prvním pokusu.

Měřením zjistíme, že odpor vodiče je nyní větší. Odpor tedy závisí na *materiálu vodiče*. Tuto závislost vyjadřujeme *rezistivitou vodiče* (ρ). Rezistivita má pro různé látky různé hodnoty. Tyto hodnoty najdeme ve fyzikálních nebo elektrotechnických tabulkách. Číselná hodnota rezistivity je odpor vodiče dlouhého 1 m s průřezem 1 m² při teplotě 20 °C. Jednotkou rezistivity je *ohm metr* ($\Omega \cdot \text{m}$).

Poznámka: Je samozřejmé, že se neměří odpor vodiče s průřezem 1 m², ale změří se odpor vodiče menšího průřezu a rezistivita se vypočítá. Ohm metr je jednotka, ohmmetr je přístroj, nezaměňujte oba názvy.

Upozornění: V některých tabulkách, především starších, je rezistivita (dříve měrný odpor) uvedena v jednotce $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

Rezistivita vodiče závisí také na způsobu jeho zpracování. Tvářením za studena se rezistivita kovů zvětšuje, protože při tomto tváření vznikají v materiálu nepatrné trhlinky, které znesnadňují průchod elektronů. Naopak elektrolytickým čištěním (např. mědi) se odstraňují některé příměsi, a tím se rezistivita kovů zmenší.

Nejmenší rezistivitu má stříbro – $1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, měď má rezistivitu $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, hliník $2,70 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ a železo $9,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

Pro zvláštní účely se vyrábějí vodiče s větší rezistivitou, např. konstantan má rezistivitu $5,0 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ a nikelin $4,3 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$.

Všechny závislosti, které jsme poznali při pokusech, vyjádříme takto: Odpor R vodiče je přímo úměrný délce vodiče l a nepřímo úměrný průřezu vodiče S .

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

kde ρ je rezistivita vodiče

Příklad 1: Vypočítejte odpor měděného vodiče s průřezem 10 mm^2 , dlouhého $3,5 \text{ km}$.

$$\rho_{\text{Cu}} = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}, \quad l = 3,5 \text{ km} = 3,5 \cdot 10^3 \text{ m}, \quad S = 10 \text{ mm}^2 = 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$R = \rho \frac{l}{S} = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} \cdot \frac{3,5 \cdot 10^3 \text{ m}}{10^{-5} \text{ m}^2} = 5,95 \Omega$$

Odpor vodiče je přibližně $6,0 \Omega$.

Poznámka: Při výpočtech napíšeme nejprve všechny veličiny a vyjádříme je v jednotkách SI, tedy bez předpon. Výsledky zaokrouhlujeme na tolik platných číslic, kolik jich má nejméně přesné číslo, s nímž počítáme (v našem příkladu na dvě místa). Nulou na desetinném místě vyznačujeme, že jsme počítali s přesností na dvě platné číslice, tedy v intervalu $\langle 5,95; 6,05 \rangle$. Kdybychom nulu na místě desetin vynechali, mohlo číslo 6 vzniknout zaokrouhlením čísla 5,51 až 6,49. Nebudeme-li v dalších výpočtech pro zjednodušení psát všechny nuly za desetinnou čárkou, budeme předpokládat, že číslo je nejméně tak přesné jako ostatní čísla.

Příklad 2: Vypočítejte, jak dlouhý musí být konstantanový drát s průřezem $1,0 \text{ mm}^2$, aby jeho odpor byl 15Ω .

$$S = 1,0 \text{ mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2, \quad R = 15 \Omega, \quad \rho = 5,0 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$$

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

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{15 \Omega \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{5,0 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}} = 30 \text{ m}$$

Konstantanový drát musí být dlouhý 30 m .

Příklad 3: Odpor hliníkového pásu dlouhého $3,0 \text{ m}$ nesmí překročit $0,2 \text{ m}\Omega$. Jaký musí být jeho průřez?

$$l = 3,0 \text{ m}, \quad R = 0,2 \text{ m}\Omega = 2 \cdot 10^{-4} \Omega, \quad \rho = 2,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

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

$$S = \frac{\rho l}{R} = \frac{2,7 \cdot 10^{-8} \cdot 3,0}{2 \cdot 10^{-4}} \text{ m}^2 \doteq 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

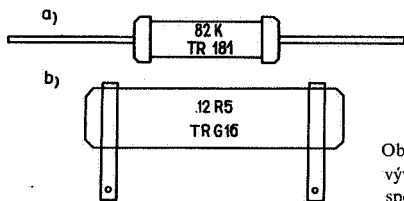
Průřez pásku musí být $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, tj. 400 mm^2 .

Poznámka: Při tomto výpočtu jsme použili druhý dovolený způsob zápisu jednotek. Dosadili jsme až výslednou jednotku. Nemáme však možnost kontrolovat jednotkami, že jsme dosadili správně. *Kontrola jednotkou*

$$[S] = \frac{\Omega \cdot \text{m} \cdot \text{m}}{\Omega} = \text{m}^2$$

ukazuje, že vztah je z hlediska jednotek správný, protože jednotkou obsahu je čtverečný metr.

V některých případech vznikají v obvodech nežádoucí odpory, např. v místech styku dvou vodičů ve svorkovnici nebo na kontaktech spínačů. Označujeme je společným názvem *přechodové odpory*.



Obr. 22. a) Rezistor s drátovými vývody; b) rezistor s kovovými sponami

3.4.2 Rezistory

V elektrotechnice se používají tzv. *rezistory*, tj. součástky vyráběné tak, aby měly přesně stanovený odpor (obr. 22).

Poznámka: Pro rezistory se zaváděl český název *odporník*, ale neujal se.

Odpory rezistorů jsou od desetin ohmu až po megaohmy. Při výrobě se dodržují určité *řady hodnot*. V nejjednodušší řadě E6 mají jmenovité odpory číselné hodnoty

1,0 1,5 2,2 3,3 4,7 5,6 6,8 8,2

a jejich násobky 10, 100, 1000 atd., např. $4,7 \text{ k}\Omega$ nebo $8,2 \text{ M}\Omega$, popř. 220Ω .

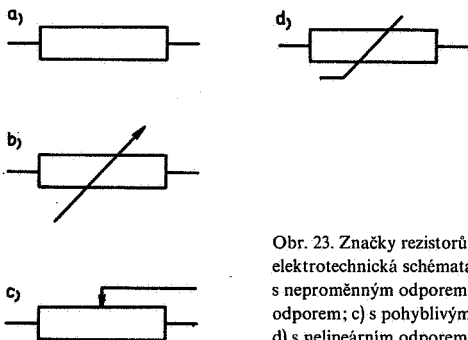
Na rezistorech se vyznačují také *odchylky*, které jsou pro řadu E6 $\pm 20\%$. V jiných řadách jsou odchylky 10 % nebo 5 %, popř. menší.

Rezistory se liší jednak *materiálem*, který vytváří požadovaný odpor, a jednak tvarem a *konstrukcí* vývodů, popř. i tím, že u některých lze požadovaný odpor nastavit.

Odporové vrstvy se nanášejí nejčastěji na válcové keramické tělísko. Rezistory mají drátové vývody (obr. 22a) nebo kovové spony (obr. 22b). Na některých rezistorech je ještě izolační vrstva, např. z bezbarvého laku.

Drátové rezistory tvoří odporový drát navinutý na keramickém tělísku, někdy krytý vrstvou tmelu nebo laku. Vývody jsou drátové nebo páskové, někdy mají posuvné odbočky.

Proměnný odpor mají *regulační drátové rezistory*. Pohybuje se po nich kontakt, kterým se mění délka odporového vodiče zapojeného do obvodu. Značky rezistorů pro elektrotechnická schémata jsou na obr. 23.



Obr. 23. Značky rezistorů pro elektrotechnická schémata: a) rezistor s neproměnným odporem; b) s proměnným odporem; c) s pohyblivým kontaktem; d) s nelineárním odporem

3.5. VODIVOST

O vodiči, který lépe vede proud, říkáme, že má větší *vodivost*. Vodivost vodiče G je určena vztahem

$$G = \frac{1}{R}$$

Vodivost je převrácená hodnota odporu. Čím je menší odpor vodiče, tím je větší jeho vodivost. Jednotkou vodivosti je siemens (S). Jeden siemens je vodivost elektrického vodiče s odporem jeden ohm. Siemens odvodíme dosazením do vztahu pro vodivost

$$S = \frac{1}{\Omega}$$

Příklad 4: Vypočítejte vodivost hliníkového vodiče s průřezem 4 mm^2 a délkou 350 m .

$$l = 350 \text{ m}, \rho = 2,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}, S = 4 \text{ mm}^2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$R = \rho \frac{l}{S} = 2,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{350}{4 \cdot 10^{-6}} \Omega = 2,36 \Omega$$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{2,36 \Omega} = 0,42 \text{ S}$$

Vodivost hliníkového vodiče je asi $0,4 \text{ S}$.

S využitím vodivosti můžeme zrychlit některé výpočty, se kterými se setkáme dále. Na kapesních kalkulátorech počítáme vodivost z odporu stisknutím tlačítka $[1/x]$. Vodivost se zpravidla neměří, ale počítá se z odporu.

Podobně jako rezistivitu můžeme pro každou látku určit její *konduktivitu* γ . Konduktivita vodiče se číselně rovná vodivosti vodiče s průřezem 1 m^2 , dlouhého 1 m , vyrobeného z této látky. Většinou se počítá z rezistivity příslušné látky. Platí totiž

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

Příklad 5: Určete konduktivitu hliníku

$$\rho = 2,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{2,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}} = 3,7 \cdot 10^7 \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} = 3,7 \cdot 10^7 \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

Konduktivita hliníku je $3,7 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$.

Při výpočtu jsme odvodili jednotku konduktivity *siemens na metr* ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$).

3.6. ZÁVISLOST ODPORU VODIČE NA TEPLOTĚ

Pokus: Svineme několik metrů tenkého ocelového drátu do šroubovice, připojíme jej ke svorkám ohmmetru a změříme odpor drátu. Potom drát rozžhavíme v plameni a znovu změříme jeho odpor.

Pokusem prokážeme, že *drát má při vyšší teplotě větší odpor*. Výsledek měření odpovídá elektronové teorii. Při vyšší teplotě vzrůstá vnitřní energie látky. Jednotlivé atomy mají větší rozkmit, a tím se zvětšuje počet jejich srážek s volnými elektrony. To vše znesnadňuje uspořádaný pohyb elektronů vodičem, a proto se při zvýšení teploty zvětšuje odpor vodiče.

- ▽ *Poznámka:* Zkrácení doby mezi srážkou elektronu s některým atomem v krystalové mřížce ovlivňuje především rozkmit atomů. Samy elektrony v zahřáté látce nemění svou střední rychlost. Za jedinou sekundu dojde při pokojové teplotě asi k 10^{15} srážkám, tedy k nepředstavitelnému počtu srážek elektronu s jinou částicí.

△ Vliv teploty na odpor vodiče vyjadřuje tzv. *teplotní součinitel odporu* α . Jednotkou teplotního součinitele odporu je *jedna na kelvin* (K^{-1}). Údaje o teplotním součiniteli odporu různých látek jsou v tab. 4. Pro další látky je vyhledáme ve fyzikálních nebo elektrotechnických tabulkách.

Tabulka 4. Teplotní součinitele odporu

Látka	α	Látka	α
stříbro	$4,1 \cdot 10^{-3} K^{-1}$	železo	$5,60 \cdot 10^{-3} K^{-1}$
měď	$4,3 \cdot 10^{-3} K^{-1}$	nikelin	$0,11 \cdot 10^{-3} K^{-1}$
zlato	$3,9 \cdot 10^{-3} K^{-1}$	konstantan	$0,03 \cdot 10^{-3} K^{-1}$
hliník	$4,3 \cdot 10^{-3} K^{-1}$		

Nepatrný teplotní součinitel odporu má konstantan ($\alpha = 0,03 \cdot 10^{-3} K^{-1}$). Jeho název vyplývá právě z toho, že má konstantní (tj. stálý) odpor při různých teplotách.

Podle řady měření platí pro závislost odporu vodiče na jeho teplotě vztah

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha \Delta\theta)$$

kde R_0 je odpor při počáteční teplotě,

R_{θ} odpor při zvýšené teplotě,

$\Delta\theta$ teplotní rozdíl,

α teplotní součinitel odporu.

Příklad 6: Hliníkové vedení má při teplotě 10 °C odpor 6,5 Ω. Jaký je jeho odpor při teplotě 70 °C?

$$R_0 = 6,5 \, \Omega, \Delta\vartheta = 70 \, ^\circ\text{C} - 10 \, ^\circ\text{C} = 60 \, \text{K}, \alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \, \text{K}^{-1}$$

$$R_\vartheta = R_0(1 + \alpha \Delta\vartheta) = 6,5 \, \Omega (1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \, \text{K}^{-1} \cdot 60 \, \text{K}) = 8,2 \, \Omega$$

Odpor vedení se zvětší na 8,2 Ω.

Ze změny odporu vodiče můžeme naopak zjistit jeho teplotu. Tento postup je běžný např. při kontrole růstu teploty vinutí motorů a cívek.

Příklad 7: Měděné vinutí cívky má při teplotě 20 °C odpor 2,7 Ω. Po zahřátí na provozní teplotu se zvětší odpor vinutí na 3,1 Ω. Jaká je provozní teplota cívky?

$$R_0 = 2,7 \, \Omega, R_\vartheta = 3,1 \, \Omega, \alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \, \text{K}^{-1}$$

$$R_\vartheta = R_0(1 + \alpha \Delta\vartheta)$$

$$\Delta\vartheta = \frac{R_\vartheta - R_0}{\alpha R_0} = \frac{3,1 - 2,7}{4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 2,7} \, \text{K} = 34,5 \, \text{K}$$

$$\vartheta = 20 \, ^\circ\text{C} + 34,5 \, ^\circ\text{C} = 54,5 \, ^\circ\text{C}$$

Provozní teplota cívky je asi 54 °C.

Vztah

$$\Delta\vartheta = \frac{R_\vartheta - R_0}{\alpha R_0}$$

upravíme pro měď částečným dosazením a dostaneme

$$\Delta\vartheta = 234 \, \text{K} \cdot \frac{R_\vartheta - R_0}{R_0}$$

V technice se podobný postup používá často, musíme si však zapamatovat větší počet čísel.

Teplotní součinitel odporu se v tabulkách udává pro teplotu 20 °C. S nepatrnými odchylkami platí i pro ostatní běžné teploty. Avšak při velmi nízkých teplotách, které se blíží nejnižší dosažitelné teplotě 0 K (tj. −273 °C), náhle mizí odpor některých kovů. Vodivost takto podchlazených kovů je obrovská a nazýváme ji *supravodivost*. Teplota, při které se supravodivost projeví, je *teplota supravodivosti*. Pro olovo je např. 7 K (tj. −266 °C), pro slitinu niobu a cínu je 18 K (tj. −255 °C).

V současné době se usilovně hledají slitiny, které by byly supravodivé při vyšších teplotách. Zatím je totiž chlazení kovů na teplotu supravodi-

vosti mnohem nákladnější než úspory vzniklé zmenšením odporu. Supravodivost podstatně zmenšuje ztráty při přenosu elektrické energie a umožňuje vývoj mnoha nových elektrotechnických zařízení.

- ▽ Supravodivost nebyla dlouho objasněna. Nyní ji vysvětlujeme tím, že při teplotě supravodivosti vznikají dvojice elektronů, které díky svému uspořádání procházejí látkou bez působení ostatních částic, takže mizí elektrický odpor látky. Supravodivost není obecnou vlastností všech kovů,
- △ objevuje se pouze u některých kovů a slitin.

3.7. ELEKTRICKÝ PROUD VE VODIČI

Seznámili jsme se s tím, že *proud* procházející *kovovým vodičem* je *proud volných elektronů*. Máme-li vodič s určitým průřezem, může jím procházet velmi málo elektronů (tedy nepatrný proud) nebo naopak značný počet volných elektronů (tzn. velký proud). Poměr mezi průměrným (středním) proudem I a průřezem S , kterým proud prochází, se nazývá *střední hustota proudu* a platí pro něj vztah

$$J = \frac{I}{S}$$

Jednotkou hustoty proudu je *ampér na čtverečný metr* ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$).

Hustota proudu se tedy zvětšuje tím, že se zvětší proud a zmenší průřez vodiče. S hustotou proudu se budeme setkávat později, protože ovlivňuje některé fyzikální veličiny spojené s průchodem proudu vodiči, např. při vyšší hustotě proudu se vodiče více zahřívají.

Příklad 8: V určitém druhu hliníkového izolovaného vodiče smí být maximální hustota proudu $6,8 \text{ MA} \cdot \text{m}^{-2}$. Jaký maximální proud smí při takové hustotě proudu procházet vodičem s průřezem 4 mm^2 ?

$$J = 6,8 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}, S = 4 \text{ mm}^2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$J = \frac{I}{S}$$

$$I = JS = 6,8 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 27 \text{ A}$$

Největší proud, který smí procházet vodičem, je 27 A.

Každý elektron, který volně prochází vodičem, přenáší určitý elektrický náboj. Proud I , který projde vodičem za dobu t , přenesení náboj

$$Q = It$$

Příklad 9: Z akumulátoru odebíráme po dobu 20 minut proud 2,5 A. Jaký náboj projde vodičem připojeným k akumulátoru?

$I = 2,5 \text{ A}$, $t = 20 \text{ min} = 1200 \text{ s}$

$$Q = It = 2,5 \text{ A} \cdot 1200 \text{ s} = 3000 \text{ A} \cdot \text{s} = 3000 \text{ C}$$

Vodičem projde náboj 3000 C.

Při výpočtu jsme zjistili, že náboj lze vyjádřit také s využitím jednotky *ampér sekunda* (A . s), o které platí

$$1 \text{ A} \cdot \text{s} = 1 \text{ C}$$

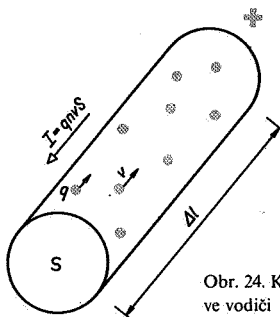
V technice se častěji používá jednotka ampér hodina (A . h).

$$1 \text{ A} \cdot \text{h} = 3600 \text{ A} \cdot \text{s} = 3600 \text{ C}$$

S údajem A . h se setkáváme na každém akumulátoru.

▽ Náboj, který se přenáší vodičem při průchodu proudu, umožňuje, abychom zjistili střední rychlost elektronů ve vodiči. Představíme si válcový vodič, jehož podstava má obsah S a jehož výška je Δl (obr. 24). V tomto vodiči projdou sledované volné elektrony za určitý čas vzdálenost mezi horní a dolní podstavou válce. Objem válce je

$$V = \Delta l S$$



Obr. 24. K určení střední rychlosti elektronů ve vodiči

Uvažujeme vodič s objemem 1 m^3 látky, která obsahuje n částic, jež přenášejí elementární náboj e . Počet částic v tělese tohoto objemu je

$$n_V = n \Delta l S$$

Předpokládáme, že se tyto částice vodičem pohybují usměrněným pohybem se stejnou střední rychlostí v . Potom Δl je dráha částice a v čase $\Delta t = \Delta l/v$ projdou všechny částice podstavou S a objemem.

Celkový náboj přemístěný volnými částicemi v čase Δt je

$$\Delta Q = qn \Delta l S$$

kde q je náboj jedné částice, např. volného elektronu.

Z toho proud vodičem je

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{qn \Delta l S}{\Delta t} = qnvS$$

protože

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

Pro proud tedy platí vztah

$$I = qnvS$$

Příklad 10: Vypočítejte střední rychlost usměrněného pohybu elektronů v mědi za předpokladu, že každý atom mědi uvolní jeden elektron. V 1 kg mědi je přibližně $9,2 \cdot 10^{24}$ atomů. Hustota mědi je $8920 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Hustota proudu ve vodiči je $10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$.

Nejprve určíme počet elektronů v 1 m^3 mědi.

$$n = 9,2 \cdot 10^{24} \text{ kg}^{-1} \cdot 8,92 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = 8,2 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

Pak pro rychlost odvodíme

$$J = 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}, \quad q = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$I = qnvS$$

$$J = \frac{I}{S} = qnv$$

$$v = \frac{J}{qn} = \frac{10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 8,2 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}} = 7,6 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Při hustotě proudu $10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ je střední rychlost uspořádaného pohybu elektronů asi $0,076 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Z výpočtu je zřejmé, že střední rychlost uspořádaného pohybu elektronů ve vodiči je neočekávaně malá. Při hustotě proudu $10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ je přibližně $0,27 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. Z uvedených vztahů je také patrné, že při větší střední hustotě

proudu se musí ve vodiči se stejným průřezem zvětšit střední rychlost uspořádaného pohybu elektronů. S těmito jevy souvisí odpor vodiče. Při zvětšení průřezu vodiče se při stejném proudu zmenší hustota proudu, a tím klesne i střední rychlost uspořádaného pohybu elektronů. To se pak projeví zmenšením odporu vodiče.

Poznámka: I když je usměrněný pohyb elektronů ve vodiči velmi pomalý, dávají se do usměrněného pohybu všechny volné elektrony v celém vodiči téměř okamžitě (podobně jako celým vodovodním potrubím začne protékat voda, když se na jeho konci otevře vodovodní kohout).

3.8. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Zopakujte, jaké je složení látek, především kovů.
2. Vysvětlete, jak podle elektronové teorie prochází vodičem proud.
3. Na čem závisí odpor vodiče? Vyjádřete tuto závislost matematickým vztahem.
4. V tabulkách vyhledejte, která z látek v nich uvedených má nejmenší rezistivitu a která největší. Jakou rezistivitu má a) měď, b) hliník?
5. Co je ohm metr a co ohmmetr?
6. Určete odpor měděného vodiče s průřezem $0,75 \text{ mm}^2$, dlouhého 1000 m.
7. Jak dlouhý nikelinový drát s průměrem 0,2 mm má odpor 80Ω ?
8. Nikelinový pásek široký 10 mm má tloušťku 0,5 mm. Jakou musí mít délku, aby jeho odpor byl $0,4 \Omega$?
- ▽ 9. Hmotnost měděného vodiče s průřezem $0,1 \text{ mm}^2$ je 0,3 kg. Určete odpor tohoto vodiče.
- △ 10. Hliníkový pás má průřez 25 cm^2 a hmotnost 270 kg. Jaký je jeho odpor?
- ▽ 11. Vodič dlouhý 1000 m má odpor $0,60 \Omega$. Jak se musí změnit jeho průřez, aby se jeho odpor zmenšil na $0,15 \Omega$?
- ▽ 12. Z určitého materiálu se vyrobí vodič dlouhý 300 m. Ze stejného materiálu se zhotoví 900 m vodiče, který má stejnou hmotnost jako drát dlouhý 300 m. V jakém poměru jsou odpory obou vodičů válcového tvaru?
- △ 13. Jaké hodnoty mají odpory rezistorů v řadě E6?
14. Jmenujte druhy rezistorů podle konstrukce a podle materiálu, ze kterého se vyrábějí.

15. Na rezistoru s posuvným kontaktem máte nastavit odpor $15\ \Omega$. Celý rezistor má délku vinutí odporového drátu $46\ \text{mm}$ a celkový odpor $22\ \Omega$. Do které jeho části nastavíte kontakt? Nakreslete náčrtek.
16. Jakou vodivost má železný drát, jehož odpor je a) $23\ \Omega$, b) $0,7\ \Omega$, c) $2\ \text{m}\Omega$?
17. Zjistěte konduktivitu stříbra, mědi a železa.
18. Jakou vodivost má měděný vodič s průřezem $6\ \text{mm}^2$, dlouhý $65\ \text{m}$?
19. Jak dlouhý musí být měděný vodič s průřezem $0,01\ \text{mm}^2$, aby měl vodivost $1,0\ \text{S}$?
20. Jakou konduktivitu má válcový vodič dlouhý $79\ \text{m}$, s průřezem $0,6\ \text{mm}^2$, který má odpor $55\ \Omega$? Z jakého je materiálu?
21. Vzhledem k nedostatku mědi se měděná vedení nahrazují hliníkovými. Průřez měděného vedení byl $4\ \text{mm}^2$. Jakým průřezem z normalizované řady $2,5\ \text{mm}^2$, $4\ \text{mm}^2$, $6\ \text{mm}^2$ a $10\ \text{mm}^2$ hliníkových vodičů lze nahradit měděný vodič, aby odpor vedení zůstal přibližně stejný?
22. Měděné vedení má při teplotě $-22\ ^\circ\text{C}$ odpor $12\ \Omega$. Jak se změní jeho odpor při teplotě $28\ ^\circ\text{C}$?
23. Vypočítejte odpor hliníkového vodiče s průřezem $10\ \text{mm}^2$, dlouhého $120\ \text{m}$ a) při teplotě $+20\ ^\circ\text{C}$, b) při teplotě $-20\ ^\circ\text{C}$.
24. Odpor měděného vinutí motoru při teplotě $+20\ ^\circ\text{C}$ je $2,6\ \Omega$. Po zahřátí na provozní teplotu se zvětší odpor vinutí na $3,2\ \Omega$. Jaká je provozní teplota vinutí?
25. Teplota cívky z měděného drátu s průměrem $0,6\ \text{mm}$, dlouhého $230\ \text{m}$ se při provozu zvýší z $20\ ^\circ\text{C}$ na $80\ ^\circ\text{C}$. Jak se zvětší odpor vinutí cívky?
26. Za jakých podmínek se projevuje supravodivost látek?
- ▽
△ 27. Čím vysvětlujeme vznik supravodivosti?
28. Určete hustotu proudu ve vodiči s průřezem $2,5\ \text{mm}^2$, kterým prochází proud $10\ \text{A}$.
29. Při hustotě proudu $3 \cdot 10^6\ \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ má vodičem procházet proud $16\ \text{A}$. Jaký musí být průřez tohoto vodiče?
30. Vodičem prochází proud $0,5\ \text{A}$ po dobu 30 minut. Jaký náboj přenesou za tuto dobu volné elektrony ve vodiči?
31. U automobilu zůstanou omylem rozsvíceny žárovky, kterými prochází proud $3,5\ \text{A}$. Akumulátorová baterie může dodat $40\ \text{A} \cdot \text{h}$. Za jakou dobu se vybije?
- ▽
△ 32. Jaká je střední rychlost usměrného pohybu elektronů v měděném vodiči při hustotě proudu $10^5\ \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$?

3.9. OHMŮV ZÁKON

Ze základní školy znáte *Ohmův zákon*, který vyjadřuje vztah mezi napětím a proudem při konstantním (tj. stálém) odporu vodiče.

Napětí U mezi konci vodiče s konstantním odporem R je přímo úměrné proudu I , který prochází vodičem.

$$U = RI$$

Tento vztah ověříme pokusem. V obvodu podle obr. 25 zvětšujeme proud obvodem. Kolikrát větší proud prochází, tolikrát větší napětí musí být na svorkách rezistoru.

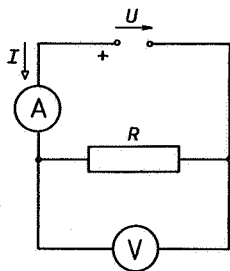
Proud I vodičem s konstantním odporem R je přímo úměrný napětí U mezi konci vodiče

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

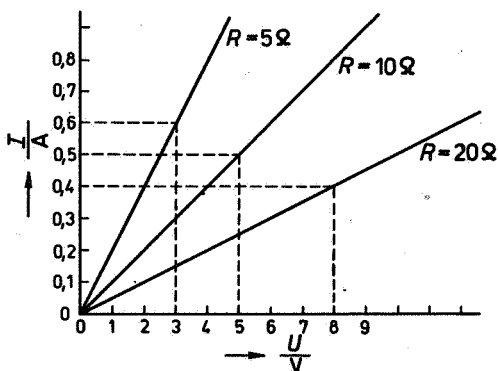
Obě tyto závislosti znázorňuje graf na obr. 26. Závislost proudu na napětí je přímková, tedy *lineární*. Říkáme, že *Ohmův zákon platí pro obvody s lineárním odporem*. Později poznáte, že odpory mohou být i nelineární. Pro takové Ohmův zákon neplatí.

Další úpravou dostaneme vztah

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



Obr. 25. Obvod pro ověření Ohmova zákona pro malý odpor



Obr. 26. Graf lineární závislosti proudu na napětí

Pomocí tohoto vztahu vypočítáme odpor vodiče z proudu, který prochází při daném napětí vodičem. Nesmíme jej však vykládat jako závislost odporu na proudu nebo na napětí. Odpor je závislý na délce a průřezu vodiče a na materiálu, popř. na teplotě. Nemění-li se teplota vodiče, zůstává odpor stejný, i když vodičem vůbec neprochází proud.

Ze vztahu

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

vychází definice jednotky odporu. Jeden *ohm* je odpor vodiče, v němž stále napětí jednoho voltu mezi konci vodiče vyvolá proud jednoho ampéru, tedy

$$\Omega = \frac{V}{A}$$

Původně se odpor určoval výhradně výpočtem z naměřeného napětí a proudu. Od rozšíření ohmmetrů se již výpočty odporu nepoužívají tak často, ale budeme se s nimi setkávat.

Ohmův zákon je základní zákon elektrotechniky, a proto si jej procvičíme na příkladech.

Příklad 11: Rezistorem s odporem $6,8 \text{ k}\Omega$ má procházet proud 20 mA . Jaké napětí musí být mezi vývody rezistoru?

$$R = 6,8 \text{ k}\Omega = 6,8 \cdot 10^3 \Omega, I = 20 \text{ mA} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$U = RI = 6,8 \cdot 10^3 \Omega \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 136 \text{ V}$$

Mezi vývody rezistoru musí být napětí přibližně 140 V .

Příklad 12: Jaký proud prochází topnou spirálou vaříče s odporem 50Ω při napětí 220 V ?

$$U = 220 \text{ V}, R = 50 \Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220 \text{ V}}{50 \Omega} = 4,4 \text{ A}$$

Topnou spirálou vaříče prochází proud $4,4 \text{ A}$.

Příklad 13: Vypočítejte odpor rezistoru, kterým má při napětí 12 V procházet proud $30 \mu\text{A}$.

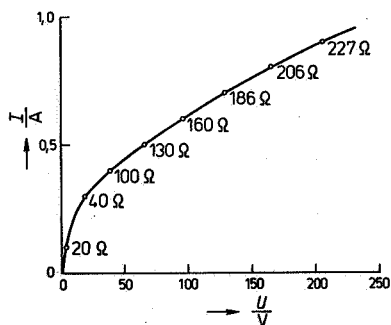
$$U = 12 \text{ V}, I = 30 \mu\text{A} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12 \text{ V}}{30 \cdot 10^{-6} \text{ A}} = 0,4 \cdot 10^6 \Omega = 400 \text{ k}\Omega$$

Rezistor má odpor $400 \text{ k}\Omega$.

Nelineární odpory jsou odpory, jejichž hodnota se mění v závislosti na jiných fyzikálních veličinách, např. (jak jsme již poznali) na teplotě. Odpor vlákna žárovky pro různé teploty je na obr. 27. Je zřejmé, že studené vlákno žárovky má mnohem menší odpor než rozžhavené vlákno.

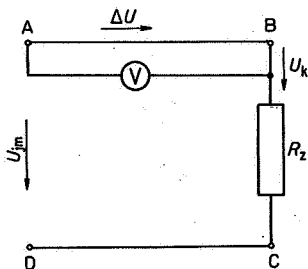
Poznáte také, že za určitých podmínek nevede zvýšení napětí ke zvětšení proudu. Závislost proudu na napětí u nelineárních odporů není přímková (odtud název nelineární). Před výpočtem proto musíme vždy zkoumat, zda je odpor lineární nebo nelineární.



Obr. 27. Graf nelineární závislosti proudu na napětí (pro žárovku, u níž se mění teplota vlákna)

3.10. ÚBYTEK NAPĚTÍ VE VODIČI

Pokus: Sestavíme obvod podle obr. 28. Vodič z odporového drátu napneme mezi svorky A a B. Ke svorkám A a D připojíme zdroj napětí. Mezi svorkami B a C zařadíme rezistor s odporem R_z , tzv. *zátěž*. Měříme napětí mezi svorkami A a B. Odpor vedení mezi svorkami C a D považujeme za zanedbatelný.



Obr. 28. Úbytek napětí ve vodiči (místo U_{jm} má být U_N)

Napětí u zdroje (tj. mezi svorkami A a D) je *jmenovité napětí* U_N . Měřením jsme zjistili, že napětí U_k ¹⁾ mezi svorkami B a D je menší než jmenovité. Rozdíl mezi jmenovitým napětím a napětím v místě měření je *úbytek napětí* ve vodiči

$$\Delta U = U_N - U_k$$

Pokus opakujeme, ale měníme odpor R_z rezistoru, tedy zátěž. Zjistíme, že *při větší zátěži je úbytek napětí ve vodiči větší*. Dále měníme délku vodiče, a tím i jeho odpor. *Čím je odpor vodiče větší, tím větší je v něm úbytek napětí*.

Z pokusů je zřejmé, že úbytek napětí závisí na odporu vodiče a na proudu, který prochází vodičem. Z Ohmova zákona vyplývá, že k tomu, aby vodičem prošel proud I , musí být mezi jeho konci napětí, které označíme ΔU . O toto napětí se sníží jmenovité napětí.

$$\Delta U = RI$$

V elektrotechnice se setkáte s názvem *vedení*. Tímto názvem se označují vodiče v obvodech. Pro stejnosměrný proud se používá *dvouvodičové vedení*. Délka vodičů ve dvouvodičovém vedení se obvykle rovná dvojnásobku délky jednoho vodiče, např. vedení 100 m dlouhé má vodiče dlouhé 200 m. U vedení mluvíme o *úbytku napětí* ve vedení.

Poznámka: Při pokusu jsme použili také dvouvodičové vedení, ale vodič z odporového drátu měl mnohem větší odpor než druhý vodič, a proto jsme mohli odpor druhého vodiče zanedbat. Nejčastěji však mají oba vodiče dvouvodičového vedení stejný odpor.

Úbytek napětí je nežádoucí jev, především v rozvodných sítích. Při dlouhém vedení a značném proudu je úbytek napětí tak velký, že ohrožuje chod strojů a přístrojů.

Příklad 14: Dvouvodičové vedení dlouhé 400 m je z hliníkového vodiče s průřezem 6 mm². Na jeho konci je spotřebič, kterým prochází proud 16 A. Jaký je úbytek napětí ve vedení? Jaké je napětí na konci vedení, je-li jmenovité napětí 230 V?

¹⁾ Tato značka se používá také pro napětí nakrátko. Zde se napětím U_k rozumí napětí na konci vedení.

$$\varrho = 2,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}, l = 2 \cdot 400 \text{ m} = 800 \text{ m}, S = 6 \text{ mm}^2 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2, I = 16 \text{ A}$$

$$R = \varrho \frac{l}{S} = 2,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{800}{6 \cdot 10^{-6}} \Omega = 3,6 \Omega$$

$$\Delta U = RI = 3,6 \cdot 16 \text{ V} = 57,6 \text{ V}$$

$$U_k = U_N - \Delta U = 230 \text{ V} - 58 \text{ V} = 172 \text{ V}$$

Vypočítaný úbytek napětí ve vedení je téměř 58 V, na konci vedení by bylo napětí 172 V. To je nepřipustný úbytek, a proto musíme pro rozvod použít vodič s větším průřezem. Např. při průřezu 35 mm² by byl úbytek napětí jen 10 V.

Při napětí několik set tisíc voltů je úbytek napětí 58 V ovšem zanedbatelný. Proto se zavádí veličina *relativní úbytek napětí* Δu , která vyjadřuje poměr úbytku napětí ΔU ke jmenovitému napětí U_N .

V našem příkladu je relativní úbytek napětí

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_N} = \frac{58 \text{ V}}{230 \text{ V}} = 0,25, \text{ tj. } 25\%$$

Na elektrických vedeních se zpravidla povoluje relativní úbytek napětí do 5%, což odpovídá napětí asi 10 V v příkladu 14.

3.11. ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU NA LIDSKÝ ORGANISMUS

Lidský organismus je velmi citlivý na účinky elektrického proudu (tj. účinky fyziologické). Měřením bylo zjištěno, že mnoho procesů v živých organismech je řízeno nepatrnými proudy (řádu mikroampérů), které vznikají při velmi malých napětích. Malé proudy, jejichž průchod organismem je kontrolován, lze využít v lékařství. Připomeňme např. vyšetřování některých chorob (sledování srdeční činnosti kardiografem atd.) nebo léčebné metody (např. řízení rytmu srdečních stahů kardiostimulátorem).

V elektrotechnice si musíme uvědomit, že průchod elektrického proudu živým organismem vyvolává změny, které ohrožují jeho funkci, tj. zdraví a život člověka. Nejčastějšími *příčinami úrazů* elektrickým proudem jsou nevědomost a neznalost možného nebezpečí, nedodržování předpisů a zásad bezpečnosti a hygieny práce a podcenění nebezpečí. K úrazům elektrickým proudem může dojít dvojím způsobem:

a) při dotyku s živou částí, tj. částí elektrického zařízení pod napětím (při jednopólovém nebo vícepólovém – obvykle dvoupólovém dotyku),

b) při dotyku s neživou částí (kostry, kryty a kovové konstrukce), které mohou být pod napětím např. při průrazu, tj. při poškození izolace, apod. Následky úrazů mohou být také dvoji. Některé následky znamenají *bezprostřední ohrožení života* a vyžadují okamžitou pomoc (zástava srdeční činnosti a dýchání, ztráta vědomí a porucha krevního oběhu, dýchací potíže aj.). Další následky mohou být vážné, ale přímo *bezprostředně neohrožují život* (křeče a ochrnutí, popáleniny tkáně a rozklad buněk, úrazy způsobené pádem a leknutím apod.). Na důsledky úrazu elektrickým proudem má velký vliv celkový stav postiženého, který je ovlivňován únavou, chorobou, nervozitou apod., ale i věkem, alkoholem apod. Děti a mladiství snášejí důsledky úrazu mnohem hůře než dospělí. Odpor lidského těla značně kolísá, např. při vlhké pokožce může být 2 k Ω , při suché je větší než 5 k Ω . Větší odpor naměříme mezi dlaněmi rukou, je-li na nich zrohovatělá pokožka. Účinky elektrického proudu závisejí zejména na tom, kterou částí těla proud prochází a po jakou dobu je tato část proudem ohrožována. Např. průchod proudu z levé ruky do nohou je nebezpečnější než průchod proudu z pravé ruky, protože proud prochází srdcem.

Sledujeme-li fyziologické účinky, pociťujeme brnění a pálení (při proudu do 4 mA) nebo trnutí dlaní a rukou, které přechází v křeče (při proudu 4 mA až 7 mA).

Proudy 10 mA až 25 mA vyvolají křeče a postižený se nemůže z obvodu uvolnit. Silné a bolestivé křeče a nepravidelnosti v činnosti svalstva jsou důsledkem proudů do 60 mA; proudy nad 100 mA mohou vyvolat nepravidelnou činnost a zástavu srdce.

Podle normy se za *bezpečný proud* považuje *střídavý proud do 10 mA s kmitočtem 10 Hz až 1 kHz* a *stejnoseměrný proud do 25 mA*. Bezpečná napětí uvedená v tabulce 5 jsou dána prostředím, které rozdělujeme na *prostory*

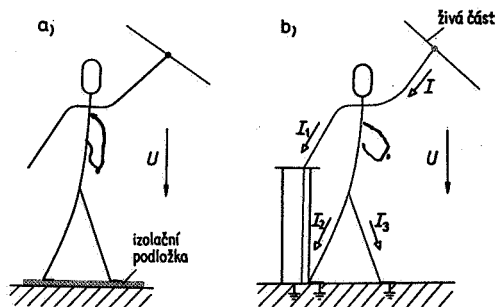
Tabulka 5. Bezpečná napětí mezi zemí a vodičem

Prostory s prostředím	Střídavé napětí	Stejnoseměrné napětí
bezpečným	do 50 V	do 100 V
nebezpečným	do 24 V	do 60 V
zvlášť nebezpečným	do 12 V	do 24 V

s prostředím bezpečným (suché místnosti, např. obývací pokoje), nebezpečným (vlhké místnosti, např. koupelny) a zvlášť nebezpečným (mokré prostředí, např. prádelny).

Práce na elektrických zařízeních napájených vyšším napětím než bezpečným, kde pracovník přichází do bezprostředního styku s vodiči pod napětím nebo do jejich značné blízkosti, je dovolena jen pracovníkům s předepsanou kvalifikací, podmíněnou složením předepsané zkoušky.

Vzhledem k tomu, že země je dobrým vodičem, musí se pracovník při práci v rozvodných soustavách spojených se zemí chránit před nebezpečným dotykem (obr. 29a). Ochrany před nebezpečným dotykem (tj. ochrany živých i neživých částí elektrických zařízení) jsou důležitou součástí všech elektrických obvodů. Živé části se chrání izolací, krytem, polohou a zábranou, neživé části se chrání např. nulováním a zemněním (podrobněji popíšeme později).



Obr. 29. a) Izolace těla od země; b) průchod proudu tělem

Nebezpečí úrazu elektrickým proudem lze zmenšit také tím, že používáme ochranné izolační rukavice, pryžové přezuvky, pryžové izolační koberce a další ochranné pomůcky a prostředky.

Při práci na zařízeních pod napětím nebo v jejich blízkosti se vyvarujeme zejména současného dotyku živé a neživé části zařízení (obr. 29b). V blízkosti živých částí s nebezpečným napětím nepracujeme s obnaženými částmi těla (v krátkých rukávech, s vyhrnutými nohavicemi apod.) a nepoužíváme kovové náramky, řetízky a prsteny.

Při práci na elektrických zařízeních dodržujeme všechny bezpečnostní předpisy a řídíme se návody výrobců spotřebičů i pokyny vedoucího pracovníka.

Dojde-li k úrazu elektrickým proudem, postupujeme rychle a s rozvahou. Postiženého *vyprostíme* z obvodu (vypnutím proudu, přerušením vodiče nebo odtažením), snažíme se *obnovit přerušenou činnost srdce a obnovit dýchání*. Přivoláme *lékařskou pomoc*, ale v oživovacích pokusech pokračujeme až do příchodu lékaře. Je také třeba *zajistit nebezpečný úsek elektrického zařízení*, popř. uvědomit odpovědného pracovníka organizace, která má zařízení ve správě.

3.12. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Jaké napětí musí být mezi konci rezistoru s odporem $60\ \Omega$, aby jím procházel proud $0,2\ \text{A}$?
2. Na jaké napětí je konstruován elektrický vaříč, jehož topnou spirálou s odporem $5\ \Omega$ prochází proud $2,4\ \text{A}$?
3. Za určitých podmínek má tělo mezi hřbety rukou odpor $4\ \text{k}\Omega$. Podle Ohmova zákona určete bezpečné střídavé napětí pro tyto podmínky.
4. Rezistor s odporem $150\ \Omega$ je připojen ke zdroji napětí $24\ \text{V}$. Jaký proud jím prochází?
5. Na žárovce je údaj $3,5\ \text{V}$ a $0,1\ \text{A}$. Určete odpor jejího vlákna při provozní teplotě.
6. Zásuvkový obvod je jištěn pojistkou $10\ \text{A}$. Můžete k němu připojit topné těleso s odporem $27\ \Omega$? Napětí v obvodu je $220\ \text{V}$.
7. Při poruše kleslo napětí v elektrorozvodné síti na jednu třetinu. Jak se změnil proud procházející spotřebiči, jestliže se jejich odpor nezměnil?
8. Spirálou elektrického vaříče prochází při napětí $220\ \text{V}$ proud $4,4\ \text{A}$. Jaký je odpor spirály?
9. Topná spirála z nikelinu má při teplotě $20\ ^\circ\text{C}$ odpor $50\ \Omega$. Jaký proud jí bude procházet při napětí $220\ \text{V}$ a při teplotě $1300\ ^\circ\text{C}$?
10. Ampérmetr má rozsah $600\ \text{mA}$. Můžeme jím měřit proud, který prochází při napětí $60\ \text{V}$ rezistorem s odporem $220\ \Omega$?
11. Při napětí $12\ \text{V}$ prochází rezistorem proud $0,5\ \text{A}$. Jaký proud prochází stejným rezistorem při zvýšení napětí na $20\ \text{V}$?
12. Na kontaktech přepínače je při proudu $96\ \text{A}$ úbytek napětí $0,2\ \text{V}$. Jaký je přechodový odpor mezi kontakty?

13. Sestrojte graf závislosti proudu na napětí pro lineární odpor $22\ \Omega$.
14. Jaký úbytek napětí je v měděném vodiči s průřezem $10\ \text{mm}^2$, dlouhém $350\ \text{m}$, při proudu $25\ \text{A}$?
15. Měděné dvou vodičové vedení s průřezem $10\ \text{mm}^2$ má délku $570\ \text{m}$. Na začátku vedení je napětí $230\ \text{V}$. Jaké napětí je na spotřebiči u konce vedení, prochází-li vedením proud $19\ \text{A}$?
16. Proč nezávisí odpor kovového vodiče na napětí ani na proudu, který vodičem při stálé teplotě prochází?
17. Uvedte příklad lineárního a nelineárního odporu. Načrtněte graf závislosti proudu na napětí pro nelineární odpor.
18. Uvedte nejčastější příčiny úrazů elektrickým proudem. Jak k úrazu dojde?
19. Jaké jsou následky úrazů elektrickým proudem a jaké jsou zásady první pomoci při úrazech elektrickým proudem?
20. Vyjmenujte ochrany před nebezpečným dotykem používané u elektrických zařízení, ochranné pomůcky a prostředky.

3.13. ELEKTRICKÁ PRÁCE, ELEKTRICKÝ VÝKON

3.13.1. Elektrická práce

Elektrická práce je mírou přeměny elektrické energie na jiné druhy energie. Elektrická práce se vykonává, přesunujeme-li náboj Q mezi dvěma místy, mezi nimiž je napětí U

$$| \quad W = QU$$

Protože

$$Q = It$$

je elektrická práce

$$| \quad W = UIt$$

Elektrickou práci tedy vyjadřujeme jako *součin napětí, proudu a doby*, po které se práce koná. Stejně jako pro mechanickou práci používáme pro elektrickou práci jednotku *joule* (J).

Poznámka: Pro práci se dříve používala značka *A*. V elektrotechnické i běžné praxi se častěji používá jako jednotka práce watt sekunda (W . s), popř. její násobky watt hodina (W . h) a kilowatt hodina (kW . h). Platí vztah $1\ \text{J} = 1\ \text{W} \cdot \text{s}$ (viz odvození na str. 61).

Příklad 15: Vypočítejte elektrickou práci, kterou spotřebuje zařízení, jímž při napětí 24 V prochází proud 2,1 A po dobu 25 minut.

$$U = 24 \text{ V}, I = 2,1 \text{ A}, t = 1500 \text{ s}$$

$$W = UIt = 24 \text{ V} \cdot 2,1 \text{ A} \cdot 1500 \text{ s} = 75\,600 \text{ J} = 75,6 \text{ kJ}$$

Zařízení spotřebuje práci přibližně 76 kJ.

V běžném vyjadřování se často mluví o spotřebě elektrické energie. Jde však o dodanou práci, kterou zařízení získává přeměnou elektrické energie.

3.13.2. Elektrický výkon

Z fyziky víte, že pro výkon platí vztah

$$P = \frac{W}{t}$$

Výkon P v obvodu stejnosměrného proudu je přímo úměrný práci W a ne-
přímo úměrný době t , po kterou se práce koná. Dosazením do tohoto vztahu dostaneme

$$P = \frac{UIt}{t} = UI$$

Elektrický výkon při stálém stejnosměrném proudu v obvodu se rovná součinu proudu procházejícího vodičem a napětí mezi konci vodiče.

Jednotkou výkonu je watt (W). Jeden watt je výkon, při němž se rovnoměrně vykoná práce jednoho joulu za jednu sekundu.

S využitím wattu se definuje jednotka SI volt: Jeden volt je napětí mezi konci vodiče, do něhož stálý proud jeden ampér dodává výkon jednoho wattu, tedy

$$V = \frac{W}{A}$$

Elektrický výkon měříme wattmetrem. Je to přístroj, který současně měří napětí a proud. Podrobněji jej poznáte později.

Úpravami podle Ohmova zákona dostaneme pro elektrický výkon další vztahy. Po dosazení

$$U = RI$$

dostaneme vztah

$$P = UI = IRI = RI^2$$

Po dosazení

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

dostáváme

$$P = UI = U \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

Lze tedy psát

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

Údaj o výkonu najdeme na rezistorech. Uvádí se jim *ztrátový výkon*, který se smí v rezistoru změnit na teplo. Dlouhodobé překročení ztrátového výkonu vede ke zničení rezistoru.

Příklad 16: Na rezistoru je údaj 160Ω a 2 W . Na jaké nejvyšší napětí smíme tento rezistor připojit?

$R = 160 \Omega$, $P = 2 \text{ W}$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$U = \sqrt{PR} = \sqrt{2 \cdot 160} \text{ V} = 17,9 \text{ V}$$

Mezi konci rezistoru nesmí být napětí vyšší než 18 V .

Výkon elektrických strojů a přístrojů se udává na štítku stroje. Je od miliwattů (např. u přenosných rozhlasových přijímačů) až po tisíce megawattů (u elektráren).

Z elektrického výkonu můžeme vypočítat *elektrickou práci*. Protože $P = UI$, je

$$W = UI t = Pt$$

Dosazením jednotek dostáváme pro jednotku práce

$$J = W \cdot s$$

Jednotka *joule* se tedy rovná jednotce *watt sekunda*. Častěji než *watt sekunda* se používá její násobek, *kilowatt hodina* ($\text{kW} \cdot \text{h}$). Platí pro ni převodní vztah

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3\,600\,000 \text{ W} \cdot \text{s} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

Jednotka *kilowatt hodina* se běžně používá při účtování poplatků za elektrickou práci podle údajů elektroměru.

3.13.3. Příkon a výkon, účinnost

U elektrických strojů a přístrojů odlišujeme výkon, který spotřebiči dodáváme, tzv. *příkon* P_1 , a *užitečný výkon* P_2 . Užitečný výkon (někdy zkráceně jen výkon) je výkon, který dodává spotřebič. Žárovka s příkonem 100 W dodává světelný výkon asi 10 W, tj. 90 W se v ní neúčelně mění v teplo.

Poměr výkonu a příkonu je *účinnost* η [éta] spotřebiče

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Účinnost se také udává v procentech.

Rozdíl mezi příkonem a výkonem tvoří *ztráty*, tj. neužitečně přeměněný výkon. V žárovce jsou tedy ztráty kolem 90 %. Většina elektrických zařízení má však ztráty malé.

Při kolísavém výkonu nebo příkonu uvažujeme jednak *okamžitý výkon* p (popř. okamžitý příkon) a jednak *průměrný* neboli *střední příkon* P_s . Účinnost se obvykle počítá z průměrných hodnot.

Příklad 17: Určete příkon elektrického vařiče, kterým při napětí 220 V prochází proud 5,5 A.

$$U = 220 \text{ V}, I = 5,5 \text{ A}$$

$$P_1 = UI = 220 \text{ V} \cdot 5,5 \text{ A} = 1210 \text{ W} \doteq 1,2 \text{ kW}$$

Příkon vařiče je 1,2 kW.

Příklad 18: Elektrické zařízení dodá za jednu hodinu práci 4,2 MJ při účinnosti 0,53. Jaký je příkon tohoto zařízení?

$$t = 1 \text{ h} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ s}, \eta = 0,53, W = 4,2 \text{ MJ} = 4,2 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$P_2 = \frac{W}{t} = \frac{4,2 \cdot 10^6 \text{ J}}{3,6 \cdot 10^3 \text{ s}} \doteq 1,17 \cdot 10^3 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{1,17 \cdot 10^3 \text{ W}}{0,53} = 2,2 \cdot 10^3 \text{ W} = 2,2 \text{ kW}$$

Příkon zařízení je přibližně 2,2 kW.

Příklad 19: Racionalizačními opatřeními se podařilo zmenšit příkon zařízení z 18 kW na 14 kW. Zařízení je v provozu průměrně 8 hodin denně a 260 pracovních dní ročně. Vypočítejte roční úspory při ceně 0,24 Kčs za 1 kW . h.

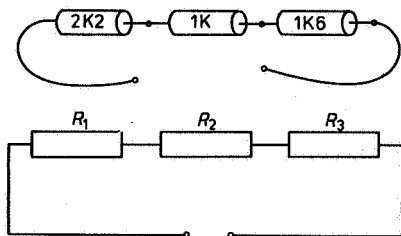
$$t = 8 \text{ h} \cdot 260 = 2080 \text{ h}$$

$$4 \text{ kW} \cdot 2080 \text{ h} \cdot 0,24 \frac{\text{Kčs}}{\text{kW} \cdot \text{h}} = 1996,80 \text{ Kčs}$$

Roční úspora je téměř 2000 Kčs.

Poznámka: Vzhledem k tomu, že jsme dosazovali cenu za kilowatt hodinu, dosadili jsme i příkon v kilowatt hodinách a nepřeváděli jsme jej na joule. Tím se výpočet zrychlil.

Údaje o příkonu jsou na štítcích strojů a přístrojů, nebo se uvádějí v návodu. Příkony jsou často normalizované, např. žárovky mají příkony 15 W, 25 W, 40 W, 60 W, 75 W, 100 W atd.



Obr. 30. Sériové řazení rezistorů

3.14. ŘAZENÍ REZISTORŮ

● 3.14.1. Sériové řazení rezistorů

Při *sériovém řazení* (obr. 30) se rezistory spojují *za sebou*.

Pokus: Spojíme tři drátové rezistory za sebou (tj. sériově) a měříme a) jejich výsledný odpor, b) proud, který prochází jednotlivými rezistory.

Pokusem zjistíme, že výsledný odpor všech sériově řazených rezistorů se rovná *součtu jejich odporů*

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

Tento zápis znamená, že počet sčítaných odporů může být libovolný.

- ▼ Vztah, který jsme zjistili pokusem, můžeme odvodit výpočtem. Je zřejmé, že při sériově řazených drátových rezistorech bychom mohli jejich drát spojit v jeden celek. Délka drátu by potom byla $l = l_1 + l_2 + l_3$ a jeho odpor by byl

$$R = \rho \frac{l_1 + l_2 + l_3}{S} = \rho \frac{l_1}{S} + \rho \frac{l_2}{S} + \rho \frac{l_3}{S} = R_1 + R_2 + R_3$$

- ▲ Přitom jsme předpokládali, že jde o drát ze stejného materiálu se stejným průřezem.

Měřením zjistíme, že při sériovém řazení prochází celým obvodem stejný proud

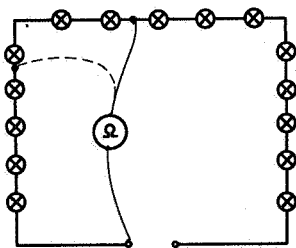
$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

Pro více rezistorů řazených sériově dostáváme vztah

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

kde I je celkový proud a $I_1, I_2, \dots, I_n$ jsou proudy procházející jednotlivými rezistory. Tento poznatek zdůvodníme: V žádné části obvodu, ve které jsou pouze součástky s odporem, se nemohou elektrony hromadit. Proto musí celým obvodem se sériově řazenými rezistory procházet stejný proud. Přerušení proudu v libovolné části obvodu způsobí, že celým obvodem sériově řazených rezistorů přestane procházet proud. Tento poznatek využíváme při hledání závad v elektrických obvodech se sériově řazenými spotřebiči. Sériově se např. řadí žárovky na vánočním stromku. Přerušení obvodu způsobí, že nesvítí žádná žárovka.

Poznámka: Místo poruchy zjistíme nejsnáze ohmmetrem, který připojíme v obvodu bez napětí mezi začátek obvodu a jeho střed (obr. 31). Ukáže-li ohmmetr nekonečný odpor, je tato část obvodu přerušena. V opačném případě musí být přerušena druhá část obvodu. Přerušenou část obvodu



Obr. 31. Hledání poruchy v obvodu se sériově řazenými žárovkami

opět rozdělíme na polovinu a zase vyhledáme přerušenou část. Takto postupujeme tak dlouho, až zjistíme, kde je obvod přerušen. Vždy se přesvědčíme, že druhá část obvodu je v pořádku. Ušetříme si nová měření pro případ, že je obvod přerušen na více místech.

Příklad 20: Určete výsledný odpor čtyř sériově řazených rezistorů s odpory $15\ \Omega$, $22\ \Omega$, $68\ \Omega$ a $100\ \Omega$. Jaký proud jimi prochází, jsou-li konce obvodu připojeny ke zdroji napětí 12 V ?

$$R_1 = 15\ \Omega, R_2 = 22\ \Omega, R_3 = 68\ \Omega, R_4 = 100\ \Omega, U = 12\text{ V}$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = (15 + 22 + 68 + 100)\ \Omega = 205\ \Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12\text{ V}}{205\ \Omega} \doteq 0,059\text{ A}$$

Rezistory mají odpor $205\ \Omega$ a prochází jimi proud asi 59 mA .

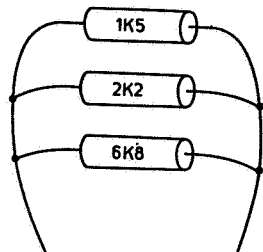
V tomto příkladu jsme nejprve vypočítali výsledný odpor sériově řazených rezistorů a pak teprve proud. S využitím Ohmova zákona můžeme sestavit vztah, ze kterého počítáme proud v obvodu se sériově řazenými rezistory přímo.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1 + R_2 + \dots + R_n}$$

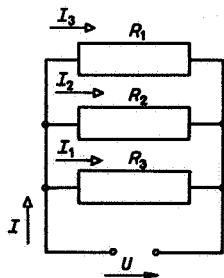
● 3.14.2. Paralelní řazení rezistorů

Při *paralelním řazení* rezistorů spojujeme jednotlivé rezistory *vedle sebe* (obr. 32).

Pokus: Podle schématu na obr. 33 spojíme tři rezistory vedle sebe, tj. paralelně. Měříme a) výsledný odpor celého obvodu, b) proud, který prochází jednotlivými částmi obvodu, c) napětí mezi konci jednotlivých rezistorů řazených paralelně.



Obr. 32. Paralelní řazení rezistorů



Obr. 33. Schéma paralelního řazení rezistorů

Z měření při pokusu vyplývá, že *napětí* mezi konci jednotlivých rezistorů řazených paralelně je *stejné* a rovná se napětí zdroje při zanedbatelném odporu přírodních vodičů.

Dále měřením zjistíme, že *proud* se v obvodu s paralelně řazenými rezistory *větví*, tj. dělí se do jednotlivých částí obvodu. Část proudu I_1 prochází rezistorem s odporem R_1 , část proudu I_2 prochází rezistorem s odporem R_2 a proud I_3 projde rezistorem s odporem R_3 .

Z toho důvodu mluvíme o *rozvětveném elektrickém obvodu* (na rozdíl od jednoduchého obvodu, kterým jsme se dosud zabývali). V rozvětveném obvodu se *celkový proud rovná součtu proudů v jednotlivých větvích*. Výsledný proud je tedy

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Pro libovolný počet větví je výsledný proud

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

Výsledný odpor paralelně řazených rezistorů vypočítáme s využitím Ohmova zákona

$$I = \frac{U}{R}, \quad I_1 = \frac{U_1}{R_1}, \quad \dots \quad I_n = \frac{U_n}{R_n}$$

Při paralelním řazení rezistorů je mezi konci všech rezistorů stejné napětí

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

Proud je

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

Proto je

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}$$

Dělíme celou rovnici U a dostaneme

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Tento vztah vyjádříme slovy: *Převrácená hodnota výsledného odporu se rovná součtu všech převrácených hodnot jednotlivých odporů rezistorů řazených paralelně.*

Ze vztahu

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

odvodíme pro dva rezistory s odpory R_1 a R_2 vztah

$$\frac{1}{R} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}$$

a z toho převrácenou hodnotu

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

Protože pro vodivost platí

$$G = \frac{1}{R}$$

je výsledná vodivost všech rezistorů řazených paralelně

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

Příklad 21: V obvodu podle schématu na obr. 33 je $R_1 = 20 \Omega$ a $R_2 = 40 \Omega$. Určete odpor paralelně spojeného rezistoru R_3 tak, aby nerozvětvenou částí obvodu procházel při napětí 220 V proud 16 A.

$R_1 = 20 \Omega$, $R_2 = 40 \Omega$, $U = 220 \text{ V}$

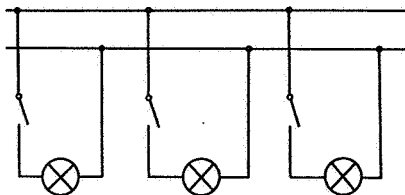
$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{220 \text{ V}}{20 \Omega} = 11 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{220 \text{ V}}{40 \Omega} = 5,5 \text{ A}$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I_3 = I - (I_1 + I_2) = 16 \text{ A} - (11 \text{ A} + 5,5 \text{ A}) = -0,5 \text{ A}$$

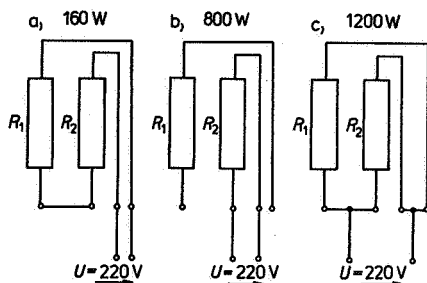
Úloha nemá řešení, protože již dvěma rezistory dohromady prochází proud o 0,5 A větší, než je stanovený proud. Takový obvod tedy nelze za daných podmínek sestavit. Ať bychom přidali paralelně rezistor s jakýmkoliv odporem, proud by se ještě zvětšil.



Obr. 34. Paralelní řazení svítidel

Paralelně se zapojují k rozvodné síti téměř všechny spotřebiče. Přerušení proudu do jednoho z nich neovlivňuje proud v ostatních za předpokladu, že se nemění úbytek napětí ve vedení. Zhasneme jednu žárovku v lustru a druhá svítí, rozsvítíme v kuchyni a v předsíni zůstane tma. Každé svítidlo se připojuje vlastním vypínačem (obr. 34).

Uvnitř různých spotřebičů se setkáváme jak se sériovým, tak s paralelním řazením rezistorů. Přepínačem lze u některých topných těles regulovat teplotu. Využije se část spirály nebo se spojí obě poloviny zapojené sériově nebo paralelně. Tím se reguluje příkon spotřebiče, např. plotny elektrického vaříče (obr. 35).

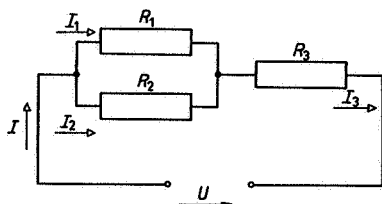


Obr. 35. Regulace výkonu elektrického vaříče různým zapojením spirál

3.14.3. Smíšené řazení rezistorů

Na obr. 36 je schéma obvodu, ve kterém jsou některé rezistory řazeny sériově a jiné paralelně. Takové řazení se nazývá *smíšené*.

Při výpočtech obvodů se smíšeně řazenými rezistory se snažíme převést obvod pouze na *sériové řazení* nebo méně často pouze na *paralelní řazení*.



Obr. 36. Smíšené řazení rezistorů

Příklad 22: V obvodu na obr. 36 je $R_1 = 200 \Omega$, $R_2 = 140 \Omega$ a $R_3 = 500 \Omega$. Určete výsledný odpor obvodu.

Pro paralelně řazené rezistory platí

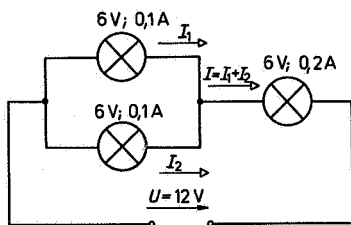
$$\frac{1}{R_{1+2}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{200 \Omega} + \frac{1}{140 \Omega} = \frac{17}{1400 \Omega}$$

$$R_{1+2} = \frac{1400}{17} \Omega \approx 82 \Omega$$

Rezistory R_1 a R_2 nahradíme jedním rezistorem s odporem R_{1+2} a pro sériově řazené rezistory dostaneme

$$R = R_{1+2} + R_3 = 82 \Omega + 500 \Omega = 582 \Omega$$

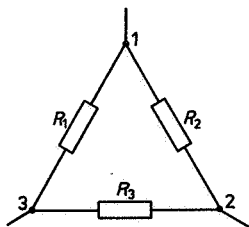
Výsledný odpor obvodu je přibližně 580Ω .



Obr. 37. Pokus se žárovkami

Smišené řazení rezistorů je běžné v některých elektrických strojích. Přeruší-li se proud v jednom paralelním obvodu (tedy v jedné větvi), prochází větší proud druhou větví. Přesvědčme se o tom pokusy se žárovkami spojenými podle obr. 37. Žárovkou konstruovanou pro proud 0,1 A začne procházet větší proud (asi 0,13 A) a současně je na ní větší napětí (8 V). Žárovka svítí velmi jasně a brzy by se přepálila, protože příkon je místo 0,6 W asi 1 W.

S výpočty obvodů se smíšeně řazenými odpory se seznámíte později.

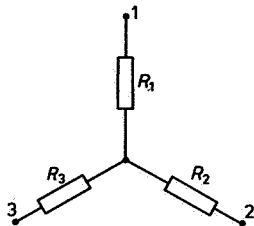


Obr. 38. Rezistory řazené do trojúhelníku

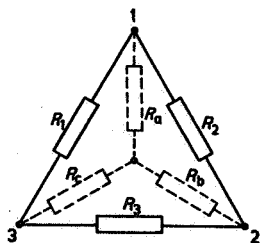
▽ 3.14.4. Transfigurace rezistorů řazených do trojúhelníku

Transfiguraci neboli přeskupení rezistorů používáme, chceme-li obvod podle obr. 38 upravit tak, aby ho bylo možné řešit podle pravidel pro sériové nebo paralelní řazení.

Rezistory v obvodu na obrázku jsou řazeny do trojúhelníku. Výsledný odpor tohoto obvodu nedovedeme podle dosud uvedených pravidel vypočítat. Použijeme proto *transfiguraci na hvězdu* (obr. 39).



Obr. 39. Rezistory řazené do hvězdy



Obr. 40. Transfigurace zapojení rezistorů do trojúhelníku na zapojení do hvězdy

Základní podmínkou každé transfigurace (obr. 40) je to, že upravené zapojení musí být rovnocenné z hlediska výsledného odporu. Rezistory řazené do trojúhelníku nahradíme rezistory řazenými do hvězdy podle těchto vztahů:

$$R_a = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_b = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_c = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

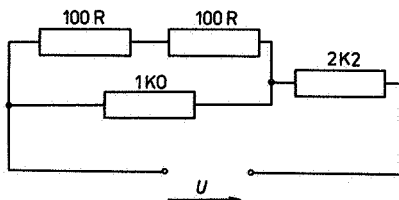
△

3.15. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Co vyjadřuje elektrická práce?
2. Určete práci, kterou je třeba vykonat, aby náboj 2 C prošel vodičem, mezi jehož konci je napětí 12 kV.

3. Čím se liší příkon spotřebiče od jeho výkonu? Vysvětlete, co jsou to ztráty.
4. Určete proud, který při napětí 220 V prochází žárovkou s příkonem 100 W.
5. Na jaké napětí smíte připojit topné těleso s příkonem 1200 W, kterým smí procházet proud 10 A?
6. V automobilu svítí současně dvě žárovky, každá s příkonem 40 W. Určete proud, který při napětí 12,8 V odebírají z baterie akumulátorů.
7. Zásuvkový obvod automobilu je jištěn pojistkou 8 A. Můžete k němu připojit při napětí 12,4 V vařič s příkonem 75 W?
8. Tovární hala se osvětluje 76 žárovkami, z nichž každá má příkon 200 W. Určete, jaká elektrická práce se ročně uspoří, svítí-li se denně průměrně o 100 minut méně. Uvažujte 260 pracovních dní.
9. Novou konstrukcí se zmenšil příkon televizních přijímačů průměrně o 80 W na jeden přijímač. V ČSSR je večer v provozu asi 1,5 miliónu televizorů. Jaké úspory příkonu znamená zlepšená konstrukce?
10. Starší zásuvka je konstruována pro jmenovité napětí 220 V a jmenovitý proud 10 A. Můžete do ní připojit při napětí 220 V automatickou pračku s příkonem 2450 W?
11. Rezistor s odporem $51\ \Omega$ má ztrátový výkon 0,5 W. Určete a) jmenovité napětí mezi konci rezistoru, b) proud, který při tomto napětí prochází rezistorem.
12. Kolik stojí roční provoz elektrického ohříváče vody, který má příkon 1,2 kW a je v provozu 6 hodin denně? Cenu 1 kW · h počítejte 24 haléře.
13. Světelný výkon žárovky s příkonem 40 W je přibližně 16 W. Určete účinnost žárovky.
14. Účinnost žárovek je asi 0,1. Jaký je světelný výkon žárovky, která má příkon 60 W? Jaké jsou její ztráty?
15. Při napětí 24 V prochází vedením proud 80 A. Jaký výkon se přenáší tímto vedením?
16. Příkon spotřebiče je 120 kW, ztráty jsou 36 kW. Určete účinnost spotřebiče.
17. Vypočítejte, jaký celkový příkon mohou mít při napětí 220 V spotřebiče připojené na obvod jištěný pojistkou a) 6 A, b) 10 A, c) 16 A.
18. Vypočítejte proudy, které procházejí spotřebičem při napětí 220 V, má-li spotřebič příkon a) 1 kW, b) 2 kW, c) 3 kW. Výsledky si dobře zapamatujte, budete je často potřebovat.

19. Po delším provozu se průřez vlákna žárovky zmenší. Jak to ovlivní příkon žárovky?
20. Ze dvou žárovek na jmenovité napětí 220 V má první žárovka jmenovitý příkon 60 W a druhá 100 W. Která z nich má menší odpor? Dokažte to.
21. Načrtněte sériové řazení tří rezistorů s odpory $12\ \Omega$, $51\ \Omega$ a $100\ \Omega$.
a) Vypočítejte jejich výsledný odpor. b) Určete jejich výslednou vodivost.
22. Na vánočním stromku jsou žárovky zapojeny sériově. Jak nejrychleji zjistíte místo přerušení obvodu?
23. Obvodem s napětím 160 V má několika rezistory procházet proud 20 mA. Určete, kolik rezistorů s odporem $1\ \text{k}\Omega$ musíte do obvodu zapojit a jak.
24. Uveďte vztah, podle kterého vypočítáte výsledný odpor paralelně řazených rezistorů.
25. Jaký je poměr výsledného odporu tří stejných rezistorů, řazených jednou sériově a podruhé paralelně?
26. Jak se změní výsledný proud odebíraný ze zdroje, přerušíme-li při paralelním řazení rezistorů proud do jednoho z nich?
27. Jaký vliv na činnost ostatních spotřebičů v obvodu má přerušení proudu do jednoho z nich a) při sériovém zapojení spotřebičů, b) při paralelním zapojení spotřebičů? Odpověď zdůvodněte s využitím schémat obvodů.
28. Určete výsledný odpor obvodu se čtyřmi rezistory řazenými paralelně. Odpory rezistorů jsou $2,2\ \text{k}\Omega$, $15\ \text{k}\Omega$, $2,7\ \text{k}\Omega$, $3,3\ \text{k}\Omega$. Jaký proud prochází jednotlivými větvemi tohoto obvodu při napětí 300 V? Jaký je celkový proud obvodem?
29. Čtyři rezistory jsou řazeny podle obr. 41. Vypočítejte jejich výsledný odpor.
- ▼ 30. Při transfiguraci rezistorů z trojúhelníku na hvězdu je $R_1 = 120\ \Omega$,
▲ $R_2 = 15\ \Omega$ a $R_3 = 30\ \Omega$. Určete odpory R_a , R_b a R_c v řazení do hvězdy.



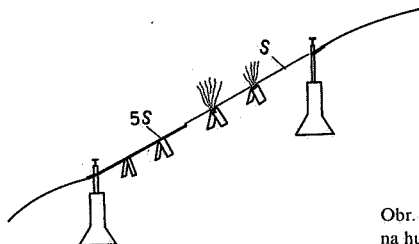
Obr. 41. K příkladu 28

3.16. JOULŮV-LENZŮV ZÁKON

Poznali jsme, že při průchodu volných elektronů vodičem dochází ke srážkám elektronů s ostatními částicemi vodiče. Tím se uspořádaný pohyb elektronů brzdí a projevuje se odpor vodiče. Každou srážkou však elektrony předají nepatrnou energii ostatním částicím ve vodiči. Při průchodu proudu vodičem se tedy zvětšuje celková vnitřní energie částic ve vodiči, a tím i teplota vodiče.

Pokus: Dva odporové dráty zapojíme sériově; jeden má velký průřez a druhý malý průřez. Na dráty zavěsíme papírky (obr. 42).

Zjistíme, že při průchodu proudu papírky na drátu s malým průřezem shoří, kdežto papírky na drátu s velkým průřezem zůstanou neporušené. Drát s malým průřezem má při průchodu proudu vyšší teplotu než drát s velkým průřezem. Příčinou různé teploty vodiče je rozdílná hustota proudu



Obr. 42. Závislost teploty vodiče na hustotě proudu

$$J = \frac{I}{S}$$

Při větší hustotě proudu se vodič zahřívá na vyšší teplotu.

Pokus: Do kalorimetru ponoříme topnou spirálu a při stálém napětí ji necháme procházet proud.

Z měření teploty vody v kalorimetru je zřejmé, že čím déle prochází proud topnou spirálou, tím vyšší je teplota vody v kalorimetru. Obdobně se pokusem přesvědčíme, že čím je větší příkon topné spirály, tím je dodané teplo větší.

Joule a Lenz provedli řadu podobných pokusů a zjistili, že teplo Q vzniklé při průchodu proudu I vodičem, mezi jehož konci je napětí U , je

$$Q = W = UIt$$

Tento vztah vyjadřuje *Joulův-Lenzův zákon*: *Teplo, které vzniká při průchodu ustáleného stejnosměrného proudu vodičem, je přímo úměrné součinu proudu, napětí a doby, po kterou proud prochází.*

Poznámka: Ustálený proud je takový proud, který nekolísá. Zatím jsme vždy uvažovali ustálený proud. V praxi se však setkáme s proměnným stejnosměrným proudem, který se zvětšuje a zase zmenšuje.

Víme již, že pro výkon platí vztah

$$P = UI$$

Dosazením tohoto vztahu do vztahu pro teplo dostaneme

$$Q = UI t = Pt$$

Jak z fyziky víte, je jednotkou tepla joule (J). Dalším dosazením upravených vztahů pro výpočet výkonu

$$P = I^2 R \qquad P = \frac{U^2}{R}$$

dostaneme vztahy

$$Q = I^2 R t \qquad Q = \frac{U^2}{R} t$$

Účinnost přeměny elektrické práce na teplo je téměř 1. Je to nejdokonalejší přeměna elektrické energie.

Při výrobě elektrické energie se však spotřebuje na 1 kW . h asi 1 kg hnědého uhlí. Účinnost přeměny tepla na elektrickou energii je asi 0,2, tedy malá. Vzhledem k nákladné výrobě elektrické energie a ke ztrátám při jejím přenosu je elektrické vytápění velmi drahé. Jeho výhody jsou však nesporné, neboť je pohotovité, neznečišťuje prostředí a velmi snadno se reguluje.

Příklad 23: Elektrická kamna s příkonem 5,0 kW jsou v provozu 7,0 hodin denně. Kolik tepla denně dodávají?

$$P = 5,0 \text{ kW} = 5,0 \cdot 10^3 \text{ W}, \quad t = 7,0 \text{ h} = 25,2 \cdot 10^3 \text{ s}$$

$$Q = Pt = 5,0 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot 25,2 \cdot 10^3 \text{ s} = 126 \cdot 10^6 \text{ J} = 126 \text{ MJ}$$

Teplo dodané kamny je asi 130 MJ. Je to přibližně tolik tepla, kolik vznikne dokonalým spálením 7,5 kg hnědého uhlí.

3.17. PŘEMĚNA ELEKTRICKÉ ENERGIE V TEPLLO

Přeměna elektrické energie v teplo probíhá v *tepelných spotřebičích*. Velká část tepelných spotřebičů má topnou spirálu z odporového drátu. Teplo lze však získat také elektrickým obloukem, např. při obloukovém svařování nebo při tavení kovů v obloukových pecích. Teplo vzniká také při průchodu proudu místem s velkým přechodovým odporem. Tohoto jevu se využívá při bodovém svařování kovů.

Elektrické zdroje tepla dělíme na *přímotopné* a *akumulační*. *Přímotopné zdroje* vyzařují teplo jen po dobu provozu (např. teplomety, elektrické vařiče a elektrické pečicí trouby).

V *akumulačních zdrojích* se teplo akumuluje, tj. hromadí, a využívá se později. Známá jsou *akumulační elektrická kamna*, která se k elektrorozvodné síti připojují v době, kdy je menší odběr elektrického výkonu, tj. převážně v noci. Proto je cena elektrické energie v noci (tzv. noční sazba) nižší.

Ve vyzdívice akumulčních kamen jsou topné spirály, které vyzdívkou v době připojení kamen k elektrorozvodné síti vyhřívají. Během dne vyzdívkou vyzařuje akumulované teplo a zahřívá vzduch v místnosti. Topné spirály se v té době již nežhívají, rozžhívají se až další noc.

Obdobně se akumuluje teplo v *elektrických zásobnících horké vody*. Teplo se však akumuluje ve vodě, která se během dne ze zásobníku vypouští.

K sušení, ke grilování a k formování plastů se využívají *infražáříče*. Vysílají tepelné záření, které neohřívá vzduch, ale ohřívá předměty, na něž dopadá.

V elektrotechnice musíme však sledovat i nežádoucí přeměnu elektrické energie v teplo. Značnou část ztrát v elektrotechnice tvoří *tepelné ztráty*. Při větší hustotě proudu roste teplota vodičů v elektrických rozvodech a také teplota cívek různých elektrických strojů. Zahřívají se rovněž kontakty, což může vést k jejich zničení.

Nežádoucí vznik tepla omezujeme především volbou správné hustoty proudu ve vodičích. Při větším proudu musíme zvětšit průřez vodičů, ale tím se zase zvětší nároky na materiál. Někdy se s ohledem na úspory materiálu volí menší průřezy vodičů, ale tyto vodiče se musí chladit, např. olejem nebo proudícím vzduchem.

Nedovoleným zvětšením hustoty proudu ve vodiči se může zvýšit jeho teplota až nad zápalnou teplotu jeho okolí. Na izolovaném vodiči začne hořet izolace a od ní se požár rozšíří na okolní předměty. Z tohoto hlediska

jsou nebezpečné zejména kabely a šňůry položené na hořlavých látkách.

Proudovému přetížení vodičů brání pojistky nebo jističe. Nelze však spoléhat na to, že správně jištěné vedení nemůže zavinit požár. Vlivem poruch izolace může mezi vodiči začít procházet proud, který je dostatečný pro zahřátí okolí vodiče na zápalnou teplotu, ale neovlivní činnost pojistky. Pojistka totiž nedovede odlišit proud procházející spotřebičem a proud při průrazu izolace.

Mnoho lidí se domnívá, že malé napětí je z požárního hlediska zcela bezpečné. O svém omylu se přesvědčilo již mnoho majitelů aut, kterým auto po neodborném zásahu do elektroinstalace shořelo, i když napětí nepřesáhlo 12 V.

Podobně jako na kontaktech vzniká přechodový odpor i na spojích. Nedostatečné dotažení vodiče ve svorkovnici způsobí, že spoje se nadměrně zahřejí, izolace se opálí a po čase se přeruší spojení.

Elektrická zařízení pod napětím se *nesmějí hasit vodou nebo jinými vodivými látkami*. Těmito látkami by se totiž napětí rozvedlo do velkých vzdáleností, např. až na čerpadlo a ohrozilo by jeho obsluhu.

Požár elektrických zařízení *hasíme práškovými nebo sněhovými hasicími přístroji*, popř. *pískem* nebo *hlinou*. Požár menších předmětů udusíme tím, že zabráníme (např. příkrývkou) přístupu vzduchu k nim.

Oděv, který hoří na člověku, hasíme vždy jen převalováním, příkrývkou nebo částmi oděvu. Nikdy *nesmíme použít žádný hasicí přístroj*, protože bychom tím zhoršili zdravotní stav postiženého.

V elektrifikovaných budovách se musí před začátkem hašení vodou *vypnout hlavní spínač*. Proto musí být hlavní spínač na snadno přístupném místě a musí být viditelně označen.

3.18. OTÁZKY A CVIČENÍ

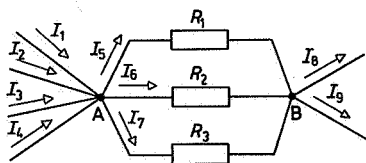
1. Na čem závisí teplota vodiče a proč?
2. Určete teplo dodané topným tělesem automatické pračky, která má příkon 2 kW, za 45 minut provozu.
3. Kolik tepla se musí za 1 s odvést z vinutí cívky, ve které jsou tepelné ztráty 10 W, aby se její teplota nezvyšovala?
4. Jaký výkon musí mít zdroj tepla, který má trvale dodávat 1 MJ tepla za sekundu?
5. Určete proud odporovým vodičem, který za 1 hodinu při napětí 220 V dodá teplo 320 kJ.

6. Vypočítejte, kolik stojí ročně vytápění místnosti akumulacími kamny s příkonem 3 kW. Topné období uvažujte 6 měsíců, průměrnou dobu zapojení kamen 5 hodin denně, cenu 0,24 Kčs/kW . h. Kolik tepla dodají kamna za tu dobu?
7. Jmenujte několik tepelných spotřebičů a vysvětlete, jak v nich vzniká teplo. Jaké jsou přednosti a nedostatky elektrických zdrojů tepla?
8. Jak a proč se využívají akumulacíni zdroje tepla?
9. Jakou výhodu mají infrazářiče?
10. Proč jsou největší dovolené proudy pro jednotlivé průřezy vodičů předepsány normami? Co se stane při nadměrném překročení hustoty proudu ve vodiči?
11. Za jakých podmínek se může zvětšit hustota proudu ve vodiči, aniž se ohroží okolí vodičů nadměrným zvýšením jejich teploty?
12. Proč je jmenovitý proud pro kabely za stejných podmínek menší než jmenovitý proud pro vodiče vedené jednotlivě? Proč je jmenovité zatížení holých vodičů za stejných podmínek větší než jmenovité zatížení vodičů izolovaných?
13. Chrání pojistka zařazená do obvodu před požárem? Zdůvodněte svoji odpověď.
14. Může proud z baterie s napětím 6 V způsobit požár (např. motorového vozidla)? Vysvětlete proč.
15. Proč se kontakty spínačů musí občas čistit?
16. Ve svorkovnici zjistíte na vodiči blízko šroubového spoje opálenou izolaci. Co způsobilo tuto závadu?

3.19. KIRCHHOFFOVY ZÁKONY

Kirchhoffovy zákony jsou dva a jsou důležité pro řešení složitých elektrických obvodů.

První Kirchhoffův zákon platí pro uzel, tj. pro spoj v obvodu, ve kterém se proud rozvětňuje. Na obr. 43a je znázorněna část elektrického obvodu



Obr. 43. a) První Kirchhoffův zákon

Druhý Kirchhoffův zákon platí pro uzavřený elektrický obvod. Na obr. 43b je zobrazen jednodušší uzavřený elektrický obvod, který je částí složitějšího rozvodu elektrické energie. V obvodu jsou zapojeny čtyři spotřebiče s odpory R_1, R_2, R_3, R_4 , na kterých je svorkové napětí U_1, U_2, U_3 a U_4 . Svorkové napětí na spotřebičích (rezistorech) působí vždy ve směru procházejícího proudu. Dále v obvodu působí tři zdroje se svorkovým napětím U_5, U_6, U_7 a jejich směr působení je od kladné svorky zdroje k záporné svorce. Větvemi obvodu procházejí proudy I_1, I_2, I_3 a I_4 .

Podle druhého Kirchhoffova zákona se algebraický součet všech napětí na svorkách spotřebičů (rezistorů) a na svorkách zdrojů v uzavřeném obvodu rovná nule.

Před psaním druhého Kirchhoffova zákona si vždy zvolíme zcela libovolný směr, kterým budeme postupovat po obvodu. Půjdeme-li po obvodu ve směru šipky napětí, považujeme toto napětí za kladné. Jdeme-li proti směru šipky napětí, považujeme toto napětí za záporné. Podle textu uvedeného pro obvod na obr. 43b platí

$$\begin{aligned} -U_1 - U_2 + U_3 + U_4 + U_5 - U_6 - U_7 &= 0 & \text{V} \\ -R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 + U_5 - U_6 - U_7 &= 0 & \text{V} \end{aligned}$$

Obecně

$$\sum U = 0 \quad \text{V}$$

Neznáme-li předem směry proudů v jednotlivých větvích obvodů, zvolíme je libovolně. Vyjde-li při výpočtu proud záporný, prochází proud spotřebičem opačně, než jak jsme předpokládali. Vyjde-li směr proudu ve zdroji proti směru jeho svorkového napětí, pracuje zdroj v tomto případě jako spotřebič (tj. jako motor) nebo se akumulátorová baterie nabíjí apod. Polarita zapojených zdrojů musí být známa. Aplikace Kirchhoffových zákonů probereme v odst. 3.20.2.

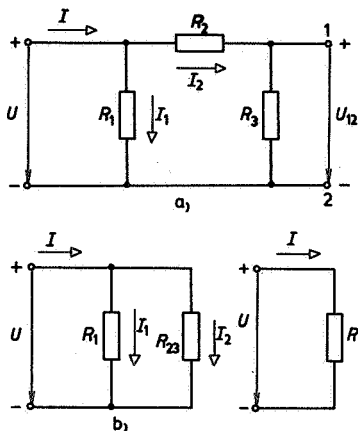
3.20. ŘEŠENÍ SLOŽENÝCH ELEKTRICKÝCH OBVODŮ STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU

Ve složeném obvodu je jeden nebo více zdrojů napětí a několik rezistorů, které jsou vzájemně různě spojeny. Odpory spojovacích vodičů při řešení obvodu neuvažujeme, protože jsou buď zanedbatelné, nebo jsou započítané v jednotlivých daných odporech rezistorů. Řešit obvod elektricky znamená

vypočítat proudy procházející rezistory a určit napětí na libovolném rezistoru. Při výpočtu používáme Ohmův zákon a zákony Kirchhoffovy. Postup řešení může být různý; nejlépe to poznáme z dále uvedených příkladů.

Příklad 24: Vypočítejte proudy procházející rezistory a určete napětí mezi svorkami 1, 2 obvodu podle schématu na obr. 44.

$R_1 = 5\ \Omega$, $R_2 = 15\ \Omega$, $R_3 = 5\ \Omega$, $U = 12\ \text{V}$.



Obr. 44. Schéma zapojení k příkladu 24:
a) základní schéma; b) zjednodušené schéma; c) výsledné schéma

3.20.1. Řešení elektrických obvodů postupným zjednodušováním obvodu

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.

Rezistory R_2 a R_3 jsou zařazeny do série a jejich výsledný odpor je $R_{23} = (15 + 5)\ \Omega = 20\ \Omega$. Náhradní rezistor s odporem R_{23} je paralelně připojen k rezistoru R_1 (obr. 44b), takže výsledný odpor obvodu (obr. 44c) je

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

Proud odebíraný ze zdroje je

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

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

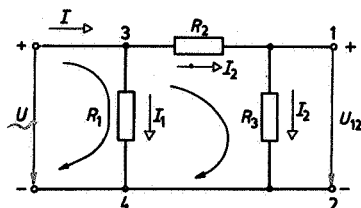
$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{12}{5} \text{ A} = 2,4 \text{ A}$$

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

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

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

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



Obr. 45. Schéma zapojení k příkladu 24

3.20.2. Řešení elektrických obvodů pomocí prvního a druhého Kirchhoffova zákona

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. Přitom podle prvního Kirchhoffova zákona můžeme napsat pouze $n - 1$ rovnic, kde n je počet uzlů v obvodu. Uzlem nazýváme místo, ve kterém jsou spojeny alespoň tři prvky. Podle schématu na obr. 45 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 na obr. 45 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. Podle obr. 45 platí

$$1. \quad I - I_1 - I_2 = 0 \quad A$$

$$2. \quad R_1 I_1 - U = 0 \quad V$$

$$3. \quad R_2 I_2 + R_3 I_2 - R_1 I_1 = 0 \quad V$$

Pro zjednodušení výpočtu budeme dále počítat pouze s číselnými hodnotami. Za neznámé proudy dosadíme X , X_1 a X_2 .

$$1. \quad X - X_1 - X_2 = 0$$

$$2. \quad 5X_1 - 12 = 0$$

$$3. \quad 15X_2 + 5X_2 - 5X_1 = 0$$

Z druhé rovnice dostaneme

$$5X_1 = 12$$

$$X_1 = 2,4$$

Do třetí rovnice dosadíme za $X_1 = 2,4$

$$20X_2 - 5 \cdot 2,4 = 0$$

$$X_2 = \frac{12}{20} = 0,6$$

Z první rovnice dostaneme

$$X = X_1 + X_2$$

Dosadíme za $X_1 = 2,4$ a za $X_2 = 0,6$

$$X = 2,4 + 0,6 = 3$$

Proudy procházející obvodem jsou

$$I = X \text{ A} = 3 \text{ A}; \quad I_1 = X_1 \text{ A} = 2,4 \text{ A}; \quad I_2 = X_2 \text{ A} = 0,6 \text{ A}$$

Výsledky jsou stejné jako při řešení postupným zjednodušováním obvodu, ale výpočet vyžaduje znalost řešení rovnic s více neznámými.

3.20.3. Řešení elektrických obvodů metodou smyčkových proudů

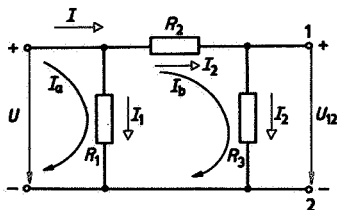
Při řešení složených obvodů metodou smyčkových proudů postupujeme takto:

1. *Schéma obvodu rozdělíme na smyčky. Smyčkou nazýváme každý uzavřený obvod, ve kterém už není žádná větev.*

2. *Ve smyčkách vyznačíme směr proudu. Směr může být libovolný, ale doporučuje se zachovat ve všech smyčkách stejný směr.*

3. *Pro každou smyčku napíšeme rovnici podle 2. Kirchhoffova zákona. Kontrolou správného napsání rovnic je, že úbytek napětí na rezistoru, který je společný dvěma smyčkám, musí být ve dvou rovnicích, a to s opačnými znaménky.*

4. *Z rovnic vypočítáme proudy v jednotlivých smyčkách a z nich pak určíme proudy procházející rezistory.*



Obr. 46. Schéma zapojení k příkladu 24 pro výpočet smyčkových proudů

Podle obr. 46 má obvod dvě smyčky, takže pro výpočet smyčkových proudů I_a , I_b potřebujeme dvě rovnice

$$1. \quad R_1(I_a - I_b) - U = 0 \quad \text{V}$$

$$2. \quad R_2I_b + R_3I_b + R_1(I_b - I_a) = 0 \quad \text{V}$$

Pro zjednodušení výpočtu budeme opět počítat pouze s číselnými hodnotami. Za I_a dosadíme X_1 , za I_b dosadíme X_2 .

$$1. \quad 5(X_1 - X_2) - 12 = 0$$

$$2. \quad 15X_2 + 5X_2 + 5(X_2 - X_1) = 0$$

Rovnici upravíme

$$1. \quad 5X_1 = 12 + 5X_2$$

$$2. \quad 25X_2 = 5X_1$$

Do druhé rovnice dosadíme za $5X_1$ z první rovnice a dostaneme

$$25X_2 = 12 + 5X_2$$

$$X_2 = 0,6$$

Z druhé rovnice dostaneme

$$X_1 = 5X_2$$

Dosadíme za $X_2 = 0,6$

$$X_1 = 5 \cdot 0,6 = 3$$

Nyní vypočítáme proudy procházející obvodem

$$I = I_a = X_1 \text{ A} = 3 \text{ A}$$

$$I_1 = I_a - I_b = X_1 \text{ A} - X_2 \text{ A} = 3 \text{ A} - 0,6 \text{ A} = 2,4 \text{ A}$$

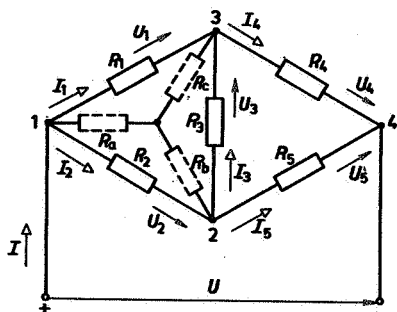
$$I_2 = X_2 \text{ A} = 0,6 \text{ A}$$

Pro výpočet proudů stačí dvě rovnice, kdežto při řešení podle 3.20.2 bychom potřebovali tři rovnice.

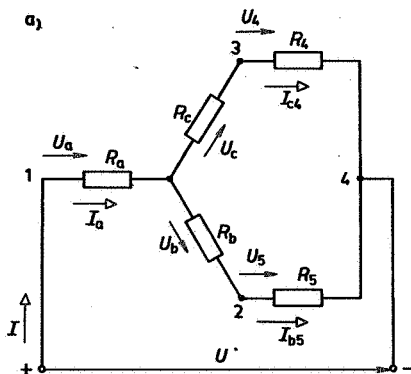
3.20.4. Řešení elektrických obvodů pomocí transfigurace rezistorů zapojených do trojúhelníku na zapojení do hvězdy

V elektrických obvodech se vyskytují také rezistory zapojené do trojúhelníku. Příkladem je tzv. můstkové zapojení na obr. 47a. Abychom tento obvod mohli řešit postupným zjednodušováním obvodu, musíme nejdříve rezistory s odpory R_1, R_2, R_3 nebo R_3, R_4, R_5 , zapojené do trojúhelníku, přeměnit na ekvivalentní zapojení rezistorů do hvězdy. Tomuto přestavení obvodu říkáme transfigurace, a dostaneme tím sériově paralelní zapojení rezistorů (obr. 47b).

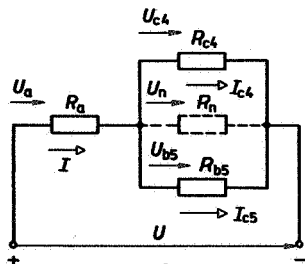
Příklad 25: Vypočítejte napětí na rezistorech a proudy v obvodu na obr. 47a, je-li $R_1 = 50 \Omega$; $R_2 = 30 \Omega$; $R_3 = 20 \Omega$; $R_4 = 5 \Omega$; $R_5 = 4 \Omega$, $U = 42 \text{ V}$. Nejprve musíme určit odpory R_a, R_b, R_c náhradních rezistorů zapojených do hvězdy podle vzorců odvozených v článku 3.14.4.



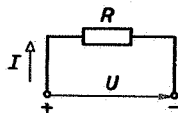
a)



b)



c)



d)

Obr. 47. Schéma zapojení k příkladu 25:
a) schéma před transfigurací; b) schéma po transfiguraci; c) zjednodušené schéma;
d) výsledný odpor

$$R_a = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{50 \cdot 30}{50 + 30 + 20} \Omega = 15 \Omega$$

$$R_b = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{30 \cdot 20}{50 + 30 + 20} \Omega = 6 \Omega$$

$$R_c = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{50 \cdot 20}{50 + 30 + 20} \Omega = 10 \Omega$$

Na obr. 47b je schéma obvodu po transfiguraci a na obr. 47c je schéma zjednodušeného obvodu.

$$R_{c4} = R_c + R_4 = (10 + 5) \Omega = 15 \Omega$$

$$R_{b5} = R_b + R_5 = (6 + 4) \Omega = 10 \Omega$$

Rezistory s odpory R_{c4} a R_{b5} jsou zapojeny paralelně a můžeme je nahradit rezistorem s odporem

$$R_n = \frac{R_{c4} R_{b5}}{R_{c4} + R_{b5}} = \frac{15 \cdot 10}{15 + 10} \Omega = 6 \Omega$$

Výsledný odpor (obr. 47d) obvodu je

$$R = R_a + R_n = (15 + 6) \Omega = 21 \Omega$$

Proud odebíraný ze zdroje je

$$I = \frac{U}{R} = \frac{42}{21} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

Napětí na náhradních rezistorech je

$$U_a = I R_a = 2 \cdot 15 \text{ V} = 30 \text{ V}$$

$$U_n = I R_n = 2 \cdot 6 \text{ V} = 12 \text{ V}$$

Kontrola

$$U = U_a + U_n = (30 + 12) \text{ V} = 42 \text{ V}$$

Napětí

$$U_{c4} = U_{b5} = U_n = 12 \text{ V}$$

Proudy procházející náhradními rezistory

$$I_{c4} = \frac{U_{c4}}{R_{c4}} = \frac{12}{15} \text{ A} = 0,8 \text{ A}$$

$$I_{b5} = \frac{U_{b5}}{R_{b5}} = \frac{12}{10} \text{ A} = 1,2 \text{ A}$$

Kontrola

$$I = I_a = 2 \text{ A} = I_{c4} + I_{b5} = (0,8 + 1,2) \text{ A} = 2 \text{ A}$$

Nyní vypočítáme napětí na rezistorech podle schématu na obr. 47b.

$$U_a = 30 \text{ V (podle předcházejícího výpočtu)}$$

$$U_b = I_{b5} R_b = 1,2 \cdot 6 \text{ V} = 7,2 \text{ V}$$

$$U_c = I_{c4} R_c = 0,8 \cdot 10 \text{ V} = 8 \text{ V}$$

$$U_4 = I_{c4} R_4 = 0,8 \cdot 5 \text{ V} = 4 \text{ V}$$

$$U_5 = I_{b5} R_5 = 1,2 \cdot 4 \text{ V} = 4,8 \text{ V}$$

Kontrola

$$U = U_a + U_c + U_4 = (30 + 8 + 4) \text{ V} = 42 \text{ V}$$

$$U = U_a + U_b + U_5 = (30 + 7,2 + 4,8) \text{ V} = 42 \text{ V}$$

Dále počítáme napětí na rezistorech a proudy v obvodu podle schématu na obr. 47a

$$U_1 = U_a + U_c = (30 + 8) \text{ V} = 38 \text{ V}$$

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{38}{50} \text{ A} = 0,76 \text{ A}$$

$$U_2 = U_a + U_b = (30 + 7,2) \text{ V} = 37,2 \text{ V}$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{37,2}{30} \text{ A} = 1,24 \text{ A}$$

Kontrola

$$I = I_1 + I_2 = (0,76 + 1,24) \text{ A} = 2 \text{ A}$$

$$U_3 = U_1 - U_2 = (38 - 37,2) \text{ V} = 0,8 \text{ V}$$

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{0,8}{20} \text{ A} = 0,04 \text{ A}$$

$$I_4 = I_{c4} = 0,8 \text{ A}$$

$$U_4 = I_4 R_4 = 0,8 \cdot 5 \text{ V} = 4 \text{ V}$$

$$I_5 = I_{b5} = 1,2 \text{ A}$$

$$U_5 = I_5 R_5 = 1,2 \cdot 4 \text{ V} = 4,8 \text{ V}$$

Kontrola

$$U = U_1 + U_4 = (38 + 4) \text{ V} = 42 \text{ V}$$

$$U = U_2 + U_5 = (37,2 + 4,8) \text{ V} = 42 \text{ V}$$

$$I_4 = I_1 + I_3 = (0,76 + 0,04) \text{ A} = 0,8 \text{ A}$$

$$I_5 = I_2 - I_3 = (1,24 - 0,04) \text{ A} = 1,2 \text{ A}$$

$$I = I_3 + I_4 = (0,8 + 1,2) \text{ A} = 2 \text{ A}$$

Elektrickým obvodem procházejí proudy: $I_1 = 0,76 \text{ A}$; $I_2 = 1,24 \text{ A}$; $I_3 = 0,4 \text{ A}$; $I_4 = 0,8 \text{ A}$; $I_5 = 1,2 \text{ A}$; $I = 2 \text{ A}$.

Napětí na rezistorech jsou: $U_1 = 38 \text{ V}$; $U_2 = 37,2 \text{ V}$; $U_3 = 0,8 \text{ V}$; $U_4 = 4 \text{ V}$; $U_5 = 4,8 \text{ V}$.

Příklad 26: Řešte elektrický obvod na obr. 48a, kde $R_1 = 5 \Omega$; $R_2 = 50 \Omega$; $R_3 = 20 \Omega$; $R_4 = 30 \Omega$; $R_5 = 4 \Omega$; $U_1 = U_2 = 100 \text{ V}$.

Elektrický obvod nemůžeme řešit postupným zjednodušováním obvodu, protože v něm jsou zapojeny dva zdroje napětí. Lze jej řešit:

1. Pomocí Kirchhoffových zákonů. V obvodu je pět neznámých proudů, a proto je nutné sestavit pět na sobě nezávislých rovnic. Protože jsou v obvodu tři uzly, je možné podle prvního Kirchhoffova zákona napsat dvě rovnice a podle druhého Kirchhoffova zákona tři rovnice.

2. Obvod lze řešit metodou smyčkových proudů, a protože má obvod tři smyčky, stačí podle druhého Kirchhoffova zákona k výpočtu smyčkových proudů pouze tři rovnice.

3. Obvod lze řešit ještě tak, že nejprve provedeme transfiguraci rezistorů zapojených do trojúhelníku na hvězdu. Tím dostaneme schéma na obr. 48b, ve kterém jsou pouze dvě smyčky; k výpočtu smyčkových proudů potom stačí dvě rovnice podle druhého Kirchhoffova zákona.

Třetí řešení probereme podrobně.
Odpory rezistorů zapojených do hvězdy jsou

$$R_a = 10 \Omega ; R_b = 15 \Omega ; R_c = 6 \Omega$$

Pro smyčkové proudy platí rovnice

$$1. \quad R_1 I_a + R_a(I_a - I_b) + R_b I_a - U_1 = 0 \quad \text{V}$$

$$2. \quad R_5 I_b + U_2 + R_c I_b + R_a(I_b - I_a) = 0 \quad \text{V}$$

Po úpravě dostaneme

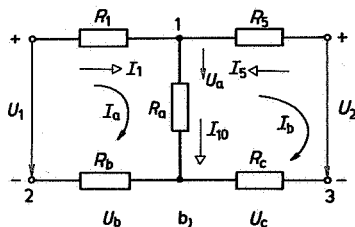
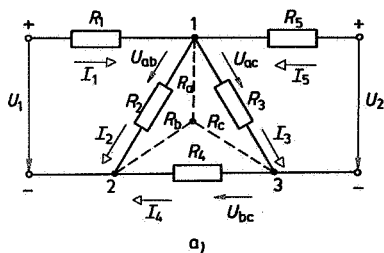
$$1. \quad (R_1 + R_a + R_b) I_a - R_a I_b - U_1 = 0 \quad \text{V}$$

$$2. \quad (R_5 + R_c + R_a) I_b - R_a I_a + U_2 = 0 \quad \text{V}$$

Dále počítáme jen s číselnými hodnotami. Za I_a dosadíme X_1 , za I_b dosadíme X_2 .

$$1. \quad (5 + 10 + 15) X_1 - 10 X_2 - 100 = 0$$

$$2. \quad (4 + 6 + 10) X_2 - 10 X_1 + 100 = 0$$



Obr. 48. Schéma zapojení k příkladu 26;
a) základní schéma; b) zjednodušené schéma

Po úpravě dostaneme rovnice

$$1. \quad 30X_1 - 10X_2 = 100$$

$$2. \quad -10X_1 + 20X_2 = -100$$

a z nich $X_1 = 2$ a $X_2 = -4$, a tedy $I_a = X_1 \text{ A} = 2 \text{ A}$, $I_b = X_2 \text{ A} = -4 \text{ A}$.

Proudy ve schématu na obr. 48b jsou

$$I_1 = I_a = 2 \text{ A}$$

$$I_{10} = I_a - I_b = 2 \text{ A} - (-4) \text{ A} = 6 \text{ A}$$

$$I_5 = -I_b = 4 \text{ A}$$

Napětí

$$U_a = I_{10}R_a = 6 \cdot 10 \text{ V} = 60 \text{ V}$$

$$U_b = I_1R_b = 2 \cdot 15 \text{ V} = 30 \text{ V}$$

$$U_c = I_5R_c = 4 \cdot 6 \text{ V} = 24 \text{ V}$$

$$U_{ab} = U_a + U_b = (60 + 30) \text{ V} = 90 \text{ V}$$

$$U_{ac} = U_a + U_c = (60 + 24) \text{ V} = 84 \text{ V}$$

$$U_{bc} = U_b - U_c = (30 - 24) \text{ V} = 6 \text{ V}$$

Proudy

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{90}{50} \text{ A} = 1,8 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U_{ac}}{R_3} = \frac{84}{20} \text{ A} = 4,2 \text{ A}$$

$$I_4 = \frac{U_{bc}}{R_4} = \frac{6}{30} \text{ A} = 0,2 \text{ A}$$

$$I_5 = -I_b = -(-4) \text{ A} = 4 \text{ A}$$

Kontrola k uzlu 1

$$I_1 - I_2 - I_3 + I_5 = 0 \quad \text{A}$$

$$2 - 1,8 - 4,2 + 4 = 0$$

$$0 = 0$$

Kontrola k uzlu 2

$$I_2 - I_1 + I_4 = 0 \quad \text{A}$$

$$1,8 - 2 + 0,2 = 0$$

$$0 = 0$$

Kontrola k uzlu 3

$$I_3 - I_4 - I_5 = 0 \quad \text{A}$$

$$4,2 - 0,2 - 4 = 0$$

$$0 = 0$$

Elektrickým obvodem procházejí proudy

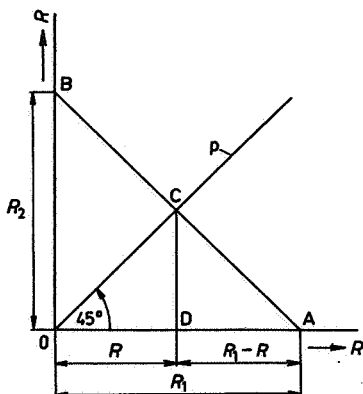
▲ $I_1 = 2 \text{ A}; I_2 = 1,8 \text{ A}; I_3 = 4,2 \text{ A}; I_4 = 0,2 \text{ A}; I_5 = 4 \text{ A}.$

3.20.5. Řešení elektrických obvodů graficko-početní metodou

Při graficko-početní metodě postupujeme tak, že náhradní odpory rezistorů zapojených paralelně nebo do trojúhelníku určíme graficky. Tím daný obvod postupně zjednodušujeme, až určíme výsledný odpor obvodu. Potom podle Ohmova zákona vypočítáme proud odebíraný ze zdroje a ten zase postupně rozvádíme do jednotlivých větví obvodu, jak bylo vysvětleno v příkladu 25. Odpor R náhradního rezistoru dvou rezistorů (R_1, R_2) spojených paralelně vypočítáme ze vztahu

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

Tuto rovnici řešíme graficky podle obr. 49. Na vodorovnou poloosu nanese ve zvoleném měřítku velikost odporu $R_1 \cong \overline{OA}$ (znak $\cong$ čteme: odpovídá). Na svislou poloosu nanese ve stejném měřítku odpor $R_2 \cong \overline{OB}$. Počátkem O prochází přímka p , která svírá s vodorovnou polo-



Obr. 49. Grafické řešení výsledného odporu dvou rezistorů zapojených paralelně

osou úhel 45° . Spojnice bodů $\overline{AB}$ se protíná s přímkou p v bodě C , z toho bodu sestrojíme kolmici na vodorovnou poloosu, a tak dostaneme bod D . Kolmice $\overline{CD}$ i úsečka $\overline{OD}$ odpovídají výslednému odporu R .

Důkaz: Trojúhelníky DAC a OAB jsou podobné, takže platí

$$\frac{\overline{DA}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{CD}}{\overline{OB}}$$

$$\frac{R_1 - R}{R_1} = \frac{R}{R_2}$$

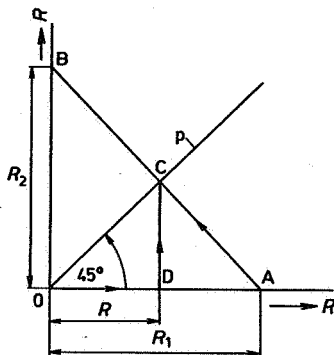
$$R_1 R_2 - R R_2 = R R_1$$

$$R_1 R_2 = R(R_1 + R_2)$$

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

Takto lze určit i náhradní odpor několika rezistorů zapojených paralelně.

Opačným postupem můžeme určit odpor rezistoru R_2 , který je nutné paralelně zapojit k rezistoru s odporem R_1 , aby měl obvod daný odpor R . V tomto případě postupujeme takto (obr. 50):



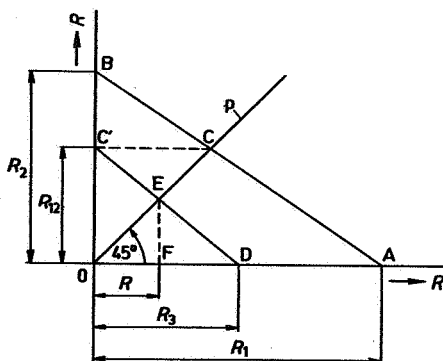
Obr. 50. Grafické určení odporu rezistoru R_2 , který paralelně zapojíme k rezistoru R_1 , abychom dostali výsledný odpor R

Na vodorovnou poloosu nanese ve zvoleném měřítku úsečku odpovídající odporům R a R_1 . Tím dostaneme body D a A . V bodě D sestrojíme kolmici, která protíná přímkou p v bodě C . Prodloužená spojnice bodů C a A vytne na svislé poloose bod B . Úsečka $\overline{OB}$ odpovídá hledanému odporu rezistoru R_2 .

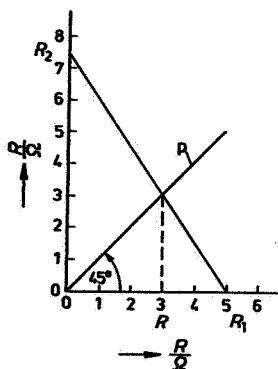
Příklad 27: Tři rezistory s odpory $R_1 = 90\ \Omega$, $R_2 = 60\ \Omega$, $R_3 = 45\ \Omega$ jsou zapojeny paralelně. Určete graficky výsledný odpor R .

Řešení je patrné z obr. 51. Výsledný odpor je $20\ \Omega$.

Příklad 28: Jaký odpor R_2 musí mít rezistor, který připojíme k rezistoru s odporem $R_1 = 5\ \Omega$, aby výsledný odpor obvodu byl $R = 3\ \Omega$. Řešení je na obr. 52, $R_2 = 7,5\ \Omega$.



Obr. 51. Grafické řešení příkladu 27



Obr. 52. Grafické řešení příkladu 28

▽ Při řešení elektrického obvodu, ve kterém jsou zapojeny tři rezistory do trojúhelníku, určíme náhradní rezistory R_a , R_b , R_c , zapojené do hvězdy, podle obr. 53.

Na vodorovné úsečce $\overline{OA}$ znázorníme součet odporů $R_1 + R_2 + R_3$ rezistorů zapojených do trojúhelníku. Na tuto úsečku nanese od bodu O ve stejném měřítku velikost odporu R_1 , a tím dostaneme bod B. V bodě B i A sestrojíme kolmice. Na kolmici v bodě A sestrojíme úsečku $\overline{AC}$, která odpovídá velikosti odporu R_2 . Spojnice bodů O a C vytne na kolmici sestrojené v bodě B bod D.

Úsečka $\overline{BD}$ odpovídá velikosti odporu R_a .

Důkaz: Trojúhelníky BOD a AOC jsou podobné, a proto platí

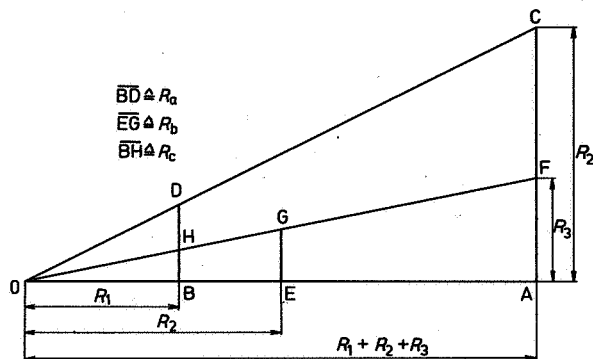
$$\frac{\overline{OB}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{BD}}{\overline{AC}}$$

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{R_a}{R_2}$$

$$R_a = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

jak to bylo odvozeno v článku 3.14.4.

Dále na úsečce $\overline{OA}$ nanese velikost odporu R_2 , což odpovídá úsečce $\overline{OE}$, a na kolmici v bodě A nanese velikost odporu R_3 , která odpovídá úsečce $\overline{AF}$. V bodě E sestrojíme kolmici a body O a F spojíme přímkou, která vytne na kolmici v bodě E bod G a na kolmici v bodě B bod H. Úseč-



Obr. 53. Grafická transfigurace trojúhelníku na hvězdu

ka $\overline{EG}$ odpovídá velikosti odporu R_b , a úsečka $\overline{BH}$ odpovídá velikosti odporu R_c . Důkaz lze provést obdobně jako důkaz pro odpor R_a .

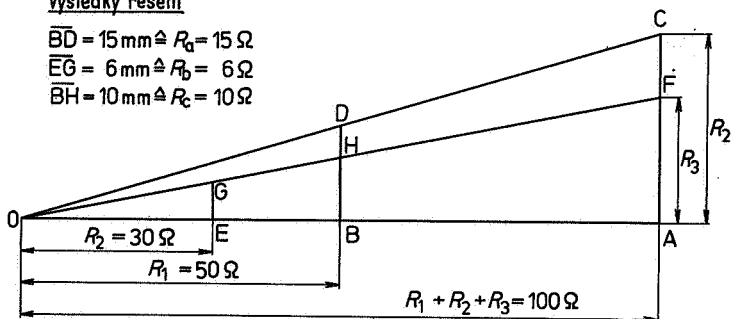
Příklad 29: Určete graficky výsledný odpor elektrického obvodu v příkladu 25.

Výsledky řešení

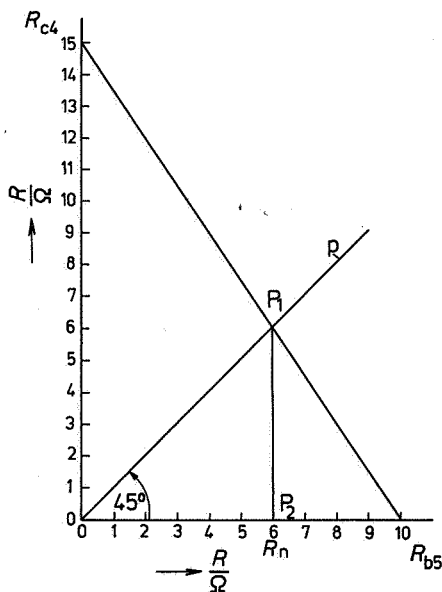
$$\overline{BD} = 15 \text{ mm} \triangleq R_a = 15 \Omega$$

$$\overline{EG} = 6 \text{ mm} \triangleq R_b = 6 \Omega$$

$$\overline{BH} = 10 \text{ mm} \triangleq R_c = 10 \Omega$$



Obr. 54. Grafická transfigurace k příkladu 29



Obr. 55. Grafické určení náhradního odporu

Grafické určení odporů rezistorů zapojených do hvězdy je patrné z obr. 54. Měřítka: $1 \text{ mm} \cong 1 \Omega$.

Úsečka BD = $15 \text{ mm} \cong 15 \Omega = R_a$, úsečka EG = $6 \text{ mm} \cong 6 \Omega = R_b$, úsečka BH = $10 \text{ mm} \cong 10 \Omega = R_c$.

Grafické určení náhradního odporu nahrazujícího odpory $R_{c4} = 15 \Omega$ a $R_{b5} = 10 \Omega$ je na obr. 55. Měřítka: $1 \text{ cm} \cong 1 \Omega$. Úsečka OP₂ = $6 \text{ cm} \cong 6 \Omega = R_n$.

Výsledný odpor elektrického obvodu je

$$R = R_a + R_n$$

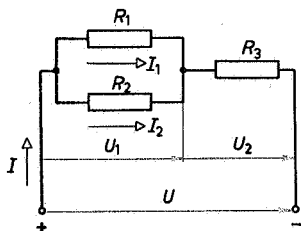
$$R' = (15 + 6) \Omega = 21 \Omega$$

△ Výsledek je stejný jako při početním řešení příkladu 25.

3.21. OTÁZKY A CVIČENÍ

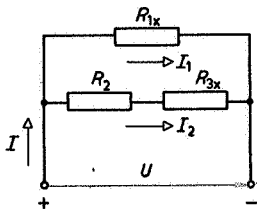
1. Jak zní první Kirchhoffův zákon?
2. Jak zní druhý Kirchhoffův zákon?
3. Kterým směrem působí svorkové napětí na spotřebiči (rezistoru) a kterým směrem na zdroji napětí?
4. Vysvětlíte, jak se postupuje při psaní druhého Kirchhoffova zákona?
5. Co to je složený elektrický obvod?
6. Co znamená řešit elektrický obvod?
7. Vysvětlíte, jak se řeší obvod postupným zjednodušováním obvodu?
8. Kolik rovnic se musí napsat při řešení obvodu pomocí Kirchhoffových zákonů?
9. Jak se postupuje při psaní rovnic vyjadřujících druhý Kirchhoffův zákon?
10. Kolik rovnic můžeme napsat podle prvního Kirchhoffova zákona, řešíme-li obvod podle prvního a druhého Kirchhoffova zákona?
11. Jak prochází proud obvodem, vyjde-li při výpočtu proud se záporným znaménkem?
12. Vysvětlíte postup při řešení obvodu pomocí Kirchhoffových zákonů.
13. Co to je smyčka a uzel v elektrickém obvodu?
14. Jak se postupuje při řešení obvodu metodou smyčkových proudů?

15. V čem spočívá transfigurace rezistorů zapojených do trojúhelníku?
16. Jak se vypočítají náhradní odpory rezistorů zapojených do hvězdy při transfiguraci rezistorů zapojených do trojúhelníku?
17. Vysvětlete postup při grafickém určování výsledného odporu dvou rezistorů zapojených paralelně.
18. Vysvětlete postup při grafickém určování odporu rezistoru, který musíte zapojit paralelně k danému rezistoru, abyste dostali známý výsledný odpor.
- ▽ 19. Vysvětlete, jak se graficky určí náhradní odpory rezistorů zapojených
 △ do hvězdy při transfiguraci rezistorů zapojených do trojúhelníku.



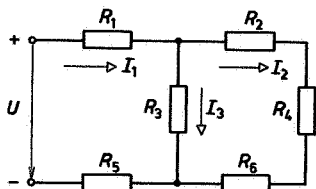
Obr. 56. Schéma zapojení k cvičení 20 z čl. 3.21

20. Vypočítejte proudy I , I_1 , I_2 a napětí U_1 a U_2 , jsou-li rezistory s odpory $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 40 \Omega$, $R_3 = 4 \Omega$ zapojeny podle schématu na obr. 56 a jsou-li připojeny na napětí 24 V.
21. Určete odpor rezistorů R_{1x} a R_{3x} , prochází-li rezistorem R_{1x} proud $I_1 = 1,2 \text{ A}$ a ze zdroje s napětím 36 V se odebírá proud 3 A. Rezistory jsou zapojeny podle schématu na obr. 57 a odpor rezistoru $R_2 = 5 \Omega$.



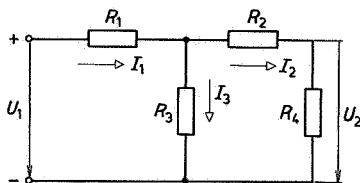
Obr. 57. Schéma zapojení k cvičení 21 z čl. 3.21

- ▼ 22. Rezistory s odpory $R_1 = 4 \Omega$, $R_2 = 2 \Omega$, $R_3 = 6 \Omega$, $R_4 = 1 \Omega$, $R_5 = 5 \Omega$, $R_6 = 3 \Omega$ jsou zapojeny podle schématu na obr. 58 a jsou připojeny na napětí 48 V. Vypočítejte proudy I_1 , I_2 a I_3 .



Obr. 58. Schéma zapojení k cvičení 22 z čl. 3.21

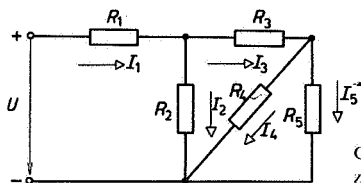
23. Rezistory s odpory $R_1 = 4 \Omega$, $R_2 = 5 \Omega$, $R_3 = 10 \Omega$, $R_4 = 10 \Omega$ jsou zapojeny podle schématu na obr. 59 a jsou připojeny na napětí $U_1 = 60 \text{ V}$. Vypočítejte proudy I_1 , I_2 , I_3 a napětí U_2 mezi konci rezistoru R_4 .



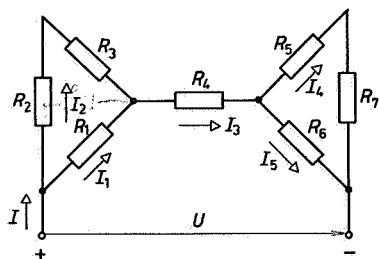
Obr. 59. Schéma zapojení k cvičení 23 z čl. 3.21

24. Rezistory s odpory $R_1 = 3 \Omega$, $R_2 = 6 \Omega$, $R_3 = 6 \Omega$, $R_4 = 60 \Omega$, $R_5 = 40 \Omega$ jsou zapojeny podle schématu na obr. 60 a jsou připojeny na napětí 24 V. Vypočítejte proudy I_1 až I_5 procházející obvodem.
25. Rezistory s odpory $R_1 = 3 \Omega$, $R_2 = 3 \Omega$, $R_3 = 3 \Omega$, $R_4 = 2 \Omega$, $R_5 = 6 \Omega$, $R_6 = 6 \Omega$, $R_7 = 7 \Omega$ jsou připojeny na napětí 24 V. Rezistory jsou zapojeny podle schématu na obr. 61. Vypočítejte výsledný odpor R a proudy I a I_1 až I_5 .

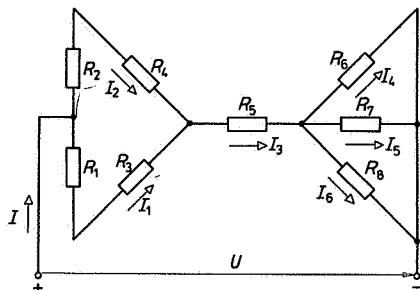
26. Určete výsledný odpor R obvodu podle obr. 62 a proudy I a I_1 až I_6 , procházející obvodem, jsou-li rezistory s odporem $R_1 = 1\ \Omega$, $R_2 = 2\ \Omega$, $R_3 = 5\ \Omega$, $R_4 = 4\ \Omega$, $R_5 = 6\ \Omega$, $R_6 = 5\ \Omega$, $R_7 = 20\ \Omega$, $R_8 = 12\ \Omega$ připojeny na napětí 120 V.



Obr. 60. Schéma zapojení k cvičení 24 z čl. 3.21

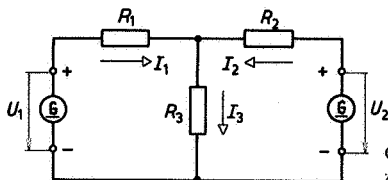


Obr. 61. Schéma zapojení k cvičení 25 z čl. 3.21



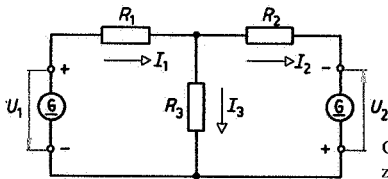
Obr. 62. Schéma zapojení k cvičení 26 z čl. 3.21

- ▽ 27. Vypočítejte proudy I_1 až I_3 procházející obvodem na obr. 63 metodou smyčkových proudů. $U_1 = U_2 = 12\text{ V}$, $R_1 = 3\ \Omega$, $R_2 = 6\ \Omega$, $R_3 = 2\ \Omega$.
28. Elektrický obvod na obr. 64 řešte metodou smyčkových proudů. $R_1 = 3\ \Omega$, $R_2 = 6\ \Omega$, $R_3 = 2\ \Omega$, $U_1 = U_2 = 12\text{ V}$ (mají opačnou polaritu).

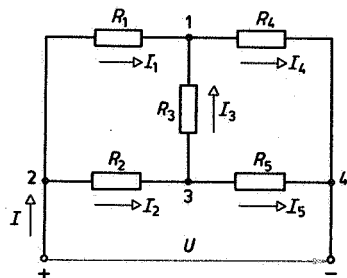


Obr. 63. Schéma zapojení k cvičení 27 z čl. 3.21

29. Určete proudy I , I_1 až I_5 procházející elektrickým obvodem na obr. 65, je-li $R_1 = 4\ \Omega$, $R_2 = 5\ \Omega$, $R_3 = 1\ \Omega$, $R_4 = 2,6\ \Omega$, $R_5 = 5\ \Omega$, $U = 12\text{ V}$. Výsledek výpočtu zkontrolujte napsáním prvního Kirchhoffova zákona k uzlům 1, 2, 3 a 4. Příklad řešte transfigurací.

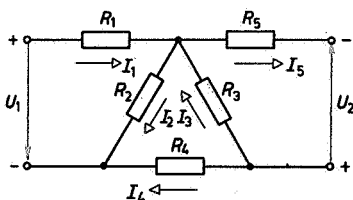


Obr. 64. Schéma zapojení k cvičení 28 z čl. 3.21



Obr. 65. Schéma zapojení k cvičení 29 z čl. 3.21

30. Určete graficky výsledný odpor R obvodu ze cvičení 25.
31. Vypočítejte proudy v obvodu na obr. 66. $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 50 \Omega$, $R_3 = 20 \Omega$, $R_4 = 30 \Omega$, $R_5 = 4 \Omega$, $U_1 = U_2 = 100 \text{ V}$.
32. Určete graficky výsledný odpor R tří rezistorů, $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 15 \Omega$, $R_3 = 30 \Omega$, zapojených paralelně.
33. Určete graficky výsledný odpor R čtyř rezistorů zapojených paralelně. $R_1 = 20 \Omega$, $R_2 = 40 \Omega$, $R_3 = 60 \Omega$, $R_4 = 120 \Omega$.
34. Jaký odpor musí mít rezistor zapojený paralelně k rezistoru s odporem $R_1 = 60 \Omega$, aby byl výsledný odpor obvodu 20Ω . Řešte graficky.



Obr. 66. Schéma zapojení k cvičení 31 z čl. 3.21

3.22. ELEKTRICKÝ ZDROJ A JEHO NÁHRADNÍ SCHÉMA

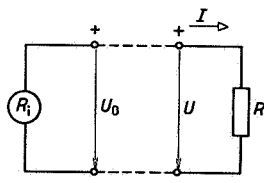
Elektrický zdroj je zařízení, které vytváří a udržuje mezi výstupními svorkami *elektrické napětí*. Je to např. dynamo, akumulátorová baterie, výstupní obvod pentody nebo tranzistoru atd. Na svorkách zdroje rozlišujeme napětí naprázdno U_0 a napětí při zatížení U . Svorkové napětí naprázdno U_0 je napětí nezatíženého zdroje a naměříme je mezi svorkami zdroje při odpojení spotřebiči. Svorkové napětí při zatížení je napětí na svorkách zdroje při připojení vnějšího obvodu. Každý elektrický zdroj má tzv. vnitřní odpor R_i . Prochází-li zdrojem elektrický proud, vznikne na něm úbytek napětí IR_i , který se projevuje změnou svorkového napětí. Čím větší proud zdrojem prochází, tím větší je úbytek napětí na vnitřním odporu, a tím větší je i pokles svorkového napětí.

Elektrické zdroje dělíme podle svorkového napětí na zdroje s tvrdým napětím a zdroje s měkkým napětím. Zdroj s tvrdým napětím má malý vnitřní odpor a jeho svorkové napětí málo závisí na zatížení. Zdroj s měkkým svorkovým napětím má velký vnitřní odpor, a proto při změnách zatížení jeho svorkové napětí kolísá.

Na obr. 67 je schéma elektrického obvodu, ve kterém je zapojen zdroj s vnitřním odporem R_i a se svorkovým napětím naprázdno U_0 . Připojíme-li ke zdroji zátěž, tj. vnější obvod s odporem R , začne obvodem procházet proud I a svorkové napětí U_0 poklesne na napětí U . Rozdíl napětí $U_0 - U$ je úbytek napětí na vnitřním odporu zdroje a rovná se IR_i , neboli svorkové napětí zdroje je při zatížení

$$U = U_0 - IR_i$$

Při řešení elektrických obvodů bývá často výhodné nahradit skutečný zdroj napětí ideálním zdrojem napětí nebo ideálním zdrojem proudu. Schéma



Obr. 67. Schéma zapojení skutečného zdroje napětí

náhradního obvodu s ideálním zdrojem napětí je na obr. 68. Ideální zdroj napětí má vnitřní odpor rovný nule a jeho svorkové napětí U_0 je stále, neboť nezávisí na odebraném proudu. Vnitřní odpor skutečného zdroje představuje rezistor zařazený do série s rezistorem se zatěžovacím odporem R_z . Podle schématu na obr. 68 platí

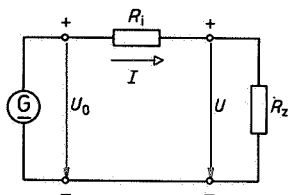
$$U_0 = IR_i + IR_z = I(R_i + R_z)$$

a tedy

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

Protože

$$IR_z = U$$

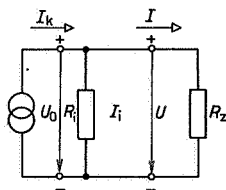


Obr. 68. Schéma náhradního zdroje napětí

platí

$$U_0 - U = IR_i$$

Elektrický zdroj můžeme nahradit ideálním zdrojem proudu, který dodává do obvodu stálý proud, protože jeho vnitřní elektrická vodivost se rovná nule. Schéma náhradního obvodu s ideálním zdrojem proudu je na obr. 69.



Obr. 69. Schéma náhradního zdroje proudu

K ideálnímu zdroji proudu je paralelně zařazen rezistor představující vnitřní odpor skutečného zdroje. Svorkové napětí ideálního zdroje proudu je

$$U_0 = I_k R_i$$

Stálý proud je

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

Svorkové napětí při zatížení je

$$U = I_i R_i = (I_k - I) R_i$$

$$U = I_k R_i - I R_i$$

Protože $I_k R_i = U_0$, platí jako u ideálního zdroje napětí, že

$$U_0 - U = I R_i$$

Ze schématu obvodu s ideálním zdrojem napětí na obr. 68 plyne

$$U = I R_z \quad \text{a} \quad U_0 = I(R_i + R_z)$$

$$U_0 = \frac{U}{R_z}(R_i + R_z)$$

Z toho plyne

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

Je-li vnitřní odpor R_i vzhledem k zatěžovacímu odporu R_z značně malý, je zanedbatelný a platí $U = U_0$.

U ideálního zdroje proudu na obr. 69 je svorkové napětí při zátěži

$$U = IR_z = I_i R_i = (I_k - I) R_i$$

$$IR_z = I_k R_i - IR_i$$

Z toho plyne

$$I = \frac{R_i}{R_i + R_z} I_k$$

Je-li vnitřní odpor R_i mnohem větší než zatěžovací odpor, můžeme R_z zanedbat a proud odebíraný ze zdroje je $I = I_k$.

Elektrické zdroje dělíme na zdroje napětí a zdroje proudu, protože některé zdroje si při proměnlivém zatížení udržují téměř stálé napětí (např. dynamo, alternátory, stabilizátory napětí, Zenerova dioda apod.) a jiné zdroje při proměnlivé zátěži dodávají přibližně stálý proud (např. svářečky na obloukové svařování, výstupní obvody pentody, tranzistoru apod.). Oba zdroje jsou ekvivalentní, jak je patrné z dalšího příkladu.

Příklad 30: Elektrický zdroj má svorkové napětí naprázdno 12 V. Po připojení spotřebiče s odporem 8Ω poklesne svorkové napětí na 10 V. Úkolem je stanovit parametry náhradního zdroje napětí a proudu.

$$U_0 = 12 \text{ V}, U = 10 \text{ V}, R_z = 8 \Omega$$

Řešení:

Proud dodávaný zdrojem ideálního napětí je

$$I = \frac{U}{R_z} = \frac{10}{8} \text{ A} = 1,25 \text{ A}$$

Úbytek napětí vlivem vnitřního odporu zdroje je

$$\Delta U = U_0 - U = (12 - 10) \text{ V} = 2 \text{ V}$$

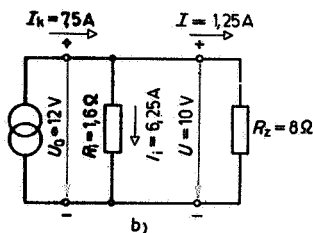
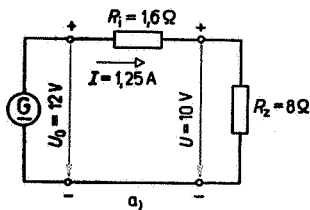
Vnitřní odpor zdroje je

$$R_i = \frac{\Delta U}{I} = \frac{2}{1,25} \Omega = 1,6 \Omega$$

Schéma náhradního obvodu s ideálním zdrojem napětí je na obr. 70a. Proud nakrátko je proud, který prochází zdrojem, spojíme-li jeho svorky vodičem se zanedbatelným odporem. Potom se úbytek napětí vlivem vnitřního odporu zdroje rovná napětí naprázdno, a tedy proud nakrátko je

$$I_k = \frac{U_0}{R_i} = \frac{12}{1,6} \text{ A} = 7,5 \text{ A}$$

Schéma náhradního obvodu s ideálním zdrojem proudu je na obr. 70b.



Obr. 70. Schéma k příkladu 30:
a) náhradní schéma zdroje napětí;
b) náhradní schéma zdroje proudu

Zdroj má tyto parametry:

Stálý proud dodávaný zdrojem

$$I_k = \frac{U_0}{R_i} = \frac{12}{1,6} \text{ A} = 7,5 \text{ A}$$

Proud procházející spotřebičem

$$I = \frac{U}{R_z} = \frac{10}{8} \text{ A} = 1,25 \text{ A}$$

Kontrola napětí na svorkách spotřebiče

$$U = I_k \frac{R_i R_z}{R_i + R_z} = 7,5 \frac{1,6 \cdot 8}{1,6 + 8} \text{ V} = 10 \text{ V}$$

Napětí na svorkách spotřebiče lze také kontrolovat pomocí rovnice

$$U = I_i R_i = (I_k - I) R_i = (7,5 - 1,25) 1,6 \text{ V} = 10 \text{ V}$$

Z výpočtu vidíme, že ideální zdroj napětí i proudu má stejné napětí na prázdko U_0 a stejné napětí U na svorkách vnějšího obvodu. Stálý proud ideálního zdroje proudu se rovná proudu nakrátko ideálního zdroje napětí.

3.23. DĚLIČE NAPĚTÍ

V elektrických obvodech potřebujeme někdy nižší napětí, než je svorkové napětí zdroje. K tomu používáme tzv. *dělič napětí*. Je to v podstatě rezistor s odbočkou (obr. 71), která jej 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 . Dělič s odbočkou přestavitelnou běžcem pohybujícím se po rezistoru se nazývá potenciometr. Můžeme na něm libovolně měnit poměr odporů R_1 , R_2 a získat napětí od nuly až do napětí zdroje. Z nezátíženého děliče proud neodebíráme, kdežto u zatíženého děliče odebíráme proud, který musí být mnohem menší než proud procházející děličem, aby napětí na výstupních svorkách příliš nekleslo.

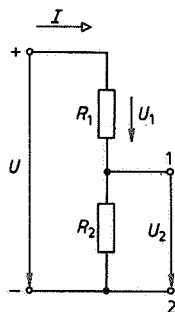
3.23.1. Nezátížený dělič

Schéma nezátíženého děliče je na obr. 71. Zdroj dodává do děliče proud

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

Napětí na výstupních svorkách je

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



Obr. 71. Nezátížený dělič

Pro poměr napětí platí

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

Poznámka: Děliče napětí mají zpravidla odpory řádově kiloohmy. Je proto výhodné při jejich výpočtu dosazovat do Ohmova zákona proud v mA a potom odpor vyjde v kΩ.

Např.: $U = 250 \text{ V}$, $I = 10 \text{ mA}$, $R = ?$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{250 \text{ V}}{10 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = \frac{25}{10^{-3}} \Omega = 25\,000 \Omega = 25 \text{ k}\Omega$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{250 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 25 \text{ k}\Omega$$

nebo $U = 250 \text{ V}$, $R = 10 \text{ k}\Omega = 10 \cdot 10^3 \Omega$, $I = ?$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{250 \text{ V}}{10 \cdot 10^3 \Omega} = \frac{25 \text{ V}}{10^3 \Omega} = 0,025 \text{ A} = 25 \text{ mA}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{250 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 25 \text{ mA}$$

nebo $I = 15 \text{ mA} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ A}$, $R = 5 \text{ k}\Omega = 5 \cdot 10^3 \Omega$, $U = ?$

$$U = IR = 15 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 5 \cdot 10^3 \Omega = 75 \text{ V}$$

$$U = IR = 15 \text{ mA} \cdot 5 \text{ k}\Omega = 75 \text{ V}$$

Příklad 31: Navrhněte nezatížený dělič napětí pro vstupní napětí 250 V a výstupní napětí 200 V. Příkon děliče nemá překročit 0,1 W.

$U = 250 \text{ V}$, $U_2 = 200 \text{ V}$, $P = 0,1 \text{ W}$

Řešení:

Příkon děliče

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Z toho odpor děliče

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{250^2}{0,1} \Omega = 625 \text{ k}\Omega$$

Odpor R_2

$$R_2 = \frac{U_2 R}{U} = \frac{200 \cdot 625\,000}{250} \Omega = 500 \text{ k}\Omega$$

Odpor R_1

$$R_1 = R - R_2 = (625 - 500) \text{ k}\Omega = 125 \text{ k}\Omega$$

Příklad 32: Děličem napětí připojeným na napětí 250 V prochází proud 15 mA. Určete odpory R_1, R_2 tak, aby výstupní napětí děliče bylo

$$U_2 = \frac{3}{5} U_1$$

$$U = 250 \text{ V}, I = 15 \text{ mA}$$

Řešení:

Svorkové napětí zdroje

$$U = U_1 + U_2$$

$$U = U_1 + \frac{3}{5} U_1 = \frac{8}{5} U_1$$

$$U_1 = \frac{5U}{8} = \frac{5 \cdot 250}{8} \text{ V} = 156,25 \text{ V}$$

$$U_2 = \frac{3}{5} U_1 = \frac{3 \cdot 156,25}{5} \text{ V} = 93,75 \text{ V}$$

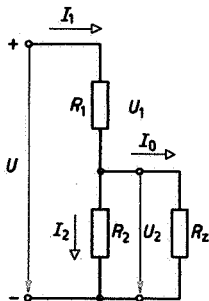
Kontrola

$$U = U_1 + U_2 = (156,25 + 93,75) \text{ V} = 250 \text{ V}$$

Odpory

$$R_1 = \frac{U_1}{I} = \frac{156,25}{15} \text{ k}\Omega = 10,416 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I} = \frac{93,75}{15} \text{ k}\Omega = 6,25 \text{ k}\Omega$$



Obr. 72. Zatížený dělič

Kontrola

$$R = \frac{U}{I} = \frac{250}{15} \text{ k}\Omega = 16,66 \text{ k}\Omega$$

$$R = R_1 + R_2 = (10,416 + 6,25) \text{ k}\Omega = 16,66 \text{ k}\Omega$$

▼ 3.23.2. Zatížený dělič

Schéma zatíženého děliče je na obr. 72. Proud odebíraný děličem ze zdroje je I_1 a proud dodávaný děličem do zátěže s odporem R_z je I_0

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + \frac{R_2 R_z}{R_2 + R_z}}$$
$$I_0 = I_1 - I_2$$

Svorkové napětí mezi výstupními svorkami při zatíženém děliči je

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

Úpravou uvedeného vztahu dostaneme

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

Příklad 33: Navrhněte dělič, který bude připojen na napětí 120 V a bude odebírat proud 12 mA. Na dělič bude připojena zátěž s odporem 12 k Ω a bude jí procházet proud 2 mA.

Určete: Odpory R_1 , R_2 , napětí na zátěži U_2 , proud I_2 , úbytek napětí ΔU na výstupních svorkách a ztrátu v děliči P_z .

$U = 120 \text{ V}$, $I_1 = 12 \text{ mA}$, $I_0 = 2 \text{ mA}$, $R_z = 12 \text{ k}\Omega$

Napětí na výstupu

$$U_2 = I_0 R_z = 2 \cdot 12 \text{ V} = 24 \text{ V}$$

Odpory

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U - U_2}{I_1} = \frac{120 - 24}{12} \text{ k}\Omega = 8 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_2}{I_1 - I_0} = \frac{24}{12 - 2} \text{ k}\Omega = 2,4 \text{ k}\Omega$$

Úbytek napětí na svorkách zatíženého děliče

$$\Delta U = U_{20} - U_2$$

Napětí na svorkách nezatíženého děliče

$$U_{20} = \frac{U R_2}{R_1 + R_2} = \frac{120 \cdot 2,4}{8 + 2,4} \text{ V} = 27,6 \text{ V}$$

$$\Delta k = (27,6 - 24) \text{ V} = 3,6 \text{ V}$$

Ztráta v děliči se rovná rozdílu příkonu a výkonu děliče.

$$P_z = P_1 - P_2 = U I_1 - U_2 I_0 = (120 \cdot 12 \cdot 10^{-3} - 24 \cdot 2 \cdot 10^{-3}) \text{ W} = 1,39 \text{ W}$$

Kontrola výpočtu

$$\blacktriangle U_2 = \frac{U R_2 R_z}{R_1 R_2 + R_1 R_z + R_2 R_z} = \frac{120 \cdot 2,4 \cdot 12}{8 \cdot 2,4 + 8 \cdot 12 + 2,4 \cdot 12} \text{ V} = 24 \text{ V}$$

3.24. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Která svorková napětí u elektrických zdrojů rozeznáváme a jaký je mezi nimi rozdíl?
2. Na čem závisí úbytek napětí vlivem vnitřního odporu zdroje a jak jej vypočítáme?
3. Co je to ideální zdroj napětí a jaké má vlastnosti?
4. Který zdroj má tvrdé napětí a který měkké napětí?
5. Popište ideální zdroj proudu a porovnejte jej s ideálním zdrojem napětí.
6. Co je to proud nakrátko a jak ho vypočítáme?
7. Čemu se rovná stálý proud u ideálního zdroje proudu?
8. Napište rovnici pro výpočet svorkového napětí zdroje při zatížení a vysvětlete, co znamenají jednotlivé členy v rovnici?
9. Co je dělič napětí a k čemu se používá?
10. Co je to potenciometr a jaké je jeho použití v obvodu?
11. Jak rozdělujeme děliče napětí a jaký je mezi nimi rozdíl?
12. Odvoďte vztah pro výpočet výstupního napětí nezatíženého děliče.
13. Jak vypočítáme ztráty v nezatíženém děliči a v zatíženém děliči?
14. Co je příčinou toho, že je výstupní napětí na zatíženém děliči nižší než na nezatíženém děliči?

15. Ve které jednotce vyjde odpor, dosadíme-li do Ohmova zákona napětí ve voltech a proud v miliampérech?
16. Ve které jednotce vyjde proud, dosadíme-li do Ohmova zákona napětí ve voltech a odpor v kiloohmech?
17. Rezistorem s odporem $1,2 \text{ k}\Omega$ prochází ze zdroje se svorkovým napětím naprázdno 250 V proud 200 mA .
Vypočítejte parametry ideálního zdroje napětí i proudy a nakreslete jejich schéma.
18. Spotřebič s příkonem 300 W odebírá proud $2,5 \text{ A}$ ze zdroje se svorkovým napětím naprázdno 125 V . Nahradejte tento zdroj ideálním zdrojem napětí a proudy.
Nakreslete schéma obou náhradních obvodů.
19. Elektrický zdroj má svorkové napětí naprázdno 24 V a dodává do vnějšího obvodu proud 500 mA . Po připojení vnějšího obvodu klesne svorkové napětí zdroje o 5% . Navrhněte a nakreslete schémata obvodu s ideálním zdrojem napětí a proudy.
20. Dělič napětí má odpory $R_1 = 750 \Omega$ a $R_2 = 1250 \Omega$ a je připojen na napětí 100 V . Určete napětí na výstupních svorkách U_2 , proud I procházející děličem a ztráty v děliči.
- ▲ 21. Určete odpory R_1 , R_2 pro nezatížený dělič napětí tak, aby výstupní napětí $U_2 = \frac{3}{5}U$. Dělič bude připojen na zdroj s napětím 250 V a bude z něho odebírat proud 10 mA .
22. Navrhněte nezatížený dělič napětí, který bude po připojení na napětí 220 V odebírat proud 10 mA a na výstupu bude mít napětí 12 V . Určete také ztráty v děliči.
- ▼ 23. Jaký rezistor s odporem R_2 musíme připojit k rezistoru s odporem $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$, aby se snížilo vstupní napětí 24 V na výstupní napětí 6 V ? Jak velký proud bude procházet děličem?
24. Na jaké napětí je připojen dělič složený z rezistorů s odpory $R_1 = 150 \Omega$ a $R_2 = 350 \Omega$, je-li výstupní napětí 84 V ? Jaké ztráty jsou v děliči?
25. Dělič napětí složený z rezistorů s odpory $R_1 = 200 \Omega$ a $R_2 = 300 \Omega$ je připojen na napětí 250 V a zátěž s odporem $R_z = 150 \Omega$. Určete U_2 , U_{20} , I_1 , I_2 , I_0 , P_z a ΔU . Nakreslete schéma děliče.
26. Určete napětí zdroje, na které je připojen dělič složený z rezistorů $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$, zatížený zátěží s odporem $R_z = 10 \text{ k}\Omega$, je-li $U_2 = 200 \text{ V}$. Určete také U_{20} , ΔU , I_1 , I_0 , P_z a nakreslete schéma děliče.
- ▲

3.25. THÉVENINOVA POUČKA

Théveninovu poučku odvodíme pomocí schématu děličů napětí na obr. 73a. Výstupní napětí na nezatíženém děliči je

$$U_{20} = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Napětí zdroje, na které je připojen zatížený dělič (obr. 73b), je

$$U = I_1 R_1 + (I_1 - I_0) R_2$$

Proud odebíraný děličem ze zdroje je

$$I_1 = \frac{U + I_0 R_2}{R_1 + R_2}$$

Výstupní napětí zatíženého děliče je

$$U_2 = (I_1 - I_0) R_2$$

$$U_2 = I_1 R_2 - I_0 R_2$$

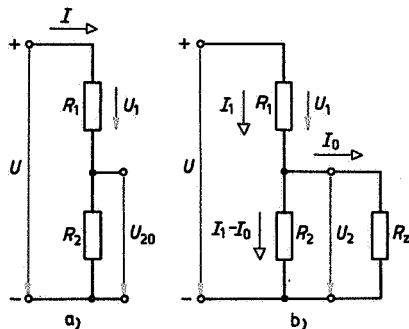
Dosadíme za I_1 a dostaneme

$$U_2 = \frac{U + I_0 R_2}{R_1 + R_2} R_2 - I_0 R_2$$

Po úpravě dostaneme

$$U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_0 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

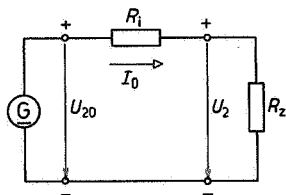
$$U_2 = U_{20} - I_0 R_i$$



Obr. 73. Schéma k odvození Théveninovy poučky:
a) nezatížený dělič; b) zatížený dělič

Podle odvozeného vztahu *Théveninova poučka* zní: Každý elektrický obvod složený z libovolného počtu lineárních součástek (rezistorů s lineárním odporem, cívek bez jader, kondenzátorů), se dvěma výstupními svorkami a zatížený zátěží s odporem R_z můžeme nahradit obvodem (obr. 74) s ideálním zdrojem napětí U_{20} spojeným v sérii s rezistorem představujícím vnitřní odpor R_i .

Svorkové napětí ideálního zdroje U_{20} se rovná napětí na výstupních svorkách daného elektrického obvodu při odpojené zátěži R_z . Vnitřní odpor



Obr. 74. Náhradní schéma vyjadřující Théveninovu poučku

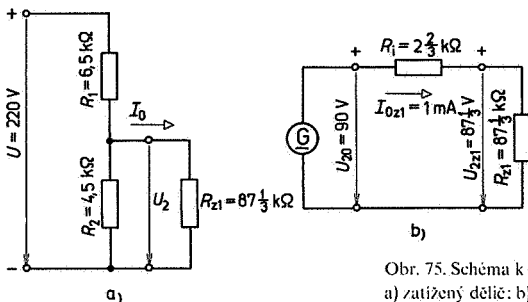
R_i se rovná výslednému odporu vzhledem k výstupním svorkám při odpojené zátěži R_z a při spojení zdrojů napětí nakrátko. Použití v praxi objasníme na dalších příkladech.

Příklad 34: Dělič napětí složený z rezistorů s odpory $R_1 = 6,5 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 4,5 \text{ k}\Omega$ je připojen na napětí 220 V a je postupně zatížen zátěží s odporem $R_{z1} = 87\frac{1}{3} \text{ k}\Omega$; $R_{z2} = 57\frac{1}{3} \text{ k}\Omega$; $R_{z3} = 47\frac{1}{3} \text{ k}\Omega$.

Určete proud odebíraný z děliče a napětí U_2 na zátěži.

Řešení:

Schéma náhradního obvodu je na obr. 75.



Obr. 75. Schéma k příkladu 34:
a) zatížený dělič; b) náhradní schéma děliče

Svorkové napětí ideálního zdroje je

$$U_{20} = U \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 220 \frac{4,5}{6,5 + 4,5} \text{ V} = 90 \text{ V}$$

Vnitřní odpor je

$$R_i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{6,5 \cdot 4,5}{6,5 + 4,5} \text{ k}\Omega = 2 \frac{2}{3} \text{ k}\Omega$$

Proud a napětí na zátěži je

$$I_{0z1} = \frac{U_{20}}{R_i + R_{z1}} = \frac{90}{2\frac{2}{3} + 87\frac{1}{3}} \text{ mA} = 1 \text{ mA}$$

$$U_{2z1} = I_{0z1} R_{z1} = 1 \cdot 87\frac{1}{3} \text{ V} = 87\frac{1}{3} \text{ V}$$

$$U_{2z1} = 87,33 \text{ V}$$

$$I_{0z2} = \frac{90}{2\frac{2}{3} + 57\frac{1}{3}} \text{ mA} = 1,5 \text{ mA}$$

$$U_{2z2} = 1,5 \cdot 57\frac{1}{3} \text{ V} = 86 \text{ V}$$

$$I_{0z3} = \frac{90}{2\frac{2}{3} + 47\frac{1}{3}} \text{ mA} = 1,8 \text{ mA}$$

$$U_{2z3} = I_{0z3} R_{z3} = 1,8 \cdot 47\frac{1}{3} \text{ V} = 85,2 \text{ V}$$

▲ Z výpočtu je patrné, že z náhradního schématu děliče se snadno stanoví proud odebíraný z děliče a výstupní napětí při různém zatížení.

▽ **Příklad 35:** Navrhněte dělič napětí, ze kterého se má odebírat proud 5 mA při napětí 150 V, které může poklesnout pouze o 1 %. Dělič bude připojen na napětí 500 V. Náhradní schéma je na obrázku 76a.

$$U = 500 \text{ V}, U_{20} = 150 \text{ V}, I_0 = 5 \text{ mA}$$

Vnitřní odpor

$$R_i = \frac{\Delta U_{20}}{I_0} = \frac{1,5}{5} \text{ k}\Omega = 0,3 \text{ k}\Omega$$

Napětí na výstupních svorkách

$$U_z = U_{20} - I_0 R_i$$

$$U_z = (150 - 5 \cdot 0,3) \text{ V} = 148,5 \text{ V}$$

Odpor zátěže

$$R_z = \frac{U_z}{I_0} = \frac{148,5}{5} \text{ k}\Omega = 29,7 \text{ k}\Omega$$

Nyní vypočítáme odpory R_1 a R_2 . Podle Théveninovy poučky je

$$U_{20} = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\Delta U_{20} = I_0 R_i$$

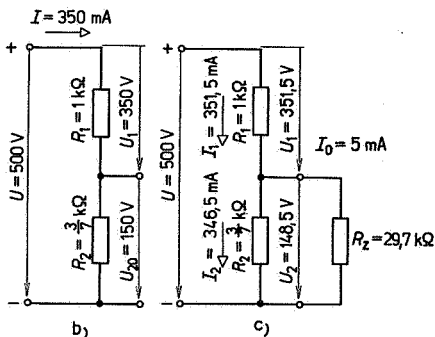
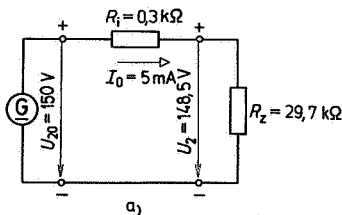
$$R_1 + R_2 = \frac{U}{U_{20}} R_2$$

$$\Delta U_{20} = I_0 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_1 + R_2 = \frac{I_0}{\Delta U_{20}} R_1 R_2$$

V posledních dvou rovnicích jsou levé strany stejné, a proto jsou si rovný i pravé strany rovnic.

$$\frac{U}{U_{20}} R_2 = \frac{I_0}{\Delta U_{20}} R_1 R_2$$



Obr. 76. Schéma k příkladu 35:
a) náhradní schéma děliče;
b) nezatížený dělič;
c) zatížený dělič

Po dosazení a úpravě dostaneme

$$\frac{500 \text{ V}}{150 \text{ V}} = \frac{5 \text{ mA}}{1,5 \text{ V}} R_1$$

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

Z rovnice $U_{20} = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ vypočítáme odpor R_2 .

$$150 \text{ V} = 500 \text{ V} \frac{R_2}{1 \text{ k}\Omega + R_2}$$

z toho

$$R_2 = \frac{3}{7} \text{ k}\Omega \doteq 0,43 \text{ k}\Omega$$

Nyní nakreslíme nezatížený dělič napětí (obr. 76b).

Proud odebíraný ze zdroje

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{500}{1 + \frac{3}{7}} \text{ mA} = 350 \text{ mA}$$

Schéma děliče při zatížení je na obr. 76c.

Napětí na rezistoru R_1 je

$$U_1 = U - U_2 = (500 - 148,5) \text{ V} = 351,5 \text{ V}$$

Proud

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{351,5}{1} \text{ mA} = 351,5 \text{ mA}$$

Proud

$$I_2 = I_1 - I_0 = (351,5 - 5) \text{ mA} = 346,5 \text{ mA}$$

Kontrola

$$U_2 = I_2 R_2 = 346,5 \cdot \frac{3}{7} \text{ V} = 148,5 \text{ V}$$

$$U_2 = I_0 R_2 = 5 \cdot 29,7 \text{ V} = 148,5 \text{ V}$$

Výsledky souhlasí se zadáním příkladu.

Příklad 36: Určete náhradní schéma elektrického obvodu na obr. 77a.

Řešení:

Napětí U_{20} mezi výstupními svorkami při odpojené zátěži se rovná napětí na rezistoru R_2 , protože rezistorem R_3 neprochází žádný proud, a není tedy na něm úbytek napětí. Rezistorem R_2 prochází proud (obr. 77b)

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{36}{3 + 6} \text{ A} = 4 \text{ A}$$

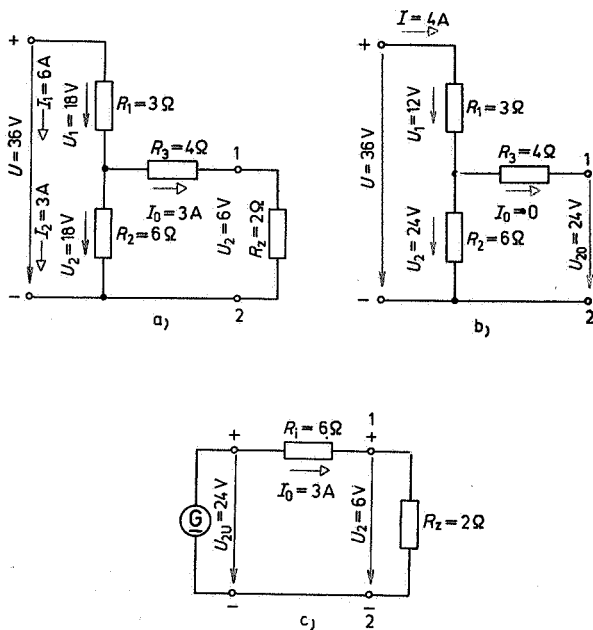
Na rezistoru R_2 je napětí $U_2 = IR_2 = 4 \cdot 6 \text{ V} = 24 \text{ V}$, což se rovná napětí U_{20} (obr. 77c).

Vnitřní odpor

$$R_i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 = \left(\frac{3 \cdot 6}{3 + 6} + 4 \right) \Omega = 6 \Omega$$

Po připojení zátěže s odporem $R_z = 2 \Omega$ prochází náhradním obvodem proud

$$I_0 = \frac{U_{20}}{R_i + R_z} = \frac{24}{6 + 2} \text{ A} = 3 \text{ A}$$



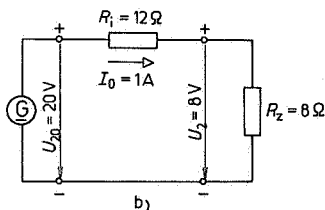
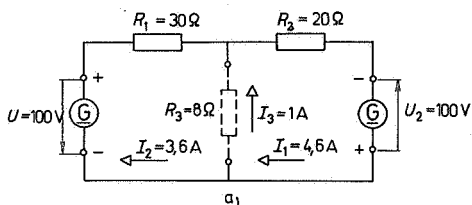
Obr. 77. Schéma k příkladu 36:

a) zatížený dělič: b) nezatížený dělič: c) náhradní schéma děliče

Mezi svorkami 1 – 2 je při zatížení napětí

$$U_2 = I_0 R_z = 3,2 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

Příklad 37: Elektrický obvod podle schématu na obr. 78 nahradte obvodem s ideálním zdrojem napětí.



Obr. 78. Schéma k příkladu 37:
a) základní zapojení;
b) náhradní schéma obvodu

Řešení:

Nejprve vypočítáme proud procházející nezatíženým obvodem.

$$I = \frac{U_1 + U_2}{R_1 + R_2} = \frac{100 + 100}{30 + 20} \text{ A} = 4 \text{ A}$$

Napětí na rezistoru R_1

$$U_{R1} = IR_1 = 4 \cdot 30 \text{ V} = 120 \text{ V}$$

Napětí na výstupních svorkách bez zátěže

$$U_{20} = U_{R1} - U_1 = (120 - 100) \text{ V} = 20 \text{ V}$$

Vnitřní odpor

$$R_i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{30 \cdot 20}{30 + 20} \Omega = 12 \Omega$$

Proud procházející zátěží s odporem $R_z = 8 \Omega$ je

$$I_0 = \frac{U_{20}}{R_i + R_z} = \frac{20}{12 + 8} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

Napětí na zátěži

△

$$U_2 = I_0 R_z = 1 \cdot 8 \text{ V} = 8 \text{ V}$$

● 3.26. ŘAZENÍ ELEKTRICKÝCH ZDROJŮ

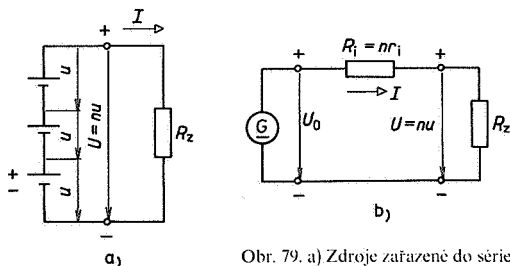
Elektrické zdroje můžeme řadit

- za sebou, tj. do série,
- vedle sebe, tj. paralelně,
- kombinovaně, tj. sériově paralelně.

3.26.1. Sériové řazení elektrických zdrojů

Při sériovém řazení stejnosměrných zdrojů spojíme vždy kladnou svorku jednoho zdroje se zápornou svorkou následujícího zdroje (obr. 79a). Spojením několika zdrojů (např. článků) dostaneme baterii. Nejčastěji spojujeme zdroje se stejnými parametry, tj. se stejným svorkovým napětím nezátíženého zdroje u_0 a se stejným vnitřním odporem r_i . Potom je také stejné svorkové napětí při zatížení u . Je-li počet zdrojů zapojených do série n , je svorkové napětí nezátížené baterie $U_0 = nu_0$ a zatížená baterie $U = nu$. Vnitřní odpor baterie $R_i = nr_i$.

Do série můžeme zapojovat také zdroje s různými parametry, ale potom se svorkové napětí baterie a její vnitřní odpor rovnají součtu svorkových napětí a vnitřních odporů jednotlivých zdrojů. V tomto případě můžeme však baterii zatížit jenom proudem, který je schopen dodávat zdroj s nejmenším jmenovitým proudem.



Obr. 79. a) Zdroje zařazené do série; b) náhradní schéma obvodu

Sériovému spojení zdrojů říkáme také spojení na napětí, neboť je určeno pouze ke zvyšování napětí.

Náhradní schéma obvodu, v němž jsou zdroje zařazeny do série, je na obr. 79b a podle něho je proud odebíraný z baterie

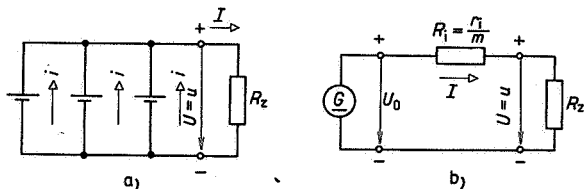
$$I = \frac{U_0}{R_z + R_i} = \frac{nu_0}{R_z + nr_i} = \frac{U}{R_z} = i$$

Proud nakrátko je

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

3.26.2. Paralelní řazení elektrických zdrojů

Pro paralelní spojování stejnosměrných zdrojů (obr. 80) používáme vždy zdroje se stejnými parametry, aby mezi nimi nevznikaly vyrovnávací proudy, čímž by byl provoz ne hospodárný. Při paralelním řazení zdrojů spojíme vzájemně všechny kladné svorky a všechny záporné svorky. Svorkové napětí nezatížené baterie a svorkové napětí při zatížení se rovnají svorkovému napětí při nezatížení a svorkovému napětí při zatížení jednoho zdroje (článku). Je-li počet článků m a jmenovitý proud jednoho článku i , můžeme baterii zatížit proudem $I = mi$.



Obr. 80. a) Zdroje zařazené paralelně; b) náhradní schéma obvodu

Náhradní schéma baterie je na obr. 80b a podle něho proud odebíraný zátěží s odporem R_z je

$$I = \frac{U_0}{R_z + R_i} = \frac{u_0}{R_z + \frac{r_i}{m}} = mi$$

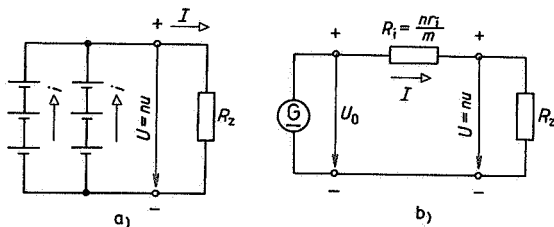
Proud nakrátko je

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

Paralelnímu spojení článků říkáme také spojení na proud, protože ho používáme, potřebujeme-li proud větší, než může trvale poskytovat jeden zdroj.

3.26.3. Kombinované řazení elektrických zdrojů

Potřebujeme-li zvýšit napětí, ale i zvětšit proud, spojujeme zdroje (články) kombinovaně. Vznikne paralelní spojení několika sériově zapojených baterií (obr. 81a). Náhradní schéma je na obr. 81b.



Obr. 81. a) Zdroje zařazené kombinovaně; b) náhradní schéma obvodu

Je-li počet článků spojených do série v jedné baterii n a počet sériových baterií spojených paralelně m , je svorkové napětí nezatížené baterie $U_0 = nu_0$. Svorkové napětí baterie při zatížení $U = nu$ a vnitřní odpor baterie $R_i = nr_i/m$. Jmenovitý proud $I = mi$. Počet článků potřebných pro sestavení baterie se rovná součinu nm .

Podle náhradního schématu na obr. 81b je proud odebíráný z baterie

$$I = \frac{U_0}{R_z + R_i} = \frac{nu_0}{R_z + \frac{nr_i}{m}} = \frac{U}{R_z} = mi$$

Proud nakrátko je

$$I_k = \frac{U_0}{R_i} = \frac{U_0}{\frac{nr_i}{m}} = \frac{mU_0}{nr_i}$$

Příklad 38: Máme akumulátorové olověné články se svorkovým napětím bez zatížení 2,1 V, s vnitřním odporem 0,015 Ω a se jmenovitým proudem 5 A. Máme z nich sestavit baterii se svorkovým napětím při zatížení 24 V a s vybíjecím proudem 20 A. Určete potřebný počet článků, jejich zapojení a proud nakrátko baterie.

$$u_0 = 2,1 \text{ V}, r_i = 0,015 \Omega, i = 5 \text{ A}, U = 24 \text{ V}; I_m = 20 \text{ A}$$

Počet paralelních baterií

$$m = \frac{I_m}{i} = \frac{20}{5} = 4$$

Svorkové napětí jednoho článku při zatížení

$$u = u_0 - ir_i = (2,1 - 5 \cdot 0,015) \text{ V} = 2,025 \text{ V}$$

Počet článků zapojených do série v jedné paralelní baterii

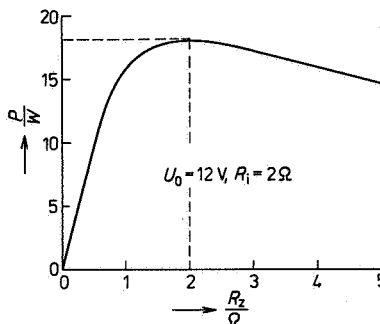
$$n = \frac{U}{u} = \frac{24}{2,025} \doteq 12 \text{ článků}$$

Počet článků potřebných pro sestavení baterie

$$nm = 12 \cdot 4 = 48 \text{ článků}$$

Proud nakrátko

$$I_k = \frac{U_0}{R_i} = \frac{12 \cdot 2,1}{\frac{12 \cdot 0,015}{4}} \text{ A} = 560 \text{ A}$$



Obr. 82. Závislost výkonu P baterie na odporu R_2 zátěže

3.27. NEJVĚTŠÍ VÝKON ODEBÍRANÝ Z ELEKTRICKÉHO ZDROJE

Při stálém svorkovém napětí nezatížené baterie U_0 a při stálém vnitřním odporu R_i závisí výkon odebíraný z baterie pouze na odporu zátěže R_z . Největší výkon P dostaneme, rovná-li se odpor zátěže vnitřnímu odporu baterie (jak je vidět z grafu na obr. 82).

V grafu na obr. 82 je znázorněna závislost výkonu P na odporu R_z zátěže. Výkon P se odebírá z baterie s parametry $U_0 = 12 \text{ V}$, $R_i = 2 \Omega$ při změně odporu R_z postupně po 1Ω od 0 až do 5Ω . Vypočítané veličiny jsou uvedeny v tab. 6. Z ní vidíme, že se *největší výkon $P = 18 \text{ W}$ odebírá při odporu $R_z = 2 \Omega$, tj. při stejně velkém odporu, jako je vnitřní odpor baterie.* O takovém zatížení říkáme, že zátěž přizpůsobujeme zdroji. To se využívá v elektrotechnice. U energetických zdrojů nepřichází taková zátěž v úvahu, protože je nehospodárná.

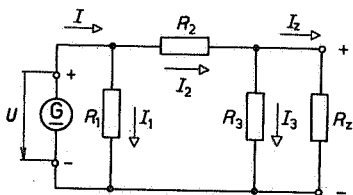
Tabulka 6. Proud, napětí a výkon při různém odporu zátěže

R_z Ω	I A	U V	P W
0	6	0	0
1	4	4	16
2	3	6	18
3	2.4	7.2	17.2
4	2	8	16
5	1.7	8.6	14.6

3.28. OTÁZKY A CVIČENÍ

- ▼
1. Jak zní Théveninova poučka?
 2. Nakreslete schéma vyjadřující Théveninovu poučku a запиšte do něho všechny parametry.
 3. Co znamená spojit zdroj napětí nakrátko a čeho se tím dosáhne?
 4. Jaká je výhoda náhradního schématu vyjadřujícího Théveninovu poučku?

5. Jak určíme, o kolik voltů poklesne výstupní napětí na zatíženém děliči?
6. Proč zapojujeme zdroj napětí do série a jak se to v praxi uskutečňuje?
7. Proč řadíme zdroje napětí paralelně a v čem toto zapojení spočívá?
8. Čeho dosáhneme, zařadíme-li zdroje napětí kombinovaně?
9. Jak určíme zkratový proud akumulátorové baterie?
10. Jak vypočítáte vnitřní odpor akumulátorové baterie, jsou-li články řazeny a) do série, b) paralelně, c) kombinovaně?
11. Čím se liší svorkové napětí nezatíženého zdroje a zatíženého zdroje?
12. Jak velký musí být odpor zátěže, abychom ze zdroje napětí dostali maximální výkon?
13. Co to je přizpůsobení zátěže zdroji a kde se využívá?
14. Dělič složený z rezistorů $R_1 = 75 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$ je připojen na napětí 250 V a odebírá se z něho proud $I_0 = 1 \text{ mA}$. Nakreslete schéma náhradního obvodu a vypočítejte U_{20} , R_1 , U_2 a R_2 .
15. Navrhněte dělič napětí pro připojení na napětí 220 V tak, aby na nezatíženém děliči bylo na výstupu napětí $U_{20} = 120 \text{ V}$, které při odběru proudu $I_0 = 0,5 \text{ mA}$ poklesne nejvíce o 5 V .



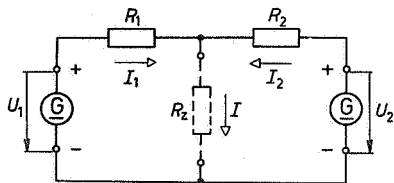
Obr. 83. Schéma zapojení k cvičení 16 z čl. 3,28

16. Na výstupní svorky elektrického obvodu (obr. 83) připojte rezistor s odporem $26,25 \Omega$, nakreslete schéma obvodu a запиšte do něho tyto parametry: $U = 12 \text{ V}$, $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 15 \Omega$, $R_3 = 5 \Omega$ a vypočítejte I , I_1 , I_2 , I_3 a I_z .
17. Stanovte náhradní obvod elektrického obvodu na obr. 84. $U_1 = U_2 = 100 \text{ V}$, $R_1 = 30 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$, $R_z = 8 \Omega$.
18. Ze šesti akumulátorových olověných článků se svorkovým napětím nezatíženého článku $2,1 \text{ V}$, s vnitřním odporem $0,015 \Omega$ a jmenovitým proudem 5 A máte sestavit tři různé baterie. Články máte zapojit

- a) všechny do série, b) všechny paralelně, c) kombinovaně takto: dvě paralelní baterie, z nichž každá obsahuje tři články zapojené do série. Ve všech případech bude na svorkách baterie zapojen spotřebič s odporem $3\ \Omega$. Pro každou baterii vypočítejte: svorkové napětí nezatížené baterie, svorkové napětí při zatížení, proud procházející spotřebičem, výkon odebíraný z baterie a proud nakrátko.

Po výpočtu zhodnoťte jednotlivá zapojení.

19. Kolik galvanických článků musíme zařadit paralelně, aby zátěž s odporem $2,3\ \Omega$ procházel proud $0,6\ \text{A}$, je-li svorkové napětí nezatíženého článku $1,5\ \text{V}$ a vnitřní odpor $0,6\ \Omega$?



Obr. 84. Schéma zapojení k cvičení 17 z čl. 3.28

20. Baterie má šest článků zařazených paralelně a na její svorky je připojena zátěž s odporem $2,4\ \Omega$. Svorkové napětí a vnitřní odpor jednoho článku jsou stejné jako v předcházejícím příkladu. Určete, jak velký bude proud procházející článkem.
21. Návěstní zařízení s vedením má odpor $4\ \Omega$ a je napájeno proudem $2,5\ \text{A}$. Určete, kolik článků je zapotřebí na sestavení baterie a jak je musíme zapojit, má-li jeden článek svorkové napětí bez zatížení $1,5\ \text{V}$, vnitřní odpor $0,45\ \Omega$ a jmenovitý proud $1\ \text{A}$.
22. Určete proud, vnitřní odpor, svorkové napětí a zkratový proud baterie vytvořené z deseti článků se svorkovým napětím jednoho článku bez zatížení $1,5\ \text{V}$ a vnitřním odporem $0,3\ \Omega$, zapojených a) sériově, b) paralelně, je-li na svorky připojena zátěž s odporem $3\ \Omega$.

4. Elektrostatika

Elektrostatika se zabývá elektrickými náboji v klidu. Dosud jsme si všímali převážně *elektrodynamiky*, tj. teorie pohybů nábojů, přesněji částic s náboji.

4.1. ELEKTRICKÉ POLE

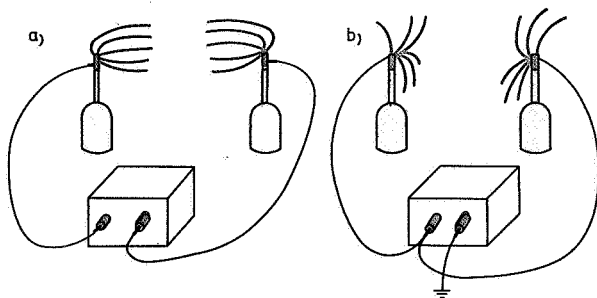
Poznali jsme, že elektricky nabitá tělesa na sebe vzájemně působí silami, tedy přitahují se nebo se odpuzují. Toto silové působení probíhá v elektrickém poli. Budeme se zabývat *elektrostatickým polem*, tedy polem, které se nepohybuje.

Elektrické pole je kolem každého elektricky nabitého tělesa, a to i ve vakuu. Je neviditelné a nedovedeme je žádným smyslem přímo pozorovat.

K znázornění elektrického pole použijeme výsledky dvou pokusů.

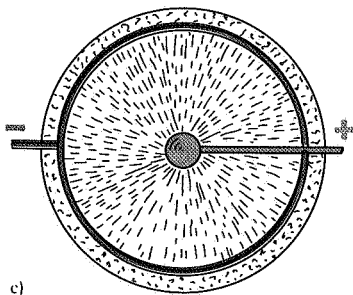
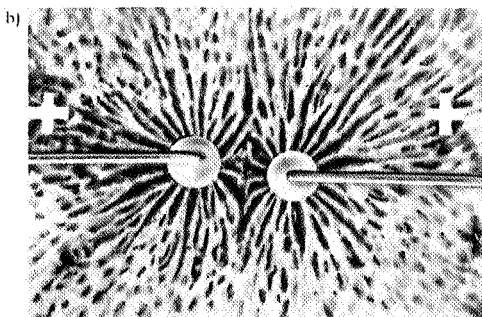
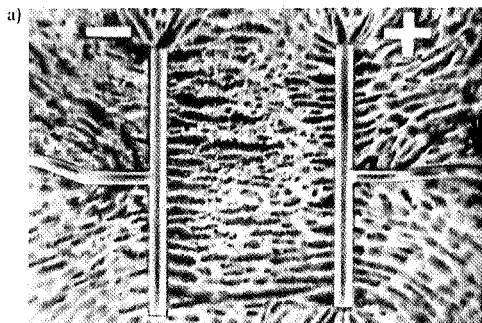
Pokus 1: Na izolovaném stojánku upevníme proužky papíru. Spojíme jej s jedním pólem bezpečného zdroje vysokého napětí. Potom k prvnímu stojánku přiblížíme druhý, který nejprve připojíme k souhlasnému, a potom k opačnému pólu zdroje.

Rozložení proužků je na obr. 85a, b.



Obr. 85. Znázornění elektrického pole proužky papíru
a) mezi nesouhlasně nabitými tělesy;
b) mezi souhlasně nabitými tělesy

Pokus 2: V misce s olejem rozmícháme trochu krupice. Pak do misky vložíme různě tvarované dráty, které budou tvořit elektrody. Po připojení zdroje vysokého napětí k elektrodám se krupice v oleji uspořádá do řetězců (obr. 86).

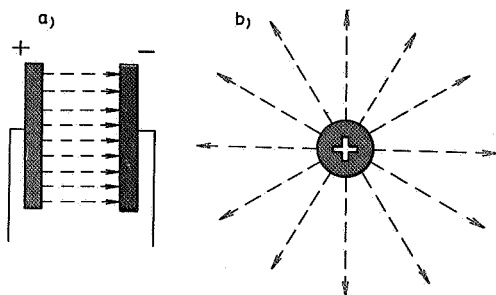


Obr. 86. a), b), c) Znáznornění elektrického pole krupicí

Výsledky pokusů jsou základem znázornění jednotlivých elektrických polí, která vznikají mezi tělesy. Již ze základní školy víte, že průběh elektrických polí se znázorňuje *síločarami*.

Poznámka: Síločáry nezaměňujte za řetězce, které vytváří krupice v oleji nebo za papírky v prostoru.

V místě, kde se projevují větší sílové účinky elektrického pole na nabitě těleso, jsou síločáry blíže u sebe. Mezi dvěma deskami spojenými s opačnými póly zdroje vysokého napětí se vytvářejí rovnoběžné síločáry. O takovém poli říkáme, že je *homogenní*, tj. stejnorodé (obr. 87a). Kolem osamoceně nabitě koule (obr. 87b) vzniká radiální pole.



Obr. 87. a) Homogenní elektrické pole: b) radiální elektrické pole

Dohodou se stanovilo, že *síločáry vycházejí z kladně nabitěho tělesa a končí na záporně nabitěm tělese*. Z osamoceně kladně nabitěho tělesa jdou síločáry do nekonečna, na osamoceně záporně nabitě těleso přicházejí z nekonečna.

Z pozorování různých polí lze udělat tyto závěry:

1. Síločáry vystupují kolmo z těles. Nikde se *neprotínají*.
2. V *homogenním elektrickém poli* jsou síločáry *rovnoběžné*.
3. Na *hranách a hrotech* těles jsou síločáry blíže u sebe.

Elektrické pole je podobně jako gravitační pole formou hmoty. Podstatně se ale od gravitačního pole liší tím, že ho lze odstínit, tj. je možné vytvořit překážku, za kterou elektrické pole nepronikne. U gravitačního pole se takové odstínění nepodařilo vytvořit. V jednom místě může současně působit několik elektrických polí.

Při měření elektrického pole používáme veličinu nazvanou *intenzita elektrického pole*. Tam, kde jsou síločáry blíže u sebe, je větší intenzita elek-

trického pole. Znamená to, že v takovém místě budou také větší silové účinky pole na náboj.

Intenzitu homogenního elektrického pole tedy vyjadřujeme *podílem síly a náboje*

$$E = \frac{F}{Q_0}$$

kde E je intenzita elektrického pole,

F síla, která působí v určitém místě pole na tzv. bodový náboj Q_0 .

Poznámka: Podobně jako jsme ve fyzice nahradili těleso hmotným bodem, můžeme v elektrotechnice uvažovat náboj tělesa soustředěný do jediného bodu. Tak dostaneme bodový náboj. Ve skutečnosti bodový náboj neexistuje, ale my s tímto pojmem pracujeme proto, že nemusíme uvažovat vlivy rozložení náboje na tělesech. Pohyb bodového náboje v elektrickém poli znázorňujeme malou kuličkou z vhodného izolantu.

Intenzita elektrického pole je (stejně jako síla) vektorová veličina. Má tedy nejen velikost, ale také směr.

Jednotkou SI intenzity elektrického pole je *volt na metr* ($V \cdot m^{-1}$). Volt na metr je intenzita elektrického pole v takovém místě, kde na bodový náboj jeden coulomb působí síla jeden newton (čl. 4.3.1).

4.2. COULOMBŮV ZÁKON A PLOŠNÁ HUSTOTA NÁBOJE

4.2.1. Coulombův zákon

Poznali jste, že elektricky nabitá tělesa na sebe působí silami, tedy přitahují se nebo se odpuzují. Podrobnými měřeními stanovil Ch. Coulomb [kulón] koncem 18. století vztah, který nazýváme *Coulombův [kulómbův] zákon*

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Slovně jej vyjádříme takto: Síla F mezi dvěma bodovými náboji Q_1 a Q_2 v klidu je přímo úměrná součinu těchto nábojů a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti r .

Konstanta k v Coulombově zákonu vyjadřuje vliv prostředí, ve kterém na sebe působí bodové náboje. Nyní ji vyjadřujeme nejčastěji vztahem

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

kde π je Ludolfovo číslo,

ϵ tzv. permitivita prostředí.

Jednotkou permitivity je *farad na metr* ($\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$).

Permitivita vakua je

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

Vzduch má přibližně stejnou permitivitu jako vakuum, takže v našich výpočtech nebudeme obě permitivity odlišovat.

Výpočtem dostaneme pro vakuum

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}} \doteq 9 \cdot 10^9 \frac{\text{m}}{\text{F}}$$

Poznámka: Zjednodušené výpočty s využitím bodových nábojů dávají přijatelné výsledky i pro kulová tělesa. Pro běžné výpočty používáme často vztahy platné pro poněkud jiné podmínky. Pokud je to nutné, opravujeme je s využitím konstant, které se buď vypočítají, nebo jsou empirické, tj. získané pokusem.

Příklad 39: Dvě kuličky s náboji $+1 \mu\text{C}$ a $-5 \mu\text{C}$ jsou od sebe vzdáleny 100 mm. Jakou silou na sebe působí ve vzduchu?

$Q_1 = 1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{C}$, $Q_2 = 5 \mu\text{C} = 5 \cdot 10^{-6} \text{C}$, $r = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{m}}{\text{F}} \frac{10^{-6} \text{C} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{C}}{0,01 \text{ m}^2} = 4,5 \text{ N}$$

Kuličky se přitahují silou 4,5 N.

Ve všech látkách se elektrické pole zeslabuje, a to různě, podle druhu látky. Např. ve skle se zeslabuje pětikrát až desetkrát více než ve vakuu, ve vodě asi 80krát více než ve vakuu. Toto zeslabení vyjadřuje tzv. *relativní permitivita*

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Relativní permitivita je *poměr permitivity sledované látky ϵ k permitivitě vakua ϵ_0* . Permitivity různých látek jsou v elektrotechnických tabulkách. Po dosazení relativní permitivity dostaneme upravený Coulombův zákon

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

S využitím Coulombova zákona zjistíme, jak se mění intenzita elektrického pole se vzdáleností od bodového náboje. Pro intenzitu elektrického pole platí

$$E = \frac{F}{Q_0} = \frac{k \frac{Q Q_0}{r^2}}{Q_0} = k \frac{Q}{r^2}$$

Z toho je zřejmé, že intenzita elektrického pole *závisí na druhé mocnině vzdálenosti* od bodového náboje, a to *nepřímo úměrně*. Tedy v místě dvakrát vzdálenějším od náboje je intenzita pole čtyřikrát menší, v místě třikrát vzdálenějším je devětkrát menší atd.

Vztah pro intenzitu elektrického pole upravíme dosazením za konstantu k takto:

$$E = k \frac{Q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q}{r^2}$$

Příklad 40: Určete intenzitu elektrického pole, kterou vyvolá ve vzduchu osamocená kulička s nábojem $5 \mu\text{C}$ ve vzdálenosti 20 mm od jejího středu. $Q = 5 \mu\text{C} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$, $r = 0,02 \text{ m}$, $k = 9 \cdot 10^9 \text{ m/F}$

$$E = k \frac{Q}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-6}}{0,02^2} \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1,125 \cdot 10^8 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

Intenzita elektrického pole ve sledovaném místě je asi $1,1 \cdot 10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$.

Příklad 41: Ve vzdálenosti 0,2 m od bodového náboje $10 \mu\text{C}$ působí ve vzduchu elektrické pole vyvolané tímto nábojem na jiný náboj silou 2,5 N. Určete tento náboj.

$Q = 10 \mu\text{C} = 10^{-5} \text{ C}$, $r = 0,2 \text{ m}$, $F = 2,5 \text{ N}$

$$E = k \frac{Q}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-5}}{0,2^2} \frac{\text{V}}{\text{m}} = 2,25 \cdot 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$E = \frac{F}{Q}$$

$$Q = \frac{F}{E} = \frac{2,5}{2,25 \cdot 10^6} \text{ C} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

Náboj je $1,1 \mu\text{C}$.

Poznámka: Vzhledem k tomu, že jednotku volt na metr odvodíme až v čl. 4.3.1, dosadíme podobně jako ve fyzice na základní škole přímo výslednou jednotku volt na metr.

▼ 4.2.2. Plošná hustota náboje

Na tělesech může být náboj rozložen na různém plošném obsahu, a proto se uvádí tzv. *plošná hustota náboje*

$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

Plošná hustota elektrického náboje je *podíl náboje Q a plošného obsahu S* , na kterém je náboj rovnoměrně rozložen. Jednotkou plošné hustoty je *coulomb na čtverečný metr* ($\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$). Rovnoměrně je rozložen např. náboj na osamocené kouli.

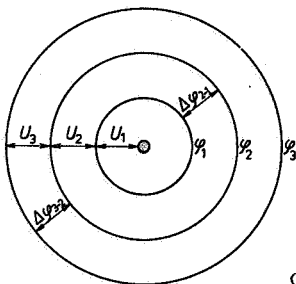
▽ Vztah mezi intenzitou elektrického pole a plošnou hustotou odvodíme takto: Vzhledem k tomu, že povrch koule je $S = 4\pi r^2$, je na kouli plošná hustota náboje

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

Ze vztahů

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

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{Q}{4\pi r^2} \frac{1}{\epsilon} \epsilon = \epsilon E$$



Obr. 88. Hladina potenciálu

△ jsme úpravami dostali

$$| \quad \sigma = \varepsilon E$$

▲ *Plošná hustota elektrického náboje je přímo úměrná intenzitě elektrického pole. V různých prostředích závisí plošná hustota na permitivitě prostředí ε .*

4.3. PŮSOBNÍ ELEKTRICKÉHO POLE NA VODIČ A NA DIELEKTRIKUM

4.3.1. Elektrický potenciál a napětí

Elektrický potenciál souvisí s prací, kterou musíme vykonat (popř. s prací, kterou získáme) při přemístění elektrického náboje v elektrickém poli.

Vycházíme z toho, že bodový náboj budeme přenášet z místa s nulovým potenciálem φ_0 do určitého bodu, který má potenciál φ . Potenciál určíme vztahem

$$| \quad \varphi = \frac{W}{Q_0}$$

kde W je práce vynaložená k přenesení náboje Q_0 z místa nulového potenciálu.

Číselná hodnota elektrického potenciálu určitého bodu se rovná hodnotě práce, kterou musíme vykonat, abychom přenesli kladný elektrický náboj z místa nulového potenciálu do uvažovaného místa elektrického pole.

V praxi za místo nulového potenciálu považujeme zem nebo uzemněnou část přístroje, popř. zařízení.

Jednotkou potenciálu je *volt (V)*, tedy stejná jednotka jako pro napětí.

Místa se stejným potenciálem znázorňujeme *hladinami potenciálu* (obr. 88). Mají různý průběh, např. kolem nabitě koule jsou to kulové plochy.

Mezi dvěma různými hladinami potenciálu je *potenciálový rozdíl*

$$\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$$

Mezi dvěma body elektrického pole s potenciálovým rozdílem $\Delta\varphi$ je *elektrické napětí*

$$| \quad U = \varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi$$

Potenciálový rozdíl (a tedy ani napětí) nemůže být na stejné hladině potenciálu, např. na stejné svorce zdroje napětí. Zdroj napětí se vyznačuje právě tím, že mezi jeho svorkami se trvale udržuje potenciálový rozdíl. Je tedy mezi nimi napětí.

Poznámka: Při přesném vyjadřování bychom vždy měli uvádět místa, mezi nimiž je napětí, např. zdroj, mezi jehož svorkami je napětí 42 V. Běžně se však zkráceně říká, že zdroj má napětí 42 V.

▽ Práce W , kterou konáme silou F při přenesení náboje z místa nulového potenciálu do vzdálenosti d , je

$$W = Fs = Fd$$

(Ve vztahu známém z fyziky nahradíme dráhu s vzdáleností d .)

Ze vztahu pro intenzitu elektrického pole

$$E = \frac{F}{Q_0}$$

vyjádříme sílu

$$F = Q_0 E$$

a po dosazení dostaneme vztah pro práci

$$W = Q_0 E d$$

Dále vyjádříme elektrický potenciál

$$\varphi = \frac{W}{Q_0} = \frac{Q_0 E d}{Q_0} = E d$$

tedy

$$\varphi = E d$$

Z tohoto vztahu odvodíme jednotku SI intenzity elektrického pole – volt na metr

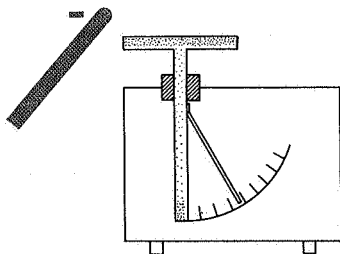
$$\triangle [E] = \frac{[\varphi]}{[d]} = \frac{\text{V}}{\text{m}} = \text{V} \cdot \text{m}^{-1}$$

● 4.3.2. 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. To je ve shodě s našimi poznatky o uzavřeném elektrickém obvodu.

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 na 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 nazvaný *elektrická indukce*.

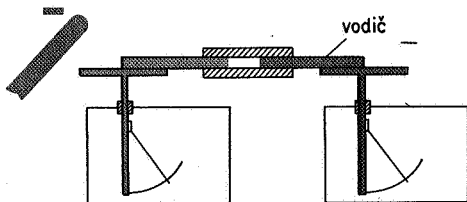


Obr. 89. Elektrometr nabitý elektrickou indukcí

Pokus: K elektrometru přiblížíme kladně nabitou tyč. Pozorujeme listek elektrometru a potom tyč oddálíme.

Při pokusu jsme vytvořili elektrické pole. Lístek elektrometru se v něm vychýlil, protože elektrony se působením elektrického pole přesunuly do části blíže k tyči (obr. 89). Jakmile pole zaniklo, rozdělily se elektrony opět rovnoměrně a elektrometr byl elektricky neutrální. Elektrickou indukcí se tedy nabíjí vodič dvěma nesouhlasnými náboji. Na jednom konci je vodič kladný a na druhém záporný.

Pokus: Dva elektrometry spojíme kovovou tyčkou (obr. 90). K jednomu elektrometru se přiblížíme záporně nabitou tyčí. Potom izolovaným držadlem sejmem kovovou spojku mezi elektrometry.



Obr. 90. Elektrický náboj dvou spojených elektrometrů

Při pokusu je patrné, že oba elektrometry se v elektrickém poli nabíjejí, aniž se jich dotkneme elektricky nabitou tyčí.

Vlivem elektrické indukce se elektrony přesunou na vzdálenější elektrometr, kdežto bližší zůstane kladný (obr. 90).

Přerušením vzájemného spojení elektrometrů v době, kdy jsou ještě v elektrickém poli nabitě tyče, znemožníme po zániku elektrického pole návrat elektronů na bližší elektrometr. Oba elektrometry se *nabíly elektrickou indukcí*.

Elektrickou indukcí lze přemístit i elektrony v přímém vodiči. Vodičem proběhne krátkodobý proud, který je způsoben tím, že pole působí silou na volné elektrony. Po malé chvíli se stav ustálí a proud již vodičem neprochází. Ve vodiči jsou dva náboje. Jsou stejně velké, ale jeden je kladný a druhý záporný. Nově rozdělené náboje uvnitř vodiče vytvoří *elektrické pole* s intenzitou E_i , které působí *proti vnějšímu elektrickému poli* s intenzitou E_e . Výsledná intenzita elektrického pole ve vodiči se pak rovná nule.

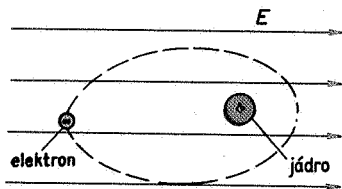
Vodič ovšem musí procházet různými hladinami potenciálu. Pokud by ležel na jedné hladině potenciálu, indukovaný náboj by nevznikl.

4.3.3. Dielektrikum v elektrickém poli

Dielektrikum je jiný název pro izolant. Poznali jsme již, že dokonalý izolant neobsahuje žádné částice, které by v něm mohly vést proud.

Celkový kladný náboj v 1 kg 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 (póly) atomu, a tím dojde k *polarizaci atomu* (obr. 91). Polarizaci se v dielektriku z jednotlivých atomů (a v některých případech z molekul) vytvářejí *dipóly* (dvojpóly). Na obr. 91 jsou dipóly naznačeny jako podlouhá tělíska. Jde však pouze o model.

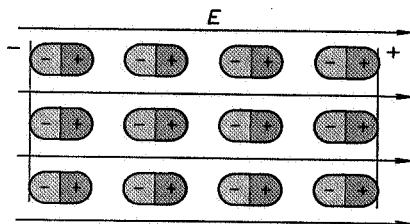


Obr. 91. Polarizace atomu

Vlivem polarizace povrchových atomů tělesa se polarizované těleso z dielektrika jeví jako *elektricky nabitě*, protože jedna jeho povrchová vrstva má kladný náboj a druhá záporný náboj (obr. 92).

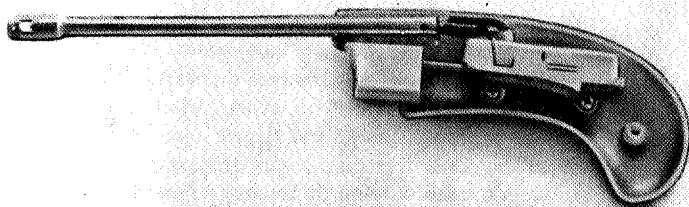
Uspořádáním dipólů v dielektriku vzniká elektrické pole v dielektriku, které vždy zmenšuje vnější pole. Z toho důvodu je relativní permitivita látek vždy menší než relativní permitivita vakua.

Jakmile elektrické pole v dielektriku zanikne, mizí i polarizace dielektrika. Těleso je opět elektricky neutrální.



Obr. 92. Model polarizovaného dielektrika

Polarizace může vznikat nejen působením elektrického pole, ale také tlakem na tzv. *piezoelektrické krystaly*. Na jejich povrchu mohou vzniknout velké potenciálové rozdíly. Toho se využívá k získání napětí pro jiskrový výboj v *piezoelektrických zapalovačích plynů* (obr. 93) a v *piezoelektrických přenoskách gramofonů*.



Obr. 93. Piezoelektrický zapalovač

4.3.4. Elektrická indukce, elektrická pevnost

- ▽ Jako pomocná veličina se někdy používá *elektrická indukce* D . Charakterizuje indukční účinky elektrického pole. Elektrická indukce je *přímo úměrná náboji* Q a *nepřímo úměrná plošnému obsahu* S dielektrika, kterým náboj prochází (obr. 94).

$$D = \frac{Q}{S}$$

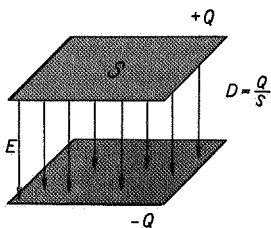
Dosažením do tohoto vztahu získáme jednotku elektrické indukce *coulomb na čtverečný metr* ($C \cdot m^{-2}$).

Mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrostatického pole je vztah

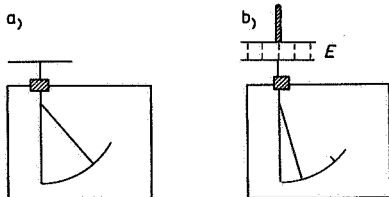
$$D = \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$$

kde ε je permitivita příslušného prostředí.

Stejně jako intenzita elektrického pole je elektrická indukce vektorová veličina.



Obr. 94. K odvození elektrické indukce



Obr. 95. Podstata kondenzátoru

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 (čl. 2.4), ale také na mechanickém namáhání (např. v místě ohybu je elektrická pevnost izolantu menší). Elektrickou pevnost ovlivňuje také teplota, tlak a vlhkost prostředí, ve kterém izolant je.

Pravděpodobnost průrazu izolantu se zmenší, upraví-li se izolant do několika vrstev. Tak vznikne tzv. *vrstvený izolant*, v němž se po průrazu jedné vrstvy nenaruší izolační schopnost ostatních vrstev.

Jednotkou SI elektrické pevnosti je *volt na metr* ($V \cdot m^{-1}$).

U pevných dielektrik se nejčastěji předpokládá, že čím je vrstva dielektrika tlustší, tím je větší také jeho elektrická pevnost. Z přírodních látek má největší elektrickou pevnost slída, asi $80 MV \cdot m^{-1}$. Údaje o elektrické pevnosti jsou v tabulkách.

4.4. KAPACITA, KONDENZÁTORY

Pokus: Elektrometr nabíjíme záporně nabitou tyčí. Pozorujeme výchylku listku elektrometru po každém dotyku.

Zprvu je zřejmé, že po každém dotyku se listek vychýlí více. To je v souladu s naším předpokladem, že elektrony přecházejí z tyče na elektrometr. Od jisté hranice však žádným dalším dotykem nelze listek více vychýlit. Znamená to, že již elektrometru nepředáváme žádný další náboj.

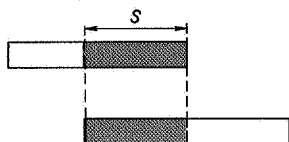
Každé těleso je schopné pojmout jen určitý největší volný náboj. Říkáme, že má určitou *kapacitu C*. Jednotkou kapacity je *farad* (F). Pro praxi je to příliš velká jednotka, převážně se používá pikofarad, $1 pF = 10^{-12} F$, nanofarad, $1 nF = 10^{-9} F$, a mikrofaraad, $1 \mu F = 10^{-6} F$.

Pro elektrotechniku se vyrábějí součástky, které mají obzvlášť velkou kapacitu, tzv. *kondenzátory*. Podstatu kondenzátoru objasníme pokusem.

Pokus: Na elektrometr položíme kruhovou desku a elektrometr nabijeme největším nábojem, který elektrometr pojme (obr. 95a). Potom k elektrometru přiblížíme izolovanou kovovou desku (obr. 95b).

Podle toho, že listek má po přiblížení desky menší výchylku, je zřejmé, že potenciál elektrometru klesl. Elektrometru můžeme dodat ještě další náboj, jeho kapacita se přiložením desky zvětšila.

Soustava dvou desek oddělených dielektrikem tvoří *deskový kondenzátor*. Pokusy zjistíme, že kapacita deskového kondenzátoru závisí na plošném obsahu *účinné plochy*, tj. části, kterou se desky kondenzátoru překrývají (obr. 96). Vložením slidové destičky mezi desky kondenzátoru potvrdíme,



Obr. 96. Účinná plocha kondenzátoru

že kapacita kondenzátoru závisí také na *druhu dielektrika* mezi deskami. Tento jev vysvětlujeme polarizací dielektrika, která zmenšuje intenzitu elektrického pole.

- ▽ V deskovém kondenzátoru se mezi deskami vytváří homogenní elektrické pole s intenzitou E (obr. 97). Při vzdálenosti desek d je potenciál jedné desky vzhledem ke druhé desce, spojené se zemí,

$$\varphi = Ed$$

Plošná hustota elektrického náboje je

$$\sigma = \varepsilon E = D = \frac{Q}{S}$$

Z toho náboj

$$Q = \varepsilon ES = DS$$

Po dosazení

$$E = \frac{\varphi}{d}$$

dostaneme

$$Q = \frac{\varepsilon S}{d} \varphi = C \varphi$$

Po dělení φ dostaneme

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}$$

△

Pro deskový kondenzátor platí

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}$$

což vyplývá z předcházejícího vztahu. Slovy jej vyjádříme takto: *Kapacita deskového kondenzátoru je přímo úměrná obsahu S účinné plochy kondenzátoru a nepřímo úměrná vzdálenosti d desek kondenzátoru. Vliv dielektrika mezi deskami kondenzátoru vyjadřuje permitivita ε .*

Při nabíjení kondenzátoru se zvětšuje potenciál mezi deskami, protože platí

$$Q = C \varphi$$

a z toho

$$\varphi = \frac{Q}{C}$$

Místo potenciálu můžeme uvažovat *napětí* mezi deskami kondenzátoru a dostaneme

$$U = \frac{Q}{C}$$

Při pokusech vidíme, že napětí, které je mezi deskami kondenzátoru, je přímo úměrné náboji a nepřímo úměrné kapacitě kondenzátoru. Jednodušeji řečeno, kondenzátor s malou kapacitou se stejným nábojem nabije na vyšší napětí než kondenzátor s velkou kapacitou.

Úpravou vztahu

$$U = \frac{Q}{C}$$

dostaneme

$$C = \frac{Q}{U}$$

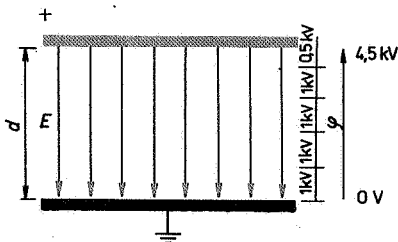
Dosažením pro jednotku kapacity farad dostaneme vztah

$$F = \frac{C}{V}$$

Jednotka farad se tedy odvodí z jednotky coulomb a volt. *Farad* je kapacita elektrického kondenzátoru, který při napětí *jeden volt* pojme náboj *jeden coulomb*.

▼ S využitím jednotky farad odvodíme jednotku permitivity farad na metr ($F \cdot m^{-1}$):

$$\varepsilon = \frac{Cd}{S}$$



Obr. 97. Elektrické pole mezi deskami kondenzátoru

a po dosazení jednotek dostaneme

$$\frac{\text{F} \cdot \text{m}}{\text{m}^2} = \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$$

Příklad 42: Vypočítejte kapacitu deskového kondenzátoru, jehož tloušťka dielektrika je 0,1 mm. Dielektrikem je kondenzátorový papír s relativní permitivitou 4. Obsah účinné plochy elektrod je 0,25 m².

$$d = 0,1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}, \quad \epsilon_r = 4, \quad S = 0,25 \text{ m}^2, \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$C = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 0,25}{10^{-4}} \text{ F} \doteq 8,8 \cdot 10^{-8} \text{ F} = 88 \text{ nF}$$

Kondenzátor má kapacitu 88 nF.

Příklad 43: Určete náboj kondenzátoru s kapacitou 1 μF při napětí 300 V.

$$C = 1 \text{ μF} = 10^{-6} \text{ F}, \quad U = 300 \text{ V}$$

$$U = \frac{Q}{C}$$

$$Q = CU = 10^{-6} \text{ F} \cdot 300 \text{ V} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ C} = 300 \text{ μC}$$

Náboj kondenzátoru je 300 μC, je tedy nesmírně malý ve srovnání s nábojem akumulátorů. Kondenzátory jsou vhodné pouze ke krátkodobému uchování poměrně malých nábojů v elektrických obvodech.

Každé elektrické pole má energii, která odpovídá práci vynaložené na vytvoření pole. Vzhledem k tomu, že elektrická práce je

$$W = UIt$$

platí za předpokladu rovnoměrného vzestupu napětí pro energii elektrického pole

$$E_e = \frac{UIt}{2} = \frac{UQ}{2}$$

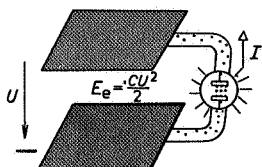
Vzhledem k tomu, že $Q = CU$, je energie elektrického pole

$$E_e = \frac{CU^2}{2}$$

Poznámka: Značku E používáme také pro intenzitu elektrického pole.

Pokus: Kondenzátor s velkou kapacitou nabijeme tím, že jej připojíme ke zdroji stejnosměrného napětí asi 100 V. Potom jej od zdroje odpojíme a připojíme k němu doutnavku.

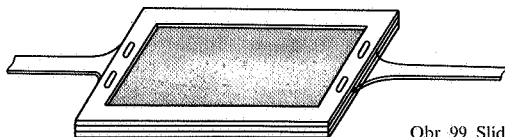
Při nabíjení se kondenzátoru dodává práce tím, že na něj přecházejí elektrony a hromadí se na jeho záporně nabitě desce. Z toho, že při vybíjení kondenzátoru přes doutnavku doutnavka svítí, je zřejmé, že kondenzátor dodává do obvodu práci. Konají ji elektrony, které unikají ze záporně nabitě desky na kladnou desku, a to na úkor energie elektrického pole (obr. 98).



Obr. 98. Práce dodaná elektrickým polem při vybíjení kondenzátoru

Upozornění: V obvodech s kondenzátory může *po odpojení* od zdroje zůstat několik minut *značné napětí*. Podle bezpečnostních předpisů se proto před zahájením prací na takových obvodech (např. v televizorech a také v rozvodnách) musí vždy přezkoušet, zda mezi částmi obvodu, na kterých se bude pracovat, není napětí. Způsob vybíjení kondenzátorů určují bezpečnostní předpisy.

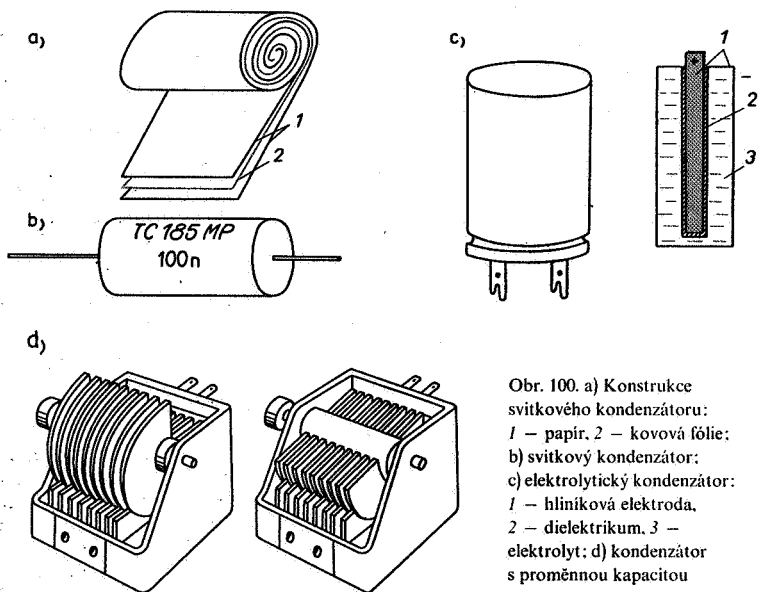
V současné době se vyrábí větší počet druhů kondenzátorů. Deskovému kondenzátoru, který jsme používali při pokusech, se nejvíce blíží *slidové kondenzátory* (obr. 99). Jako dielektrikum mají jednu nebo několik slidových destiček. Kovové desky v nich nahrazují polepy vytvořené postříbřením slídy. Někdy se tyto destičky lisují do pouzdra z tvrditelné lisovací hmoty, jindy jsou v ochranných destičkách z tvrzeného papíru. Vývody jsou drátové.



Obr. 99. Slidový kondenzátor

Kondenzátory s *papírovým dielektrikem* mají místo desek proužky kovové fólie a mezi ně se jako dielektrikum vkládá speciálně upravený velmi tenký papír (obr. 100a). Spolu s fóliemi se papír svine do válečku a ten se opatří ochranným povlakem z termoplastu, popř. z kovu (obr. 100b).

Kondenzátory z *metalizovaného papíru* (označují se MP) mají metalizovanou (tj. pokovenou) vrstvu nanesenou na papíru. Proti kondenzátorům s papírovým dielektrikem mají menší hmotnost a menší objem. Jejich předností je také to, že při průrazu dielektrika nedojde k trvalému zkratu. Říkáme, že se kondenzátor po průrazu regeneruje, a může tedy sloužit dále. Ostatní druhy kondenzátorů se průrazem většinou ničí. V obvodu pak vytvářejí zkrat.



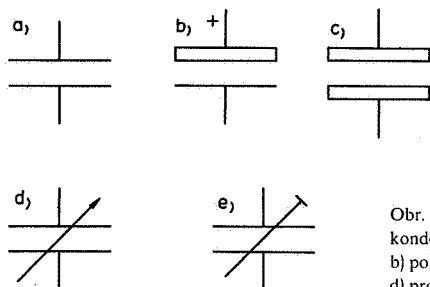
Obr. 100. a) Konstrukce svitkového kondenzátoru: 1 – papír, 2 – kovová fólie; b) svitkový kondenzátor; c) elektrolytický kondenzátor: 1 – hliníková elektroda, 2 – dielektrikum, 3 – elektrolyt; d) kondenzátor s proměnnou kapacitou

Elektrolytické kondenzátory (obr. 100c) mají hliníkové elektrody obklopené kapalným nebo tuhým elektrolytem. Ze všech kondenzátorů mají největší kapacitu, nyní až řádu milifaradů. Při jejich zapojení musí být dodrženo správné *pólování*, tedy kladný pól se spojí s kladným pólem

zdroje, jinak se kondenzátor zničí. Ve schématech mají tyto kondenzátory buď zvláštní schematickou značku, nebo se u jejich značky připisuje značka + pro vyznačení kladného pólu kondenzátoru.

Zvláštním druhem kondenzátorů jsou *kondenzátory s proměnnou kapacitou*. Kapacita se na nich mění tím, že se jejich desky posunují, a tím se mění jejich účinná plocha (obr. 100d).

Výčet druhů kondenzátorů není úplný, budete se s nimi seznamovat později. Značky kondenzátorů pro elektrická schémata jsou na obr. 101.



Obr. 101. Schematické značky kondenzátorů: a) neproměnný; b) polarizovaný; c) bipolární; d) proměnný; e) doladovací

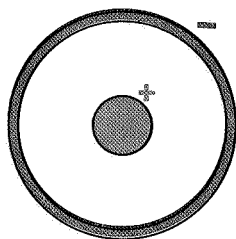
Poznámka: Údaje na kondenzátorech se dříve vyznačovaly ve vztahu k jednotce pikofarad, takže na starších kondenzátorech značka 50M odpovídá $50 \cdot 10^6 \text{ pF} = 50 \mu\text{F}$. Podle současné normy se k označení používají předpony uvedené u předpon SI v tab. 3 na předsádce, tedy v našem případě 50 μ .

Na kondenzátorech musíme sledovat *jmenovité napětí*. Vzhledem k různému použití jsou jmenovitá napětí kondenzátorů od několika voltů (6 V) až po několik tisíc voltů. Uvažujeme vždy největší možné napětí, i když působí krátkodobě, protože pro průraz je rozhodující.

4.5. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Kde je elektrické pole a jak se projevuje?
2. Čím znázorňujeme průběh elektrického pole? Znázorněte homogenní a radiální elektrické pole.

3. Nakreslete průběh siločar mezi kladně nabitou destičkou umístěnou ve středu drátěného kroužku (obr. 102) a tímto kroužkem.
4. Jaká je intenzita elektrického pole v místě, kde pole působí na náboj $12 \mu\text{C}$ silou $0,6 \text{ N}$?
5. Určete sílu, kterou na sebe působí dva bodové náboje, $20 \mu\text{C}$ a $60 \mu\text{C}$, ve vzduchu, jsou-li od sebe vzdáleny 20 mm .
6. Kulička má náboj $2 \cdot 10^{-7} \text{ C}$. Jaká je intenzita jejího elektrického pole ve vakuu ve vzdálenosti 50 cm od kuličky?
7. Vyhledejte relativní permitivitu pěti různých látek. Potom vypočítejte permitivitu těchto látek.



Obr. 102. K příkladu 3
z čl. 4.5

8. Určete vzájemnou vzdálenost dvou bodových nábojů, $6 \mu\text{C}$ a $20 \mu\text{C}$, které na sebe působí ve vakuu silou $0,01 \text{ N}$.
9. Určete plošnou hustotu náboje na kouli s průměrem $0,1 \text{ m}$, kterou nabijeme nábojem 1 mC .
10. Jak se rozmístí volné elektrony ve vodiči, který je v elektrickém poli?
11. Jaký vliv má polarizace na atomy, popř. molekuly dielektrika? Za jakých podmínek k ní dochází?
12. Porovnejte vliv vnějšího elektrického pole na vodič a na dielektrikum.
13. Deskový kondenzátor má obsah účinné plochy desek 80 cm^2 . Jaká je jeho kapacita, je-li mezi jeho deskami, vzdálenými od sebe 1 mm , vzduch?
14. Které druhy kondenzátorů znáte? Jak jsou konstruovány? Který z nich se může regenerovat?
15. Co znamenají údaje 330 n , 250 V na kondenzátoru?
16. Zapište pomocí značek, které se píšou na kondenzátorech: $0,5 \mu\text{F}$, $50 \mu\text{F}$, $22\,000 \text{ pF}$, 47 nF , 2 mF , $6,8 \text{ pF}$, $0,1 \text{ pF}$.

5. Základy elektrochemie

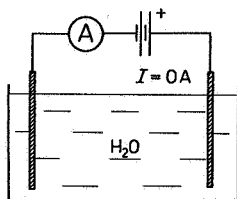
Elektrochemie se zabývá chemickými ději spojenými s přeměnou chemické energie na elektrickou a naopak.

● 5.1. VEDENÍ ELEKTRICKÉHO PROUDU V KAPALINÁCH

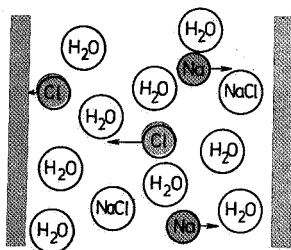
Pokus: Do čisté kádinky nalijeme destilovanou vodu a do ní vložíme dvě uhlíkové elektrody. Takto uspořádané zařízení připojíme ke zdroji stejnosměrného napětí a ampérmetrem měříme proud v obvodu (obr. 103).

Zjistíme, že obvodem neprochází proud. Destilovaná voda je izolant. Jakmile do vody nasypeme trochu kuchyňské soli, začne proud obvodem procházet.

Z chemie víte, že kuchyňská sůl je chlorid sodný (NaCl). Ve vodě dochází k jeho *disociaci* (rozštěpení) na ionty chlóru (Cl) a sodíku (Na). Tím vznikne kapalný elektrolyt (obr. 104).



Obr. 103. Chemicky čistou vodou proud neprochází



Obr. 104. Disociace NaCl

Poznali jsme již, že ionty mají elektrický náboj. Kationtům chybí v elektronovém obalu jeden nebo více elektronů, takže jejich výsledný náboj je kladný. Aniont má naopak více elektronů než odpovídá neutrálnímu stavu atomů, je záporný.

V kapalině se ionty pohybují chaoticky, ale ve srovnání s pevnými látkami si ještě vzájemně vyměňují místa. Jakmile v elektrolytu vznikne elektrické pole, podléhají jednotlivé ionty jeho silovým účinkům. Kladně nabitě kationty sodíku se dají do usměrněného pohybu k záporně nabitě elektrodě, tedy ke katodě. Záporně nabitě anionty chlóru se začnou elektrolytem přesouvat k anodě (obr. 104).

Při dotyku kationtů sodíku a katody se z katody doplní sodíku chybějící elektrony. Tzv. neutralizací vzniknou z iontů sodíku elektricky neutrální atomy sodíku. Při neutralizaci se však z anody odčerpávají elektrony, které se kovovým vodičem doplní ze zdroje napětí.

Anionty chlóru odevzdávají při styku s anodou přebytné elektrony anodě. Z ní pak tyto elektrony odcházejí kovovým vodičem do zdroje. V elektrolytu se uzavírá elektrický obvod proto, že působením elektrického pole začnou elektrolytem procházet obousměrné ionty. *Proud elektrolytem tedy vedou ionty*, kdežto kovovým vodičem je vedou elektrony.

Poznámka: Uvnitř elektrolytu může při srážce kationtu sodíku a aniontu chlóru dojít k vytvoření molekuly NaCl, avšak srážka je málo pravděpodobná.

Mezi kapalně elektrolyty patří vodné roztoky solí, kyselin i zásad. Pramenitá a dešťová voda jsou poměrně dobrými vodiči, protože obsahují rozpuštěné minerály nebo látky z ovzduší.

Kovy a vodík vytvářejí kationty, proto se při průchodu proudem vylučují *na katodě*. *Plyny* s výjimkou vodíku se vylučují *na anodě*.

Měřením se přesvědčíme, že pro malé proudy platí i v elektrolytech *Ohmův zákon*

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

kde I je proud obvodem,

U napětí mezi elektrodami,

R odpor elektrolytu.

Tento jev vysvětluje disociaci molekul při průchodu proudem. Jednotlivé ionty totiž narážejí na dosud nerozštěpené molekuly a štěpí je. Počet disociovaných molekul závisí na napětí, které ovlivňuje rychlost iontů v elektrolytu. Proud elektrolytem je přímo úměrný napětí mezi elektrodami.

Avšak při velkých napětích dojde k disociaci všech molekul. Další zvyšování napětí nemůže proto ovlivnit proud elektrolytem a závislost proudů na napětí přestává být lineární.

Poznámka: Odpor elektrolytů se měří střídavým napětím. Při průchodu stejnosměrného napětí dochází ke změnám, které ovlivňují napětí v elektrolytu.

● 5.2. FARADAYOVY ZÁKONY

Pokus: Měděnou anodu a uhlíkovou katodu zvážíme a ponoříme do vodného roztoku síranu měďnatého (CuSO_4). Obvodem necháme delší dobu procházet proud několika ampérů. Potom elektrody vysušíme horkým vzduchem a znovu je na přesných vahách zvážíme.

Vážením zjistíme, že hmotnost uhlíkové katody se zvětšila, zatímco hmotnost měděné anody je menší. Při pozorování vidíme měděnou vrstvičku na uhlíkové elektrodě.

Koncem 19. století se podobnými pokusy zabýval M. Faraday [feredy]. Výsledky jeho pozorování shrnujeme do *I. Faradayova zákona*: *Hmotnost m látky vyloučené na elektrodě je úměrná součinu stálého proudu I a doby Δt , po kterou proud procházel, tedy*

$$| \quad m = AI \Delta t$$

kde A je *elektrochemický ekvivalent*.

Jednotkou elektrochemického ekvivalentu je *kilogram na coulomb* ($\text{kg} \cdot \text{C}^{-1}$). Číselná hodnota elektrochemického ekvivalentu se rovná číselné hodnotě hmotnosti látky, která se vyloučí na elektrodě při přenesení náboje 1 C. Pro olovo je elektrochemický ekvivalent $1,074 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{C}^{-1}$ a pro dvojmocnou měď $0,329 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{C}^{-1}$. Při přenesení náboje 1 C se tedy na katodě vyloučí něco málo přes 1 mg olova, kdežto mědi jen asi 0,3 mg. Údaje pro ostatní látky najdete ve fyzikálně chemických tabulkách.

▽ Elektrický proud, hmotnost i čas dovedeme měřit, takže elektrochemický ekvivalent lze určit ze vztahu

$$A = \frac{m}{It}$$

Upravený vztah

$$I = \frac{m}{At}$$

umožňuje zjistit s velkou přesností hodnotu stálého proudu procházejícího elektrolytem.

V chemii jsme se seznámili s molekulovými hmotnostmi M_m různých látek a s oxidačními čísly v i s jednotkou mol. Faraday zjistil, že pro elektrochemický ekvivalent platí další závislost, tzv. *II. Faradayův zákon*

$$A = \frac{1}{F} \frac{M_m}{v}$$

Faradayova konstanta

$$| \quad F = 9,650 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Příklad 44: Vypočítejte hmotnost dvojmocné mědi, která se vyloučí z roztoku CuSO_4 za 10 hodin při průchodu stálého proudu 15 A ($M_m = 63,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$).

$$v = 2, I = 15 \text{ A}, t = 10 \text{ h} = 36 \cdot 10^3 \text{ s}, M_m = 63,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$A = \frac{1}{F} \frac{M_m}{v}$$

$$m = AIt = \frac{1}{F} \frac{M_m}{v} It = \frac{1}{9,65 \cdot 10^4} \cdot \frac{63,5 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 15 \cdot 36 \cdot 10^3 \text{ kg} \doteq 0,18 \text{ kg}$$

Z elektrolytu se vyloučí přibližně 0,18 kg mědi.

Dá se vypočítat, že počet elektronů v jednom molu látky je $6,023 \cdot 10^{23}$. S využitím tohoto údaje určíme z Faradayovy konstanty *elementární náboj*, tj. náboj, který připadá na jeden elektron

$$e = \frac{9,650 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}}{6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$



△ Tím se potvrzuje údaj, který jsme uvedli v čl. 2.4.

5.3. ELEKTROLÝZA A JEJÍ VYUŽITÍ

Elektrolýza je rozkládání chemických látek elektrickým proudem. Elektrolyticky se získává z vody kyslík a vodík, elektrolýzou se vyrábějí nebo rafinují (tj. čistí) některé kovy. Postup, kterým se získává chemicky značně čistá, tzv. *elektrolytická měď*, jste poznali při pokusu. Elektrolytická měď má menší rezistivitu než měď znečištěná jinými prvky. Podobně se může získat chemicky velmi čisté železo. Elektrolyticky se vyrábí hliník.

Elektrolytické pokovování neboli *galvanostegie* se používá k ochraně některých kovů před oxidací a ke zlepšení vzhledu výrobků, popř. k vytvoření vodivých vrstev na nevodivých látkách. Do vhodného elektrolytu se ponoří předmět, který má být pokoven, a spojí se se záporným pólem zdroje stejnosměrného napětí. Anoda z vhodného kovu se spojí s kladným pólem zdroje.

Kationty kovu přecházejí při elektrolytickém pokovování z roztoku na předmět, který má být pokoven, a ulpívají na něm tak, že je nelze setřít. Nevodivé předměty se musí před pokovováním pokrýt vodivým práškem.

Proud i napětí se musí řídit, např. pro niklování má být napětí mezi elektrodami asi 3 V až 5 V a hustota proudu má být přibližně $60 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. Při větší hustotě proudu nebo při chybně připraveném povrchu (např. mastném) niklová vrstva nedrží. Kvalitu pokovování ovlivňuje také správná teplota elektrolytu.

Galvanoplastika je elektrolytické pokovování, které se používá ke zhotovení velmi přesných otisků, např. při výrobě gramofonových desek. Voskový otisk se nejprve potáhne tenkou vrstvou grafitu a pak se jako katoda zavěsí do elektrolytu. Vrstva kovu, která se usadí na voskovém otisku, vytvoří postupně formu.

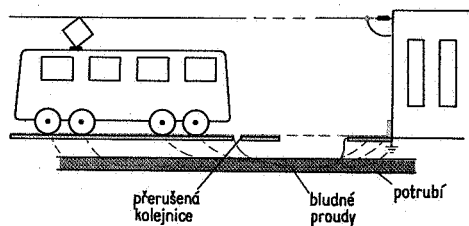
ELOX je zkratka pro *elektrolytické oxidování hliníku*. Hliníkový předmět se při eloxování upevní jako anoda a oxidace probíhá tím, že se na něm vytvoří vrstva Al_2O_3 . Eloxované povrchy jsou tvrdé. Lze je barvit a vytvářejí izolační vrstvu.

Elektrolytická koroze vzniká tím, že na povrchu některých kovů ulpívají nečistoty a (popř. spolu s cizími prvky přimísenými do kovu) vytvářejí ve vlhkém prostředí velký počet nepatrných galvanických článků. Elektrolyzou se pak kov mění na látky, které mají podstatně menší soudržnost. Příkladem je elektrolytická koroze železa a oceli, která se projevuje rezavěním. Hlavní součástí rzi je hydroxid železitý $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Nežádoucí jsou elektrolytické pochody, které vznikají při spojení dvou vodičů z různých kovů, např. mědi a hliníku. Ve vlhkém prostředí se z nich vytvoří galvanický článek. Časem se zvětšuje přechodový odpor spoje, a tím vznikají poruchy, popř. při větších proudech se může vlivem vysoké teploty vznítit hořlavá část instalace. Proto se takové spoje musí upravit *svařováním, pájením* nebo tzv. *cupalovými svorkami* (cupal je hliníkový drát oplášťovaný mědí).

Na kovových potrubích (např. plynovodech, vodovodech a ropovodech) uložených v zemi mohou působit značné škody elektrochemické jevy zavi-

něné *bludnými proudy*. Bludné proudy vznikají především při provozu elektrických kolejových vozidel, pro něž je jedním vodičem kolejnice spojená se zemí (obr. 105) a vlhká zemina je elektrolytem. Potrubí se nejvíce naleptává v blízkosti zdroje napětí. Proud 1 A, který trvale působí při elektrolýze bludnými proudy, zničí asi 10 kg železa, 11 kg mědi a dokonce 37 kg olova za rok. Bludné proudy dokáží během krátké doby proděravět i nová potrubí.



Obr. 105. Bludné proudy

5.4. CHEMICKÉ ZDROJE NAPĚTÍ

Mezi chemické zdroje napětí patří *galvanické články* (čl. 3.2.1), *palivové články* (čl. 3.2.3) a *akumulátory*.

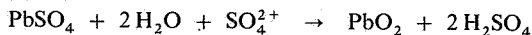
5.4.1. Olověné akumulátory

Průmyslově vyráběné *olověné akumulátory* jsou složitější než ty, které jsme sestavili při pokusech. Jejich elektrody jsou ze slitiny antimonu a olova a mají tvar mříží. Do mříže kladné elektrody se natlačí minium (Pb_3O_4) a do mříží záporné elektrody oxid olovnatý (PbO). Elektrody jsou v nevodivé nádobě, poměrně blízko od sebe. Mezi elektrodami je děrovaná izolační vložka, která brání vzájemnému dotyku elektrod při otřesech.

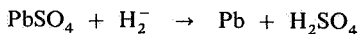
▼ V olověném akumulátoru probíhá tato chemická reakce:

Nabíjení

kladná elektroda

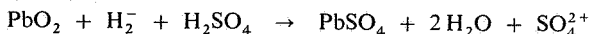


záporná elektroda

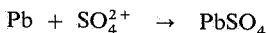


Vybíjení

kladná elektroda



záporná elektroda



Z uvedených chemických rovnic je patrné, že při nabíjení se zvětšuje hustota elektrolytu, protože ve vodném roztoku přibývá kyselina sírová. Při vybíjení se uvolňuje voda, a proto se hustota elektrolytu zmenšuje. Stupeň nabití akumulátoru určíme upraveným hustoměrem.

Úplným vybitím se olovený akumulátor poškodí. Proběhne *sulfatizace desek*, tj. desky akumulátoru se pokryjí nerozpustným povlakem, který znemožní nabití akumulátoru. Vybitý akumulátor může zamrznout již při teplotě kolem -10°C , kdežto nabitý až při teplotách kolem -70°C .

Životnost akumulátoru velmi závisí na správném prvním nabití, při němž probíhá tzv. *formování desek*. Musíme proto bezpodmínečně dodržet postup určený výrobcem. Při dalších nabíjeních se akumulátor zprvu obvykle nabíjí větším proudem a ke konci nabíjení se nabíjecí proud *snižuje* asi na polovinu. Pokud návod chybí, nabíjíme akumulátor asi desetinou číselné hodnoty celkového náboje, tzv. kapacity akumulátoru. Většinou se kapacita akumulátorů udává v jednotce ampér hodina (A · h). Při kapacitě 60 A · h můžeme odebírat proud 2 A po dobu 30 hodin nebo 6 A po dobu 10 hodin. Vyplyvá to ze vztahu pro náboj

$$Q = It$$

Největší vybíjecí proud má být rovněž přibližně desetina číselné hodnoty kapacity akumulátoru. Akumulátory s dolévacími otvory mají mít během nabíjení vyšroubované zátky, aby z nich mohl unikat plyný vodík.

Konstruuji se však i speciální akumulátory, např. *startovací baterie* z olovených akumulátorů určených pro velký odběr proudu při startování automobilů.

Poznámka: V běžném vyjadřování se často nerozlišuje baterie akumulátorů, tj. sestava několika akumulátorů, od akumulátoru, tedy jediné dvojice elektrod. K omylu někdy dochází proto, že baterie akumulátorů bývá ve společné nádobě, která je uvnitř rozdělena.

Po plném nabití má olovený akumulátor napětí asi 2,7 V, jeho *jmenovité napětí* je však kolem 2 V. Akumulátor se musí znovu nabíjet, jakmile jeho

napětí klesne na 1,8 V. Účinnost olověných akumulátorů je mezi 0,7 až 0,95, tedy značná. Plně nabitý akumulátor se však samovolně vybíjí a po dvou měsících se musí znova dobíjet, i když se z něj neodebírá proud.

Elektrolyt v akumulátoru má přesně stanovenou hustotu. Z většiny olověných akumulátorů se při jejich provozu odpařuje voda a je nezbytné *dolévat* do nich *destilovanou vodu*. Akumulátorovou kyselinu doplňujeme pouze tehdy, když z akumulátoru vytekla. Přitom musíme použít ochrannou zástěru, rukavice a obličejový štít.

Během plnění akumulátoru kyselinou se nesmí jíst, pít ani kouřit. V místech, kde se nabíjejí olověné akumulátory, vzniká směs vodíku a vzduchu, tj. prudce výbušná třaskavá směs plynů. Otevřený oheň by mohl způsobit výbuch. Pokud se akumulátory nabíjejí v místnosti, musí být dobře větraná.

5.4.2. Oceloniklové akumulátory

Kromě olověných akumulátorů se nejvíce používají *oceloniklové akumulátory*. Chemické značky dvou kovů, železa (Fe) a niklu (Ni), ze kterých se vyrábějí, jsou základem zkráceného názvu – akumulátor NiFe.

V oceloniklových akumulátorech je elektrolytem hydroxid draselný (KOH), tedy zásada.

Upozornění: Do akumulátoru NiFe nesmíte nikdy nalít kyselinu. Došlo by nejen k jeho zničení, ale vznikla by bouřlivá chemická reakce, nebezpečná pro okolí.

Při nabíjení oceloniklových akumulátorů nevzniká třaskavý plyn, a nehrozí tedy ani výbuch. Proto se tyto akumulátory umísťují tam, kde olověné akumulátory jsou nebezpečné (vzhledem k tomu, že se v nich uvolňuje vodík).

Akumulátory NiFe lze vybijet značným proudem, avšak s ohledem na jejich životnost a na účinnost se doporučuje vybijet je nejvýše čtvrtinou proudu číselně rovného jmenovité kapacitě akumulátoru. Po nabití má akumulátor NiFe napětí asi 1,4 V, jeho *jmenovité napětí* je 1,1 V.

Oceloniklové akumulátory mají větší vnitřní odpor než olověné akumulátory. Jsou provozně odolnější, zkraty je nepoškozují tolik jako olověné akumulátory. Jsou však dražší a také hmotnost, která připadá na 1 A.h, je u nich větší než u olověných.

5.4.3. Niklokadmiové a další akumulátory

Niklokadmiové akumulátory (NiCd) mají niklové a kadmiové elektrody. Jejich jmenovité napětí je 1,3 V. Vyrábějí se i v rozměrech monočlánků a tužkových monočlánků nebo jsou knoflíkové. Používají se také v kapesních akumulátorových svítilnách, kapesních kalkulačkách a v dalších přenosných elektrických přístrojích.

V současné době se hledají vhodnější látky pro výrobu akumulátorů. Především se usiluje o zmenšení jejich hmotnosti. Podařilo se to např. u zinkostříbrných akumulátorů (AgZn), avšak jejich cena je příliš vysoká.

- ▽ Nadějnější jsou vysokoteplotní akumulátory sodíkosírové, které pracují při provozní teplotě mezi 400 °C a 500 °C. Udržet tuto teplotu je však obtížné. Zkoušejí se zinkoniklové akumulátory a železokyslíkové akumulátory. Všechny mají sice menší hmotnost na 1 A · h, ale dosud se nepodařilo rozšířit jejich výrobu jak pro technologické potíže, tak pro ohrožení okolí
- △ při jejich provozu.

Podstatné zmenšení hmotnosti akumulátorů by umožnilo využít elektrickou práci pro pohon motorových vozidel nezávisle na trolejovém vedení. Elektromobily (tj. elektrické automobily) jsou technicky zvládnuty téměř sto let, ale právě dosud používané akumulátory neumožnily jejich rozšíření. Hmotnost akumulátorů totiž většinou přesahuje užitečné zatížení vozidla, které mají pohánět. Problémem je i dlouhá doba dobíjení akumulátorů (až 10 hodin).

5.5. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Vysvětlíte, jak prochází proud elektrolytem.
2. Proč neprochází proud destilovanou vodou, zatímco pramenitá voda proud vede?
3. Které prvky se vylučují na anodě? Které na katodě?
4. Proč při vedení proudu elektrolytem platí Ohmův zákon pouze pro menší proudy?
5. Jakou hmotnost má dvojmocná měď, která se vyloučí z roztoku modré skalice při proudu 50 A za 24 h?
6. Z roztoku síranu nikelnatého se má vyloučit za 1 hodinu 20 g niklu. Jaký proud musí roztokem procházet?
- ▼ 7. Jak dlouho se musí elektrolyticky stříbrnit předmět s povrchem 500 cm², aby se při proudu 2,6 A rovnoměrně postříbil vrstvou tlustou 200 μm?
- ▲ ($A = 1,118 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{C}^{-1}$)

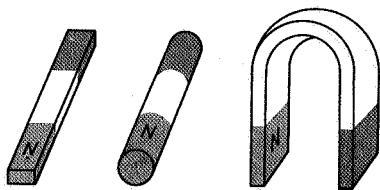
8. Proč a jak se rafinují kovy?
9. Vysvětlete, co je galvanostegie a co galvanoplastika.
10. Co znamená ELOX? Proč se eloxují povrchy?
11. Popište konstrukci olověného akumulátoru.
12. Vysvětlete podrobně postup při nabíjení olověného akumulátoru. Proč se nesmí kouřit v blízkosti akumulátorů, které se nabíjejí?
13. Z jakého důvodu se nesmí nikdy nalít do oceloniklového akumulátoru kyselina?
14. Jaké je jmenovité napětí a) oceloniklového akumulátoru, b) olověného akumulátoru?
15. Jaký nejvyšší nabíjecí proud zvolíte pro olověný akumulátor, o němž znáte jediný údaj: $60 \text{ A} \cdot \text{h}$.
16. Jakým proudem budete vybíjet akumulátor NiFe, který má kapacitu $20 \text{ A} \cdot \text{h}$?
- ▼ 17. Osobní automobil s hmotností 1000 kg spotřebuje na 1 km jízdy práci $100 \text{ W} \cdot \text{h}$. Vypočítejte hmotnost olověných akumulátorů, které by mu umožnily dojezd 400 km , když $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ dodá akumulátor s hmotností 35 kg . Přesáhne tato hmotnost užitečné zatížení vozu, které je asi 400 kg ?
- ▲ 18. Zdůvodněte, proč se nerozšířilo využití elektromobilů.
19. Jak dlouho se udrží v provozu vysílač napájený z plně nabitě baterie akumulátorů s kapacitou $120 \text{ A} \cdot \text{h}$, je-li jeho příkon 90 W ?

6. Magnety a magnetické pole

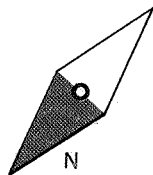
6.1. TRVALÉ MAGNETY A MAGNETICKÉ VLASTNOSTI LÁTEK

6.1.1. Trvalé magnety

Magnety jsou tělesa, která ve svém okolí vytvářejí *magnetické pole*. Trvalé neboli *permanentní magnety* jsou nejčastěji *tyčové*, *válcové* nebo *podkovovité* (obr. 106). Zvláštním druhem magnetu je *magnetka* (obr. 107), která se používá v kompasu. Podle dohody označujeme *póly* magnetů jako *severní* (N z angl. north nebo S – sever) a *jižní* (S z angl. south nebo J – jih). Magnety se *souhlasnými póly odpuzují*, *nesouhlasnými se přitahují*.



Obr. 106. Magnety



Obr. 107. Magnetka

Kromě trvalých magnetů se setkáme s dočasnými magnety, jejichž účinky trvají, dokud jsou tyto magnety v magnetickém poli nebo krátce po zaniknutí tohoto pole.

- ▽ Naše Země je obrovský magnet. Její jižní magnetický pól leží v blízkosti severního zeměpisného pólu a severní magnetický pól leží poblíž jižního zeměpisného pólu. Severní pól magnetky se totiž přitahuje k nesouhlasnému magnetickému pólu Země.

Geomagnetické pole, tj. magnetické pole Země, se měří, protože jeho nepravidelnosti mohou být znakem ložisek některých rud. *Geomagnetické bouře* vznikají jako důsledek poruch magnetického pole v okolí Země. Nepříznivě ovlivňují především šíření rozhlasového vysílání a mohou až na několik hodin přerušit rozhlasové spojení.

Poznámka: Magnetické pole Země je určitou zvláštností. Mnoho nebeských těles (např. Měsíc) magnetické pole nemá.

Pokus: Přiblížíme magnetku k horní a pak k dolní části feromagnetického předmětu, který stojí delší dobu na stejném místě, např. k radiátoru ústředního vytápění. Pozorujeme výchylku magnetky.

Z toho, že se magnetka vychyluje na opačnou stranu v dolní části předmětu než v horní, usuzujeme, že předmět je magnet. Skutečně feromagnetické předměty se při delším setrvání v neměnné poloze v geomagnetickém poli zmagnetují. Mohou tak nepříznivě ovlivňovat některá měření v jejich blízkosti, především přesná měření elektrických veličin.

△

6.1.2. Magnetické vlastnosti látek

Podle toho, jak magnetické pole působí na látky, dělíme látky do tří skupin:

- a) *diamagnetické*, které jsou z magnetického pole slabě vypuzovány,
- b) *paramagnetické*, u nichž se projevuje slabé vtahování do magnetického pole,
- c) *feromagnetické*, jež jsou do magnetického pole silně vtahovány. Působením magnetického pole na feromagnetické látky tzv. *magnetováním* vznikají z feromagnetických látek *magnety*.

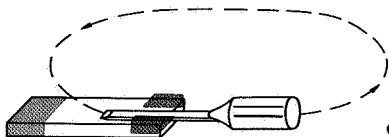
Paramagnetické a diamagnetické látky můžeme považovat za nemagnetické látky.

Z prvků patří mezi feromagnetické látky pouze čtyři: železo (Fe), kobalt (Co), nikl (Ni) a gadolinium (Gd). Název feromagnetický je odvozen od latinského názvu železa – ferrum.

K feromagnetickým látkám patří však řada slitin a různé druhy ocelí. V přírodě se setkáváme s rudami, které mají magnetické účinky. Magnetovec ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) se používal již ve starověku k orientaci na mořích.

V současné době se nejčastěji jako trvalé magnety používají *magneticky tvrdé oceli* a *ferity*. Z ocelí jsou to např. chromová, wolframová a kobaltová magnetická ocel. Slitina železa, niklu a hliníku, tzv. ALNI, předstihuje svými vlastnostmi všechny magneticky tvrdé oceli.

Ferity jsou sloučeniny oxidů dvojmocných kovů a oxidu železitého, např.



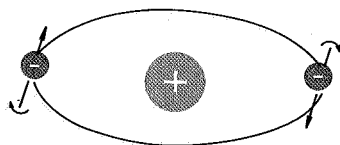
Obr. 108. Magnetování šroubováku

BaO . Fe₂O₃, které se získávají lisováním a vypalováním. Jsou to keramické látky s nepatrnou elektrickou vodivostí.

Poznámka: Název ferit, používaný pro železo α , nemá nic společného s ferity, o kterých hovoříme. Aby nedocházelo k omylům, nazývají se někdy námi uvažované ferity feromagnetická keramika.

Dočasné magnety jsou z magneticky měkkých ocelí, např. z oceli s co nejmenším podílem uhlíku, vyžíhané naměkko.

Pokus: Kus magneticky tvrdé oceli (např. šroubovák) obtahujeme jedním směrem po magnetu (obr. 108). Potom jej vložíme mezi hřebíčky. Zjistíme, že ocel šroubováku se stala magnetem, tj. že proběhla magnetizace kovu.

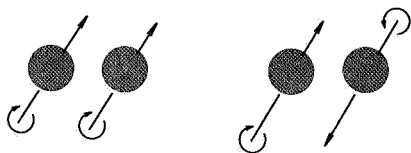


Obr. 109. Model spinu elektronu

- ▽ *Pokus:* Zmagnetujeme ocelový drátek z magneticky tvrdé oceli, např. pilový list do lupenkové pilky. O tom, že je zmagnetován, se přesvědčíme tím, že oba jeho konce vsuneme do železných pilin. Potom drátek zlomíme.

Z toho, že se piliny přitahují k oběma koncům každé zlomené části, usuzujeme, že vznikly dva samostatné magnety. Při dalším dělení vznikne vždy magnet s oběma póly. Žádným dělením se nám nepodaří získat magnet, který by měl jen jeden pól. Magnetismus je tedy vlastnost velmi malých částic látky, tzv. *elementárních magnetů*.

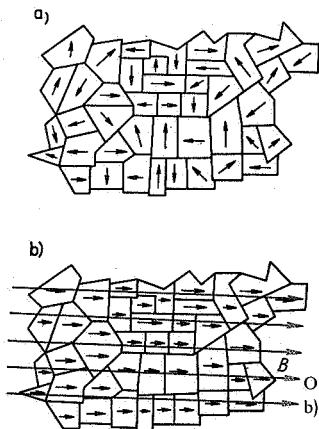
Jak jsme již uvedli, předpokládá se, že elektrony obíhají kolem jádra atomu po uzavřených drahách. Elektronům však připisujeme ještě jednu vlastnost, a to otáčení kolem vlastní osy, tzv. *spin* elektronu (obr. 109). Spin elektronů může být souhlasný nebo opačný (obr. 110).



Obr. 110. Souhlasný a opačný spin elektronu

Spin elektronů pokládáme za příčinu magnetických účinků látky, a tedy i za příčinu vzniku magnetického pole. V diamagnetických a paramagnetických látkách se účinky magnetických polí, vyvolané elektrony, vyrovnávají v atomu a mimo těleso nepůsobí.

Ve feromagnetických látkách má každá krystalová mřížka magneticky uspořádané oblasti s hranou asi do 0,1 mm přibližně 10^{15} atomů. Tyto oblasti se nazývají *domény*. Dokud feromagnetická látka není ve vnějším magnetickém poli, jsou její *domény neuspořádané* (obr. 111a) a látka nevytváří ve svém okolí magnetické pole. Jakmile však feromagnetickou látku vložíme do vnějšího magnetického pole, domény se v ní *uspořádají* (obr. 111b) a z feromagnetického tělesa se stane *magnet*.



Obr. 111. a) Model neuspořádaných domén:
b) model uspořádaných domén

O tom, že v látce jsou malé magnetické oblasti, které jsme nazvali domény, jsme se přesvědčili pokusem s dělením magnetů. Elementární magnet tedy ve feromagnetické látce tvoří doména.

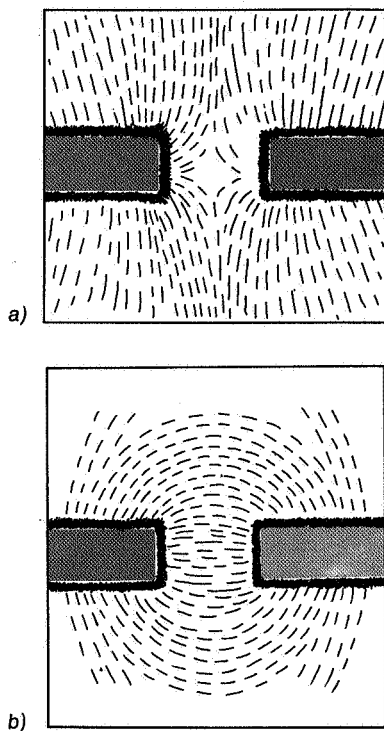
Pokus: Zmagnetovaný pilový list zahřejeme do červeného žáru. Potom jej přiblížíme k drobným hřebíčkům a zjišťujeme, zda trvají jeho magnetické vlastnosti.

Při pokusu se ukázalo, že magnetické účinky magneticky tvrdé látky zahřátím zanikají. Proběhla tzv. *demagnetizace* (odmagnetování) kovu. Za příčinu demagnetizace považujeme tepelný pohyb částic v látce. Při určité teplotě, tzv. *Curieově* [kyriově] *teplotě*, převládne tepelný pohyb

a domény se již neudrží v orientované poloze, do níž se dostaly magnetizací. Po snížení teploty zůstanou domény různě orientované a látka přestává být magnetem.

Nejvyšším teplotám odolává kobalt, který se demagnetizuje až při teplotě 1127 °C. Curieova teplota železa je 770 °C. Speciálně upravené slitiny mají Curieovu teplotu, např. MnAs 45 °C.

Demagnetizace probíhá nejen teplotními změnami, ale také prudkými otřesy magnetů a rychlými změnami magnetického pole v jejich okolí.



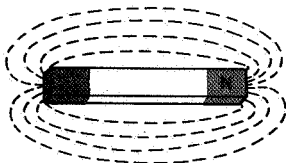
Obr. 112. Znázornění magnetického pole (pilinové obrazce)

6.2. MAGNETICKÉ POLE MAGNETU

Pokus: Pod skleněnou deskou položíme magnet a na desku opatrně sypeme železné piliny. Vzniknou tzv. *pilinové obrazce*.

Několik pilinových obrazců je na obr. 112. Z těchto obrazců vzniklo znázorňování magnetického pole *indukčními čarami*.

Indukční čáry jsou čáry znázorňující rozložení magnetického pole v prostoru. Na rozdíl od siločar, kterými jsme znázorňovali elektrické pole, jsou indukční čáry *vždy uzavřené*, tj. procházejí i magnetem. Dohodnutá *orientace* indukčních čar mimo magnet je *od severního pólu k jižnímu* (obr. 113).

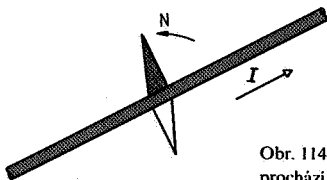


Obr. 113. Indukční čáry

Poznámka: Indukční čáry nesmíme zaměňovat za čáry pilinových obrazců.

Často budeme mluvit o *homogenním* (stejnorodém) *magnetickém poli*. Znázorňujeme je stejně vzdálenými rovnoběžnými indukčními čarami. Počet indukčních čar volíme; nehomogenní pole kreslíme tak, že ve stejném obrázku je více indukčních čar v místě, kde jsou magnetické účinky pole větší.

Pokus: Pod skleněnou deskou vložíme ocelový plech a teprve pod něj umístíme magnet. Na sklo sypeme železné piliny.



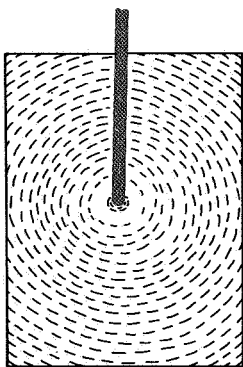
Obr. 114. Magnetka u vodiče, kterým prochází proud

Při tomto pokusu pilinové obrazce nevzniknou, protože plech zamezí šíření magnetického pole. Říkáme, že jsme magnetické pole *odstínili*. Můžeme tedy vytvořit prostor, do kterého magnetické pole neproniká. K odstínění magnetického pole používáme kovové kryty nebo povlaky.

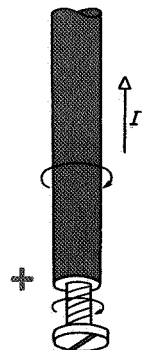
6.3. MAGNETICKÉ POLE PŘÍMÉHO VODIČE

Pokus: Příným vodičem necháme procházet proud. K vodiči postavíme magnetku a sledujeme ji při zapnutí, vypnutí a při obrácení směru proudu ve vodiči.

Zjistíme, že se magnetka při průchodu proudu vodičem vychyluje (obr. 114), jako by ve vodiči byl magnet. Z toho usuzujeme, že *při průchodu proudu vodičem vzniká kolem vodiče magnetické pole*. O jeho průběhu nás informují pilinové obrazce (obr. 115). Vidíme z nich, že indukční čáry jsou kružnice se středem ve vodiči.



Obr. 115. Pilinové obrazce kolem přímého vodiče



Obr. 116. Směr indukčních čar

Při určování směru indukčních čar používáme *pravidlo pravotočivého šroubu*. Směr indukčních čar je stejný jako směr otáčení pravotočivého šroubu, který zašroubováváme *po směru*, kterým prochází proud (obr. 116).

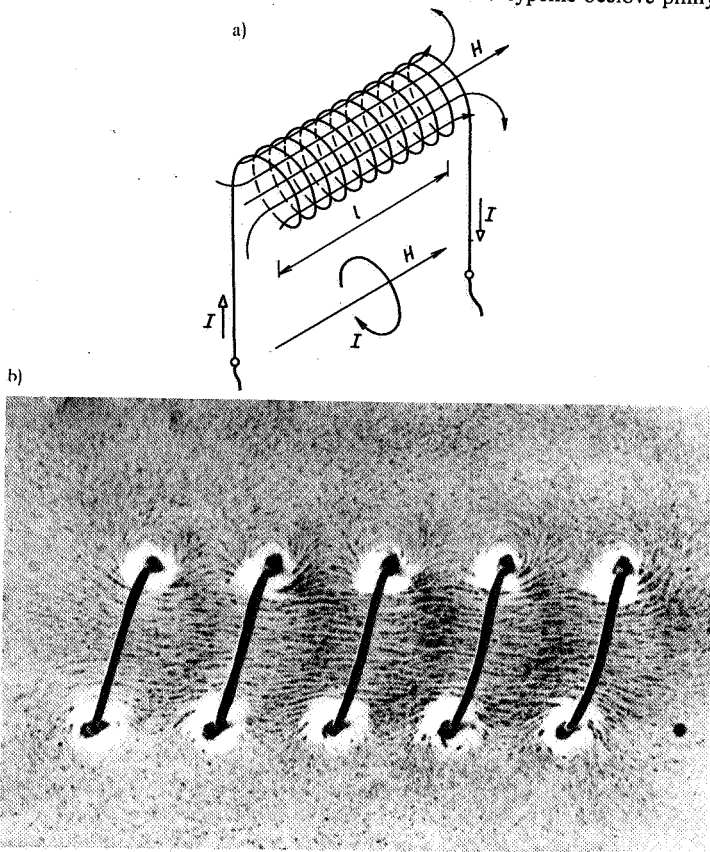
Objev magnetického pole v okolí vodiče, kterým prochází proud, je základním objevem pro vývoj elektrických strojů, např. elektromotorů.

6.4. MAGNETICKÉ POLE VÁLCOVÉ CÍVKY

6.4.1. Válcová cívka

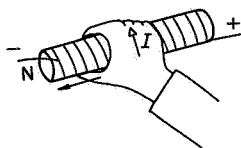
Pro pokusy používáme válcovou cívku, tzv. *solenoid* (obr. 117a), která má jednu řadu závitů se stejným průměrem, navzájem stejně vzdálených.

Pokus: Solenoid připojíme ke zdroji stejnosměrného napětí a necháme jím procházet proud. Na desku vloženou do solenoidu sypeme ocelové piliny.



Obr. 117. a) Solenoid; b) pilinové obrazce kolem solenoidu

Zjistíme, že uvnitř solenoidu jsou pilinové obrazce rovnoběžné (obr. 117b), a tedy magnetické pole je homogenní. Magnetkou určíme severní pól cívky a potvrdíme *Ampérovo pravidlo pravé ruky* pro cívku: Uchopíme cívku do pravé ruky tak, aby *prsty směřovaly po proudu*. Odkloněný *palec* ukáže *severní pól cívky* (obr. 118).



Obr. 118. Určení severního pólu cívky

Většinou se setkáte s válcovými cívkami navinutými ve větším počtu vrstev. Počet závitů cívky označujeme N . Vzhledem k tomu, že délka vodiče v různých vrstvách je různá, udává se průměrná, tzv. *střední délka závitů* a *střední průměr závitů*.

Válcové cívky jsou základní části *elektromagnetů*, tj. součástek, které využívají silové účinky magnetického pole. Podrobně se s nimi seznámíte později. Jsou základní částí řady elektrických strojů a přístrojů.

6.4.2. Intenzita magnetického pole

Dosud jsme se zabývali pouze slovním popisem účinků magnetického pole. V elektrotechnice však musíme využívat i matematické vztahy, které nám umožní lépe popsat jevy v magnetickém poli. Pro zjednodušení však budeme uvažovat pouze homogenní magnetické pole, pro které jsou vztahy jednodušší.

Jednou ze základních veličin, kterými určujeme magnetické pole, je *intenzita magnetického pole* H . Je to vektorová veličina; má tedy nejen velikost, ale také směr.

Uvnitř solenoidu, kterým prochází proud I , je intenzita magnetického pole

$$H = \frac{IN}{l}$$

kde N je počet závitů,

l délka solenoidu.

Tento vztah použijeme i pro cívku.

Příklad 45: Určete intenzitu magnetického pole uvnitř válcové cívky se 60 závitů, dlouhé 6 cm, prochází-li jí proud 0,2 A.

$I = 0,2 \text{ A}$, $N = 60$, $l = 6 \text{ cm} = 0,06 \text{ m}$

$$H = \frac{IN}{l} = \frac{0,2 \text{ A} \cdot 60}{0,06 \text{ m}} = 200 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Intenzita magnetického pole v cívkce je $200 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.

Z výpočtu je zřejmé, že jednotkou intenzity magnetického pole je *ampér na metr* ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$). Jeden ampér na metr je intenzita magnetického pole uvnitř velmi dlouhého solenoidu, u něhož součin proudu a délkové hustoty závitů je jeden ampér na metr.

Délková hustota závitů se počítá ze vztahu N/l , kde N je počet závitů a l délka solenoidu. Číselná hodnota délkové hustoty závitů se tedy rovná počtu závitů na jednom metru délky cívky.

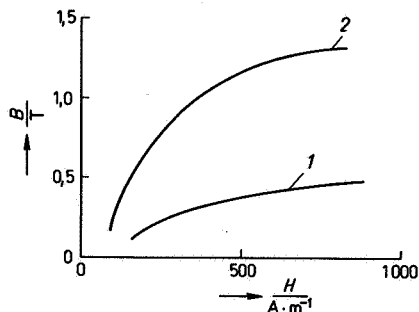
6.4.3. Magnetická indukce

Další důležitou veličinou, která umožní vyjádřit vztahy v magnetickém poli, je *magnetická indukce* B . Je to vektorová veličina. Určujeme ji měřením mechanických sil, které vznikají v magnetickém poli, např. při vtahování ocelového válečku do dutiny cívky nebo při vychylování vodiče v magnetickém poli (čl. 6.11). Jednotkou magnetické indukce je *tesla* (T).

Mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole platí vztah

$$B = \mu H$$

kde H je intenzita magnetického pole,
 μ permeabilita magnetického pole.



Obr. 119. Závislost elektromagnetické indukce na intenzitě magnetického pole: 1 – šedá litina, 2 – plech pro elektrotechniku

Poznali jsme již, že různé látky ovlivňují magnetické pole. Právě tento poznatek vyjadřuje *permeabilita*. Jednotkou permeability je *henry na metr* ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$). Pro stejnou látku je za stejných podmínek permeabilita stálá, proto je permeabilita látková konstanta. Podobně látkovou konstantou je permitivita, kterou jsme používali pro výklad šíření elektrického pole. Jak je patrné z grafu (obr. 119), závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole není přímková. Je to dáno tím, že *permeabilita látek se mění v závislosti na intenzitě magnetického pole*.

Permeabilita vakua (a přibližně i vzduchu) je

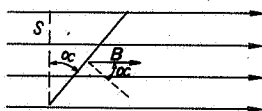
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

Častěji než permeabilitu používáme *relativní permeabilitu* μ_r . Udává, kolikrát menší nebo větší je permeabilita látky μ než permeabilita vakua.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že relativní permeabilita vakua je 1.

U diamagnetických látek je relativní permeabilita o málo menší než jedna, u paramagnetických o něco větší než jedna, ale většinou ji udáváme rovnou jedné. Relativní permeabilita feromagnetických látek je až mnohatisíkrát větší než u vakua.



Obr. 120. Plošný obsah kolmý k indukčním čarám

6.4.4. Magnetický indukční tok

V elektrotechnice se používá *součin magnetické indukce B a plošného obsahu S* , kterým magnetická indukce prochází kolmo (obr. 120). Nazývá se *magnetický indukční tok*

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Úhel α je úhel vektoru magnetické indukce a roviny, ve které leží sledovaná plocha. Při vektoru magnetické indukce kolmém k ploše je $\cos \varphi = 1$.

Vztah se zjednoduší na

$$\Phi = BS$$

Jednotkou magnetického indukčního toku je *weber* [vébr] (Wb).

Poznámka: Neuvedeme-li jinak, předpokládáme dále $\cos \alpha = 1$.

Příklad 46: Cívka se 400 závitů a průřezem 12 cm^2 má délku 40 mm. Určete magnetický indukční tok v cívce, prochází-li jí proud 6 A a je-li v ní a) vzduch, b) jádro z plechů pro elektrotechniku ($\mu_r = 500$).

$N = 400$, $l = 40 \text{ mm} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, $I = 6 \text{ A}$, $S = 12 \text{ cm}^2 = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$,
 $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$, $\mu_r = 500$

$$H = \frac{IN}{l} = \frac{6 \text{ A} \cdot 400}{4 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 6 \cdot 10^4 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$B = \mu_0 H = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 6 \cdot 10^4 \frac{\text{A}}{\text{m}} = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ T}$$

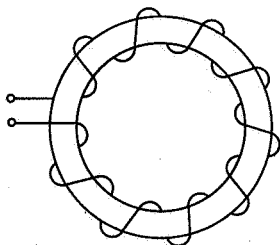
$$\Phi_0 = BS = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ T} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 9 \cdot 10^{-5} \text{ Wb} = 90 \mu\text{Wb}$$

$$\Phi = \mu_r \Phi_0 = 500 \cdot 90 \mu\text{Wb} = 45 \text{ mWb}$$

Intenzita magnetického pole v cívce je $6 \cdot 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, magnetický tok v cívce bez jádra je $90 \mu\text{Wb}$, v cívce s jádrem 45 mWb .

6.5. MAGNETICKÉ POLE PRSTENCOVÉ CÍVKY

Prstencová cívka vzniká natočením závitů do tvaru uvedeného na obr. 121. Takto jednoduše položené závity vytvoří *toroid*. Běžně se však prstencové cívky vinou z mnoha závitů položených vedle sebe.



Obr. 121. Toroid

Z pilinového obrazce v toroidu je patrné, že v jeho mezikruží vzniká homogenní magnetické pole. Jeho intenzita je

$$H = \frac{NI}{2\pi r}$$

kde N je počet závitů toroidu,

I proud procházející toroidem,

r střední poloměr toroidu.

Příklad 47: Určete intenzitu magnetického pole, magnetickou indukci a magnetický indukční tok v prstencové cívce se středním poloměrem 60 mm a s průřezem 400 mm², při proudu 6 A. Cívka má 200 závitů.

$N = 200$, $I = 6$ A, $r = 60$ mm = $60 \cdot 10^{-3}$ m, $S = 400$ mm² = $4 \cdot 10^{-4}$ m²

$$H = \frac{NI}{2\pi r} = \frac{200 \cdot 6}{2 \cdot 3,14 \cdot 60 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{A}}{\text{m}} = 3184 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$B = \mu_0 H = 1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 3184 \text{ T} \doteq 4 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$\Phi = BS = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} = 16 \cdot 10^{-7} \text{ Wb}$$

Intenzita magnetického pole prstencové cívky je asi $3,2 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, magnetická indukce je 4 mT a magnetický indukční tok uvnitř cívky je 1,6 μWb.

6.6. OTÁZKY A CVIČENÍ

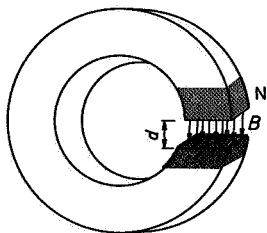
1. Jak se nazývají póly magnetů? Vysvětlete, od čeho je jejich název odvozen.
2. Ke kterému zeměpisnému pólu se přitahuje jižní pól magnetky? Jaký magnetický pól je v blízkosti jižního zeměpisného pólu? Odpověď zdůvodněte.
3. Jaký vliv má geomagnetické pole na feromagnetická tělesa, která dlouho nemění svou polohu?
4. Proč se proměřuje geomagnetické pole?
5. Jak se dělí látky podle svého vlivu na magnetické pole? Mezi jaké látky patří podle tohoto dělení ocel?
6. Uveďte příklad magneticky tvrdé látky a příklad magneticky měkké látky. Kde se používají?
7. Co jsou to ferity? Vysvětlete, proč se pro ně používá také název feromagnetická keramika.

8. Vyzkoušejte, zda feromagnetická keramika je elektrický vodič.
- ▽ 9. Co je podle současných představ příčinou vzniku magnetických polí ve feromagnetických látkách? Co tvoří elementární magnety?
- △ 10. Jakými pokusy dokážete existenci elementárních magnetů? Proč nelze oddělit jeden pól magnetu od druhého?
11. V nepřístupných místech se šroubky přidržují zmagnetovaným šroubovákem. Jak zmagnetujete svůj šroubovák?
12. Jaký vliv na magnet má překročení Curieovy teploty látky, ze které je magnet vyroben?
13. Kde vzniká a jak se projevuje magnetické pole? Lze ho odstinit? Uveďte fyzikální pole, které nelze odstinit.
14. Jmenujte způsoby demagnetizace magnetických látek.
15. Jak se znázorňuje průběh magnetického pole? Znázorněte homogenní magnetické pole.
16. Jak se projevuje průchod proudu vodičem v okolí vodiče?
17. Znázorněte vodič tužkou postavenou kolmo k desce stolu. Představte si, že proud prochází z desky nahoru. Ukažte směr indukčních čar kolem tohoto vodiče. Přesvědčte se pokusem, že vaše odpověď je správná.
18. Načrtněte indukční čáry, které znázorňují magnetické pole válcové cívky. Jaké pole vzniká uvnitř cívky?
19. Vypočítejte intenzitu magnetického pole ve vzduchu ve válcové cívce s 200 závitů, dlouhé 200 mm, prochází-li jí proud 2 A.
20. Kolik závitů musí mít válcová cívka dlouhá 100 mm, ve které se má ve vzduchu vytvářet při proudu 4 A magnetické pole s intenzitou $6000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$?
21. Jak se musí změnit délka cívky, aby se v ní intenzita magnetického pole zmenšila na polovinu?
22. Vypočítejte délkovou hustotu závitů v cívce, která je dlouhá 30 mm a má 150 závitů.
23. Vysvětlíte, co je to permeabilita látky a co je to relativní permeabilita. Jaký vztah platí pro výpočet permeability?
24. Jaká je permeabilita vakua? Které látky mají větší permeabilitu než vakuum?
25. Určete magnetickou indukci v jádře cívky s 200 závitů, která je dlouhá 400 mm. Jádro je z plechů pro elektrotechniku ($\mu_r = 400$). Cívkou prochází proud 25 A.

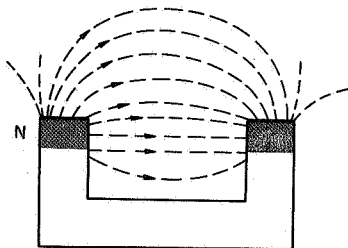
26. Jaký vliv má na intenzitu magnetického pole v cívice jádro z mědi ($\mu_r = 0,999$) a z měkké oceli ($\mu_r = 20\,000$)?
27. Určete magnetický indukční tok v homogenním magnetickém poli s magnetickou indukcí $0,5\text{ T}$ při kolmém plošném obsahu 200 cm^2 .
28. Jaké magnetické indukce musíme dosáhnout ve vzduchové mezeře s průřezem 30 cm^2 , aby ji procházel magnetický indukční tok 5 mWb ?
29. Obdélníková smyčka z drátu má obsah 250 cm^2 a je skloněna k indukčním čarám pod úhlem 45° . Jaký magnetický indukční tok ji prochází ve vzduchu, je-li magnetická indukce homogenního magnetického pole v příslušném místě $0,6\text{ T}$?
30. Naviňte z 15 závitů vodiče toroid s poloměrem 50 mm . Jaký jím musí procházet proud, aby v něm vznikla intenzita magnetického pole $20\text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$?
- ✓ 31. Prstencová cívka s poloměrem 10 mm má 1000 závitů. Prochází jí proud $0,2\text{ A}$. Jaký je v ní magnetický indukční tok, je-li střední průměr závitů 3 mm ? Cívka je navinuta na jádru z permaloye ($\mu_r = 80\,000$).
- △

6.7. MAGNETICKÉ OBVODY

Podobně jako elektrické obvody můžeme sestavit i *magnetické obvody* (obr. 122). Vzhledem k tomu, že magnetický indukční tok je vždy uzavřený, musí být každý magnetický obvod uzavřený. V technice však magnetické obvody dělíme na uzavřené a otevřené. *Uzavřený* je takový obvod, který je sestaven z feromagnetického materiálu, jenž není přerušen nebo v němž je jen malá mezera. Tato mezera je vyplněna buď vzduchem, nebo jinou látkou s relativní permeabilitou blízkou jedné.



Obr. 122. Magnetický obvod



Obr. 123. Otevřený magnetický obvod

V *otevřených* magnetických obvodech prochází velká část magnetického indukčního toku mimo feromagnetickou látku, převážně vzduchem (obr. 123). Tím se magnetický indukční tok v obvodu rozptýluje a značně zeslabuje. Budeme se zabývat uzavřenými magnetickými obvody s homogenním magnetickým polem. Pro otevřené obvody dále uvedené vztahy neplatí.

Při vývoji poznatků o magnetickém poli se vycházelo z představy, že elektrické a magnetické veličiny jsou si podobné. Dnes již víme, že tomu tak není. Přesto se u veličin, které používáme v magnetismu, zachovala určitá vnější podoba. Uspadňuje zapamatování magnetických veličin, např. magnetické indukce jako obdoby elektrické indukce a intenzity magnetického pole jako obdoby intenzity elektrického pole. Podobně je tomu u magnetického obvodu a elektrického obvodu, ačkoli jde o jiné jevy (tab. 7).

Tabulka 7. Formálně obdobné veličiny

Elektrické	Značka	Jednotka	Magnetické	Značka	Jednotka
elektrické napětí	U	V	magnetické napětí	U_m	A
elektrický proud	I	A	magnetický indukční tok	Φ	Wb
elektrický odpor	R	Ω	magnetický odpor	R_m	H^{-1}
elektrická vodivost	G	S	magnetická vodivost	G_m	H
intenzita elektrického pole	E	$V \cdot m^{-1}$	intenzita magnetického pole	H	$A \cdot m^{-1}$
elektrická indukce	D	$C \cdot m^{-2}$	magnetická indukce	B	T
permitivita	ϵ	$F \cdot m^{-1}$	permeabilita	μ	$H \cdot m^{-1}$
kapacita	C	F	vlastní indukčnost	L	H

V jednom místě uzavřeného magnetického obvodu vzniká v závitě nebo v cívice magnetický indukční tok (obr. 124). Magnetický obvod však tok zeslabuje. Můžeme tedy říci, že magnetický obvod klade magnetickému indukčnímu toku odpor, tzv. *magnetický odpor* neboli *reluktanci* R_m . Jednotkou magnetického odporu je *jedna na henry* (H^{-1}). Tuto jednotku nazýváme také *reciproký henry*. (Reciproká hodnota = převrácená hodnota, tedy $H^{-1} = 1/H$.)

Magnetický odpor závisí jednak na délce l uzavřeného obvodu, jednak na prostředí, jež vytváří uzavřený magnetický obvod. Závislost na prostředí vyjadřuje tzv. *permeabilita prostředí* μ . Stejně jako ve vodičích elektrického

proudu je v magnetických obvodech magnetický odpor *přímo úměrný* délce l a *nepřímo úměrný* průřezu S magnetického obvodu.

Pro magnetický odpor tedy platí vztah

$$R_m = \frac{1}{\mu} \frac{l}{S}$$

Další veličina zavedená v magnetismu jako obdoba elektrické veličiny je *magnetická vodivost* G_m . Platí pro ni vztah

$$G_m = \frac{1}{R_m}$$

Magnetická vodivost je převrácená hodnota magnetického odporu. Jednotkou magnetické vodivosti je *henry*.

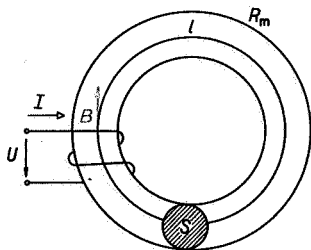
Příklad 48: Vypočítejte magnetickou vodivost uzavřeného ocelového jádra s průřezem 9 cm^2 , dlouhého 200 mm ($\mu_r = 400$).

$S = 9 \text{ cm}^2 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, $l = 200 \text{ mm} = 0,2 \text{ m}$, $\mu_r = 400$

$$R_m = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l}{S} = \frac{1}{1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 400} \cdot \frac{0,2 \text{ m}}{9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 4,42 \cdot 10^5 \frac{1}{\text{H}}$$

$$G_m = \frac{1}{R_m} = 2,26 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

► Magnetická vodivost jádra je $2,26 \cdot 10^{-6} \text{ H}$, tj. $2,26 \mu\text{H}$.



Obr. 124. Magnetický indukční tok v magnetickém obvodu

6.8. HOPKINSONŮV ZÁKON

Jako obdoba Ohmova zákona platí pro magnetické obvody *Hopkinsonův zákon*

$$\Phi = \frac{I}{R_m}$$

kde Φ je magnetický indukční tok v obvodu,

I celkový proud, kterým se tok v obvodu vytvořil.

R_m magnetický odpor obvodu.

Příčinou magnetického pole je magnetomotorické napětí F_m . Magnetomotorické napětí vzniklé při průchodu proudu se rovná proudu, který v závitů vytváří magnetický tok, tedy

$$F_m = I$$

Prochází-li proud větším počtem závitů, je

$$F_m = IN$$

kde N je počet závitů.

Magnetomotorické napětí se tedy musí udávat v jednotkách proudu, tj. v *ampérech*. Tato neshoda vzniká proto, že se snažíme přizpůsobit magnetické veličiny elektrickým.

Po této úpravě můžeme psát Hopkinsonův zákon v dalším tvaru

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

což je vztah obdobný Ohmovu zákonu. Vyjádříme jej takto: *Magnetický indukční tok Φ procházející magnetickým obvodem je přímo úměrný magnetomotorickému napětí F_m a nepřímo úměrný magnetickému odporu R_m tohoto obvodu.*

- ▽ *Poznámka:* S využitím jednotek, tzv. kontrolou jednotek, můžeme ověřit správnost jednotky ampér pro magnetomotorické napětí. Podle Hopkinsonova zákona je

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

Z toho

$$F_m = \Phi R_m$$

Po dosazení jednotek dostaneme

$$A = \text{Wb} \cdot \text{H}^{-1}$$

Z tabulek zjistíme, že $\text{Wb} = \text{V} \cdot \text{s}$ a $\text{H} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$, tedy $\text{H}^{-1} = \frac{\text{A}}{\text{V} \cdot \text{s}}$.

Dosadíme a dostaneme

$$\text{V} \cdot \text{s} \cdot \frac{\text{A}}{\text{V} \cdot \text{s}} = \text{A}$$

△ Jednotkou magnetomotorického napětí je ampér.

Příklad 49: Určete magnetický odpor a magnetickou vodivost obvodu, který má průřez $1,0 \text{ cm}^2$. Při magnetické indukci $B = 1,1 \text{ T}$ prochází 600 závitů, které jsou navinuty na obvodu, proud $0,2 \text{ A}$.

$S = 1,0 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$, $B = 1,1 \text{ T}$, $N = 600$, $I = 0,2 \text{ A}$

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

$$R_m = \frac{F_m}{\Phi} = \frac{IN}{BS} = \frac{0,2 \text{ A} \cdot 600}{1,1 \text{ T} \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} \doteq 1,09 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}$$

$$G_m = \frac{1}{R_m} \doteq 0,92 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

Magnetický odpor obvodu je přibližně $1,09 \text{ MH}^{-1}$ a magnetická vodivost obvodu je asi $0,92 \mu\text{H}$.

V odstavci 6.4.2 jsme uvedli vztah pro intenzitu magnetického pole v cívkce

$$H = \frac{IN}{l}$$

Vzhledem k tomu, že $F_m = IN$, můžeme psát

$$F_m = IN = Hl$$

Magnetomotorické napětí je přímo úměrné součinu intenzity magnetického pole H a délky cívky l .

6.9. ŘEŠENÍ MAGNETICKÝCH OBVODŮ

Magnetický obvod může být jednoduchý nebo složený. Jednoduchý je ze stejného materiálu a má stejný průřez. Magnetický indukční tok je ve všech jeho částech stejný, protože platí

$$\Phi = BS$$

Složený magnetický obvod má v různých částech odlišný průřez, popř. je i z rozdílného materiálu. Ke složeným obvodům řadíme také *obvody se vzduchovou mezerou* (obr. 122), popř. obvody, jejichž části jsou trvalé magnety.

Jednoduché obvody jsme řešili v předcházejících článcích. Musíme si však uvědomit, že magnetický indukční tok se neuzavírá výhradně feromagnetickou látkou, např. ocelovými plechy, ale také prostředím, které plechy obklopuje. Z toho důvodu jsou výpočty magnetických obvodů pouze přibližné. Se skutečností se nejlépe shodují pro prstenec.

Poznámka: V elektrotechnice se někdy hovoří o magnetických obvodech se železem. Většinou se do nich zahrnují nejen obvody s technicky čistým železem, ale také upravené oceli, především křemiková ocel.

Rozeznáváme dvě základní řazení magnetických obvodů – sériové a paralelní.

6.9.1. Sériové řazení magnetických obvodů

Sériové řazení magnetických obvodů ukážeme na ocelovém prstenci s velmi úzkou vzduchovou mezerou. Prvním obvodem je vlastní prstenec, druhým je mezeře v prstenci. Magnetický indukční tok prstencem i mezerou je stejný

$$\Phi = \Phi_1 = \Phi_2$$

▽ Vzhledem k tomu, že

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

kde S je průřez prstence i mezery, musí platit, že magnetická indukce v prstenci i v mezeře je stejná, tedy

$$B_1 = B_2 = B$$

Ze vztahu

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

dostaneme výraz pro intenzitu magnetického pole v oceli

$$H_1 = \frac{B}{\mu_0 \mu_{r1}}$$

a ve vzduchu

$$H_2 = \frac{B}{\mu_0 \mu_{r2}}$$

Dělením obou vztahů dostáváme poměr intenzit magnetických polí a relativních permeabilit v prstenci a ve vzduchové mezeře

$$H_1 : H_2 = \mu_{r2} : \mu_{r1}$$

Intenzita magnetického pole v mezeře je tedy mnohem větší než ve feromagnetické látce. Proto jsou magnetické síly v mezeře značně veliké.

Vzhledem k tomu, že relativní permeabilita vzduchu je mnohem menší než relativní permeabilita oceli, můžeme při méně přesných výpočtech uvažovat jen intenzitu magnetického pole v mezeře.

△

●

Lze dokázat, že zcela podobně jako pro sériové řazení rezistorů platí i pro sériové řazení magnetických obvodů s magnetickými odpory R_{m1} , R_{m2} až R_{mn} vztah

$$R_m = R_{m1} + R_{m2} + \dots + R_{mn}$$

Výsledný magnetický odpor se tedy rovná součtu všech dílčích magnetických odporů v obvodu.

S využitím těchto poznatků a Hopkinsonova zákona odvodíme pro indukční tok v obvodu s úzkou mezerou vztah

$$\Phi = \frac{F_m}{R_{m1} + R_{m2}}$$

kde F_m je magnetomotorické napětí,

R_{m1} magnetický odpor prstence,

●

R_{m2} magnetický odpor mezery.

▼

Příklad 50: V magnetickém obvodu z elektrotechnických plechů s průřezem 24 cm^2 je střední délka magnetického obvodu $0,5 \text{ m}$. Jádru je přerušeno vzduchovou mezerou s šířkou 2 mm . Určete magnetomotorické napětí potřebné pro dosažení magnetického indukčního toku $1,44 \text{ mWb}$.

$S = 24 \text{ cm}^2 = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, $l = 0,5 \text{ m}$, $d = 0,002 \text{ m}$, $\Phi = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$, $\mu_r = 2000$ (z tabulek)

$$R_{m1} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l}{S} = \frac{1}{1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 2000} \cdot \frac{0,5 \text{ m}}{2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} \doteq 83\,000 \frac{1}{\text{H}}$$

$$R_{m2} = \frac{1}{\mu_0} \frac{d}{S} = \frac{1}{1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}}} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} \doteq 663\,000 \frac{1}{\text{H}}$$

$$\Phi = \frac{F_m}{R_{m1} + R_{m2}}$$

$$F_m = \Phi(R_{m1} + R_{m2}) = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \left(83\,000 \frac{1}{\text{H}} + 663\,000 \frac{1}{\text{H}} \right) = 1070 \text{ A}$$

▲ Potřebné magnetomotorické napětí je 1070 A.

● Pro přibližný výpočet magnetomotorického napětí pro vzduchovou mezeru se stejným průřezem lze odvodit vztah

$$F_m = 0,8 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{H}} \cdot B d$$

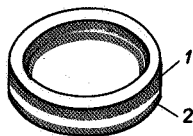
kde B je magnetická indukce v mezeře,

d šířka mezery.

Poznámka: Výpočtem se přesvědčíme, že výsledek je téměř stejný jako při předcházejícím postupu.

6.9.2. Paralelní řazení magnetických obvodů

Paralelně řazené obvody jsou znázorněny na obr. 125. Obvod vytvářejí dva prstence nad sebou, které jsou označeny 1 a 2. Jsou ovinuty společným vinutím. Materiál prvního prstence má relativní permeabilitu μ_{r1} a materiál druhého μ_{r2} .



Obr. 125. Paralelně řazené magnetické obvody

7 V prvním prstenci je magnetická indukce

$$B_1 = \mu_{r1}\mu_0 \frac{NI}{l}$$

protože $B = \mu H$ (čl. 6.5), přičemž permeabilita $\mu = \mu_r\mu_0$. Pro druhý prstec nec platí

$$B_2 = \mu_{r2}\mu_0 \frac{NI}{l}$$

kde N je počet závitů cívky,

I proud procházející cívkou,

l střední délka prstence.

Dělením obou vztahů dostaneme pro poměr magnetických indukcí vztah

$$B_1 : B_2 = \mu_{r1} : \mu_{r2}$$

Vzhledem k tomu, že magnetický indukční tok v prvním prstenci je

$$\Phi_1 = B_1 S_1 = \frac{F_m}{R_{m1}}$$

a ve druhém

$$\Phi_2 = B_2 S_2 = \frac{F_m}{R_{m2}}$$

je celkový magnetický tok

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

Magnetický odpor odvozený ze vztahu

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

je

△

$$\frac{F_m}{R_m} = \frac{F_m}{R_{m1}} + \frac{F_m}{R_{m2}}$$

Dělíme-li tento vztah F_m , dostaneme pro *paralelní řazení dvou magnetických obvodů* s odpory R_{m1} a R_{m2} vztah

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{R_{m2}}$$

Pro n magnetických obvodů platí

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{R_{m2}} + \dots + \frac{1}{R_{mn}}$$

tedy obdobný vztah jako pro výpočet výsledného odporu paralelně řazených rezistorů.

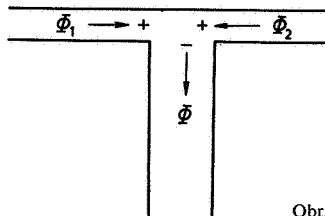
6.9.3. Základní vztahy pro řešení magnetických obvodů

Vzhledem k tomu, že jsme zavedli magnetické veličiny jako obdobu elektrických veličin, můžeme pro řešení složených magnetických obvodů využít upravené *Kirchhoffovy zákony*. Místo elektrických proudů uvažujeme magnetické indukční toky Φ , místo elektrického napětí použijeme magnetomotorické napětí F_m a místo úbytků napětí zavedeme *magnetické napětí* U_m .

Obdoba *prvního Kirchhoffova zákona* pro magnetické obvody zní takto: *Součet všech magnetických indukčních toků v uzlu se rovná nule*

$$\sum \Phi = 0 \text{ Wb}$$

(Značkou $\sum$ označujeme součet všech – v našem případě indukčních toků.) Toky do uzlu označujeme +, toky z uzlu –. Uzlem je místo, kde se magnetické indukční toky rozvětvují nebo sbíhají (obr. 126).



Obr. 126. Rozvětvený magnetický obvod

Podle *druhého Kirchhoffova zákona* platí obdobně pro magnetické obvody: *Součet magnetických napětí v uzavřeném magnetickém obvodu se rovná celkovému magnetomotorickému napětí v magnetickém obvodu*

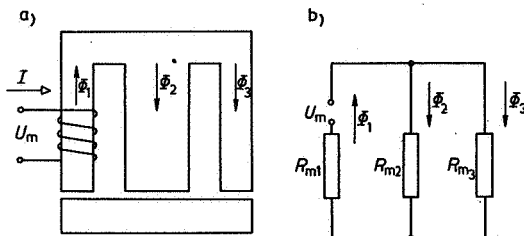
$$\sum U_m = \sum \Phi R_m$$

kde Φ je magnetický indukční tok,

R_m magnetický odpor,

U_m magnetické napětí.

S využitím Kirchhoffových zákonů řešíme magnetické obvody (obr. 127) zcela obdobně jako obvody elektrické (odst. 3.20.2).



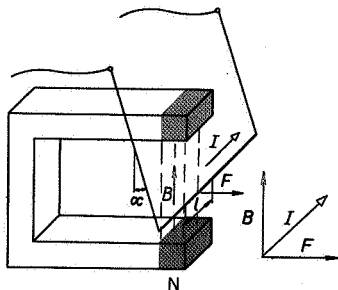
Obr. 127. a) Rozvětvený magnetický obvod; b) schéma obvodu pro výpočet

6.10. POHYB VODIČE V MAGNETICKÉM POLI

6.10.1. Pohyb osamoceného vodiče

Pokus: Volně pohyblivý vodič vložíme mezi póly magnetu. Jakmile začne vodičem procházet proud, vodič se vychýlí (obr. 128).

Podobnými pokusy se zjistilo, že *magnetické pole vodiče a magnetické pole magnetu na sebe vzájemně působí*. Síla, kterou působí magnetické pole na vodič, závisí na *magnetické indukci B* , na *proudu I* , který prochází vodičem, a na tzv. *aktivní délce l vodiče*, tj. délce té jeho části, na kterou magnetické pole působí. Pro sílu v homogenním magnetickém poli platí vztah



Obr. 128. Vodič v magnetickém poli

$$F = BIl \sin \alpha$$

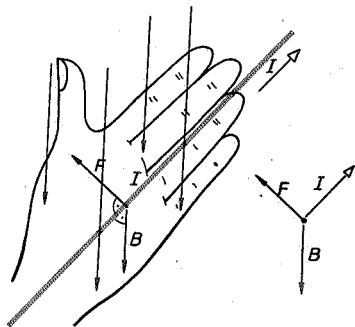
kde α je úhel, který svírá vodič s indukčními čarami.

Jsou-li indukční čáry kolmé, používáme jednodušší vztah

$$F = BIl$$

Vychylování vodiče v magnetickém poli je významný jev, který umožňuje konstruovat elektromotory.

Orientaci síly působící na vodič v magnetickém poli stanovíme *Flemingovým pravidlem levé ruky*: Položíme *levou ruku* dlaní pod vodič tak, aby indukční čáry směřovaly do dlaně a prsty ukazovaly směr proudu. Odchýlený palec ukáže směr síly, kterou působí magnetické pole na vodič (obr. 129).



Obr. 129. Flemingovo pravidlo levé ruky

Pokusy se přesvědčíme, že v souladu s Flemingovým pravidlem se vodič vychýlí na druhou stranu, změníme-li v něm směr proudu. Změny směru výchylky vodiče dosáhneme také otočením magnetu, tedy obrácením směru vektoru magnetické indukce. Pravidelným přepínáním směru proudu ve vhodných okamžicích dosáhneme toho, že se vodič bude rytmicky kývat.

Příklad 51: V homogenním magnetickém poli s indukcí 0,6 T je aktivní část vodiče dlouhá 200 mm. Vodičem prochází proud 4 A. Určete sílu, která vychyluje tento vodič ($\sin \alpha = 1$).

$B = 0,6 \text{ T}$, $l = 200 \text{ mm} = 0,2 \text{ m}$, $I = 4 \text{ A}$

$$F = BIl = 0,6 \text{ T} \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 4 \text{ A} = 0,48 \text{ N}$$

Vodič vychyluje síla 0,48 N.

6.10.2. Vzájemné působení dvou vodičů

V předcházejícím článku jsme odvodili vzájemné působení magnetického pole na vodič. Při dvou rovnoběžných vodičích vznikají kolem každého vodiče magnetická pole, ale ta nejsou již homogenní. Oba vodiče na sebe vzájemně působí silami, které označíme F a $-F$. Z fyziky víte, že jde o dvě opačné síly, které vznikají při vzájemném působení těles.

Pokus: Dva svislé dlouhé vodiče s malým průřezem umístíme blízko sebe tak, aby jejich konce byly pevné. Nejprve necháme oběma vodiči procházet proud *stejným směrem*, tedy vodiče jsou spojeny paralelně.

Pechlivým pozorováním zjistíme, že se vodiče k sobě *přitahují* (obr. 130a).

Pokus opakujeme, ale vodiče zapojíme tak, aby druhým vodičem procházel proud *opačným směrem*. Nyní se vodiče *odpuzují* (obr. 130b). Těmito pokusy jsme potvrdili, že vodiče, jimiž prochází proud, na sebe navzájem působí. Při znázornění proudu vodičem, který je kolmý k nákresně, si představíme ve vodiči šíp. Tečka (hrot šípu) znamená, že proud směřuje k nám. Křížek (stabilizační plochy) označuje směr proudu od nás.

Měřením se zjistilo, že pro sílu F , kterou na sebe působí dva navzájem rovnoběžné vodiče délky l , jimiž procházejí proudy I_1 a I_2 , platí vztah

$$F = \frac{\mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2 l}{d}$$

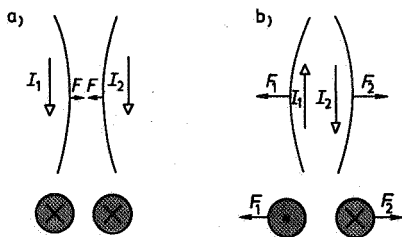
kde μ je permeabilita prostředí kolem vodičů,

d vzdálenost vodičů.

Vztah platí pro vodiče se zanedbatelným průřezem.

Vzhledem k tomu, že v tabulkách se udává relativní permeabilita, použijeme pro jiná prostředí než vakuum nebo vzduch vztah $\mu = \mu_0 \mu_r$ a dostaneme

$$F = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \frac{I_1 I_2 l}{d}$$



Obr. 130. a) Přitahování vodičů;
b) odpuzování vodičů

Příklad 52: V rozvodně jsou dva rovnoběžné vodiče, dlouhé 4,0 m a vzdálené od sebe 200 mm. Jakou silou na sebe působí při průchodu proudu 4500 A?

$$I_1 = I_2 = 4500 \text{ A} = 4,5 \cdot 10^3 \text{ A}, l = 4,0 \text{ m}, d = 0,2 \text{ m}, \mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$$

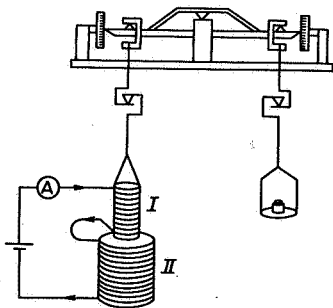
$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 l}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{4,5 \cdot 10^3 \cdot 4,5 \cdot 10^3}{0,2} \cdot 4,0 \text{ N} \doteq 81 \text{ N}$$

Vodiče na sebe působí silou asi 81 N.

Při zkratových proudech jsou tyto síly daleko větší a mohou způsobit zkroutení nebo vytrhání chybně upevněných vodičů. Uvedený vztah

$$F = \frac{\mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2 l}{d}$$

se používá k *definování* základní jednotky SI – *ampéru*: Ampér je stálý elektrický proud, který při průchodu dvěma rovnoběžnými přímkovými vodiči, nekonečně dlouhými, se zanedbatelným průřezem, umístěnými ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti jednoho metru vyvolá mezi těmito vodiči sílu $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ na jeden metr délky.

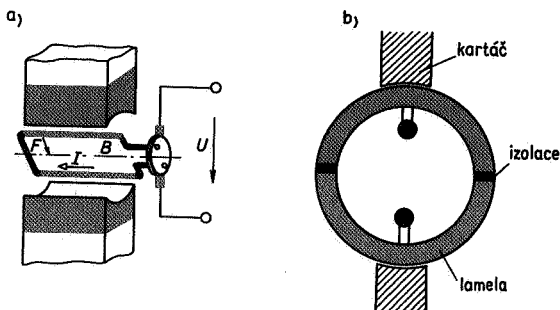


Obr. 131. Měření proudu 1 A podle definice SI

Po dosazení dostaneme

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \frac{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

Tato definice ampéru umožňuje určit proud s velkou přesností. Používá se k tomu zařízení, které je na obr. 131. Při průchodu proudu se od sebe vtahují dvě cívky a závaží na rovnoramenných vahách se vyváží rovnováha.

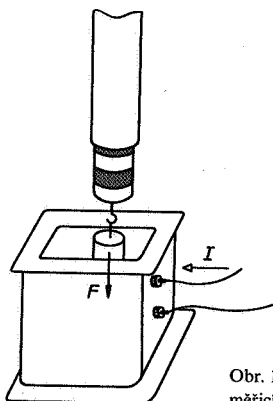


Obr. 132. a) Smyčka, kterou prochází proud; b) komutátor s kartáči

6.11. DYNAMICKÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU

Jak jsme již naznačili, jsou dynamické (tj. silové) účinky elektrického proudu základním jevem pro konstrukci elektromotorů a některých elektrických přístrojů, např. relé a stykačů.

V magnetickém poli na obr. 132a jsou aktivní pouze vodorovné části



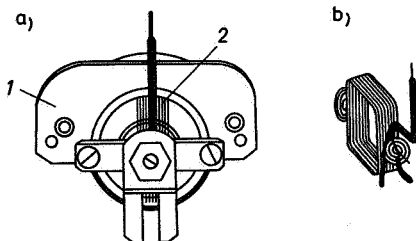
Obr. 133. Podstata feromagnetického měřicího přístroje

vodiče. Všimneme si, 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 trvale otáčet. Změnu směru proudu obstarává v našem modelu *komutátor s kartáči* (obr. 130b).

Dynamické účinky, které vznikají při průchodu vodičem, jsou základem *elektrotechnických měřicích přístrojů*.

Pokus: Nad cívku zavěsíme na siloměr ocelový váleček (obr. 133). Začne-li cívkou procházet proud, vtáhne se váleček do cívky. Při větším proudu se váleček vtáhne hlouběji, takže výchylka siloměru je větší. Tento jev je základem *feromagnetických měřicích přístrojů*. (S jejich skutečnou konstrukcí se seznámíte později.)

Jiným druhem elektrických měřicích přístrojů je *magnetoelektrický přístroj*, který využívá otáčení cívky v magnetickém poli. Při větším proudu v cívce se cívka v magnetickém poli otočí více a ukazovatel ukazuje větší výchylku (obr. 134).



Obr. 134. Magnetoelektrický přístroj; a) uspořádání: 1 – magnet, 2 – cívka;
b) cívka s ukazovatelem a tlumicími pružinami

Voltmetry se konstruují tak, aby měly co *největší vnitřní odpor*. Musí totiž co *nejméně* ovlivňovat napětí v obvodu. Zapojujeme je *paralelně*.

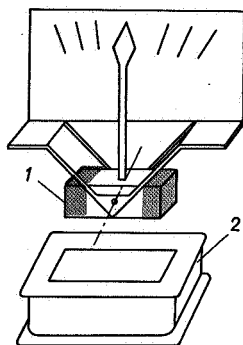
Ampérmetry zapojujeme *sériově*, musí mít co *nejmenší vnitřní odpor*, aby *nezmenšovaly* proud procházející obvodem.

Velmi malé proudy měříme *galvanometry*. Jsou to přístroje, které mají většinou nulu uprostřed. Ukazovatel se u nich vychyluje buď působením magnetického pole cívky na trvalý magnet (obr. 135), nebo se v nich využívá natáčení tenkého vlákna s cívkou. Na *zrcadlovém galvanometru* je na tomto vláknu upevněno zrcátko (obr. 136). Na zrcátko dopadá světelný paprsek ze zdroje světla a odráží se na stupnici, která může být až několik metrů od zrcátka.

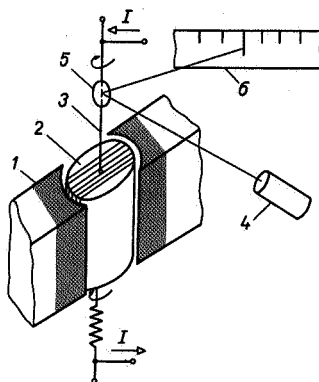
Tímto způsobem se každá výchylka zrcátka značně zvětší, a lze tak naměřit i nepatrné změny proudu.

Základem *telefonního sluchátka* je dvojice cívek, které přitahují ocelovou destičku, tzv. *membránu* (obr. 137). Zvuk pak vytvářejí kmity membrány.

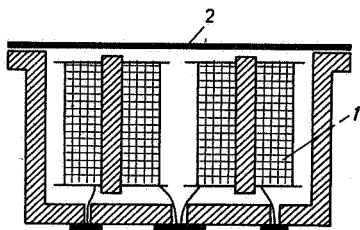
Silových účinků magnetického pole se využívá také v *reproduktorech*, kde cívka s malou hmotností kmitá v magnetickém poli trvalého magnetu



Obr. 135. Části galvanometru s trvalým magnetem: 1 – magnet, 2 – cívka



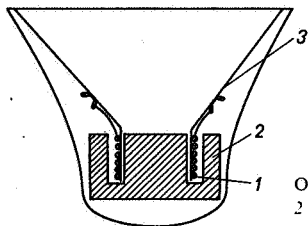
Obr. 136. Zrcátkový galvanometr: 1 – magnet, 2 – cívka, 3 – vlákno, 4 – zdroj světla, 5 – zrcátko, 6 – stupnice



Obr. 137. Řez telefonním sluchátkem: 1 – cívka, 2 – membrána

(obr. 138). Její pohyb se přenáší na papírovou membránu, která vyznačuje zvukové vlny.

Postupně se budete seznamovat s dynamickými účinky elektrického proudu v mnoha dalších zařízeních.



Obr. 138. Řez reproduktorem: 1 – cívka, 2 – magnet, 3 – membrána

6.12. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Proč rozlišujeme uzavřený a otevřený magnetický obvod, přestože magnetický indukční tok je vždy uzavřen?
2. Nakreslete a) uzavřený, b) otevřený magnetický obvod a vyznačte v něm indukční čáry.
3. Co vyjadřuje magnetický odpor? Jaká je jeho jednotka?
4. Na čem závisí magnetický odpor magnetického obvodu?
5. Jaký magnetický odpor má vzduchová mezera s délkou 20 mm a průřezem 40 cm^2 ?
6. Napište vztah, který vyjadřuje Ohmův zákon a vztah pro Hopkinsonův zákon. Čím se oba vztahy vzájemně liší?
- ▽ 7. Vypočítejte magnetomotorické napětí v magnetickém obvodu, ve kterém proud 1,1 A v cívce se 450 závitů vytváří magnetický indukční tok ($\mu_r = 500$).
- △ 8. Určete magnetický odpor prstence s průřezem 40 cm^2 , se střední délkou 62 cm ($\mu_r = 500$).
9. Jaký magnetický indukční tok prochází úsekem magnetického obvodu při magnetomotorickém napětí 400 A a magnetickém odporu obvodu $2 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1}$?

10. Určete při magnetomotorickém napětí 500 A magnetický indukční tok v magnetickém obvodu složeném z feromagnetické látky a mezeře. Feromagnetická látka má magnetický odpor 10^3 H^{-1} a vzduchová mezeře $2 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1}$.
11. Při jakém magnetomotorickém napětí vzniká ve vzduchové mezeře 0,002 m magnetická indukce 1,2 T?
- ▽ 12. V magnetickém obvodu podle obr. 127 vypočítejte magnetický indukční tok Φ při $\Phi_1 = 6,28 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$ a $\Phi_2 = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$. Jaká je magnetická indukce v jednotlivých mezerách?
- △ 13. Jakou silou se vychyluje přímý vodič s aktivní délkou 150 mm v homogenním magnetickém poli ($\sin \alpha = 1$) s magnetickou indukcí 0,8 T při proudu 2,1 A?
14. Změní se výchylka vodiče v magnetickém poli, změníme-li v něm současně směr proudu a směr magnetického pole v jeho okolí? Zdůvodněte Flemingovým pravidlem levé ruky.
15. Jaký proud musí procházet vodičem s aktivní délkou 300 mm v homogenním magnetickém poli s magnetickou indukcí 1,3 T, aby se vodič vychyloval silou 2,6 N?
16. Jedním vodičem rovnoběžného vedení prochází stejnosměrný proud 6 A a druhým stejnosměrný proud 12 A. Vodiče jsou ve vzduchu, jsou od sebe vzdáleny 8 mm a jejich délka je 30 m. Jakou silou na sebe působí?
17. Přečtěte a vysvětlete definici ampéru. Jak se přesně určí proud s využitím silových účinků magnetického pole vodiče?
18. Jmenujte tři elektrická zařízení, která využívají dynamické účinky elektrického proudu.
19. Vysvětlete, proč se otáčí smyčka v magnetickém poli, když ji prochází proud. Načrtněte kartáče a komutátor a vysvětlete jejich funkci.
20. Který jev je základem feromagnetického měřicího přístroje?
21. Jaký jev se využívá v magnetoelektrických přístrojích?
22. Jaký vnitřní odpor musí mít voltmetr a jaký ampérmetr? Vysvětlete proč.
23. Objašněte činnost zrcátkového galvanometru. Jaká je jeho přednost?
24. Jak se využívají dynamické účinky elektrického proudu při přeměně elektrické energie na zvuk?

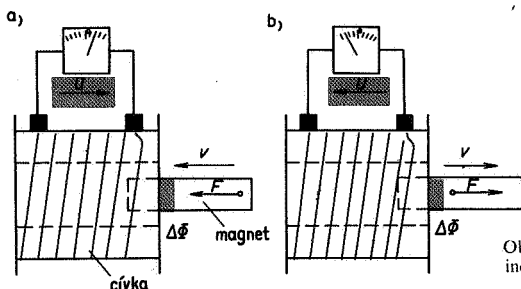
6.13. ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE

● 6.13.1. Indukované napětí

Zatím jsme poznali pouze elektrochemické zdroje napětí. Tyto zdroje však dodávají jen nepatrný zlomek elektrického výkonu z celkového instalovaného výkonu. Většinou získáváme elektrický výkon v generátorech tepelných, vodních a jaderných elektrárn, kde se využívá *elektromagnetická indukce*.

Pokusy ukážeme, za jakých podmínek se v cívce indukuje napětí.

Pokus 1: Cívku s větším počtem závitů spojíme s galvanometrem. Do dutiny cívky vsuneme rychle magnet a sledujeme ukazovatel galvanometru (obr. 139a).



Obr. 139. Elektromagnetická indukce v pevné cívce

Vidíme, že se ukazovatel vychýlí, ale brzy se vrátí do nulové polohy. Můžeme tedy říci, že při vsunutí magnetu vzniká t.j. *indukuje* se v cívce napětí. Stejně se napětí indukuje, vysunujeme-li magnet z cívky, ale proud v obvodu, který je k cívce připojen, má opačný směr. Mezi svorkami je tedy při vysunutí magnetu opačně pólované napětí (obr. 139b).

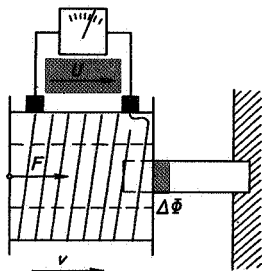
Pokus 2: Magnet upevníme a cívku nasouváme na magnet (obr. 140).

Výchylka galvanometru je obdobná jako při prvním pokusu. Je tedy zřejmé, že se v cívce indukuje napětí a připojeným obvodem prochází indukovaný proud.

Oba pokusy by nás mohly vést k domněnce, že příčinou vzniku indukovaného napětí je pohyb. Ukážeme však, že tomu tak není.

Pokus 3: Postavíme vedle sebe jednu cívku spojenou se zdrojem napětí, tzv. *primární* (první) cívku, a k ní postavíme *sekundární* (druhou) cívku, spojenou

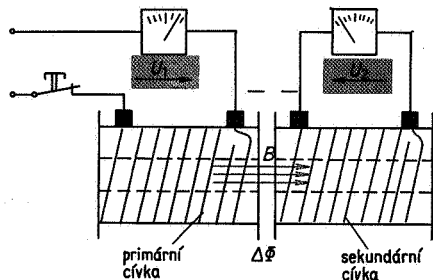
s galvanometrem. Sledujeme ukazovatel galvanometru v okamžiku, kdy primární cívku začne nebo přestane procházet proud (obr. 141). I v tomto případě se v sekundární cívce indukuje napětí. Je tedy zřejmé, že příčinou vzniku indukovaného napětí není pohyb cívky. Při zasouvání magnetu do cívky nebo při zapojení proudu v primární cívce se magnetický indukční tok v sekundární cívce zvětšoval. Při vysouvání magnetu z dutiny cívky nebo při odpojení primární cívky od zdroje se magnetický indukční tok v cívce zmenšoval.



Obr. 140. Elektromagnetická indukce při pohybu cívky

Indukované napětí tedy vzniká při změně magnetického indukčního toku v okolí vodiče. Jev, který jsme při těchto pokusech pozorovali, je elektromagnetická indukce.

Elektromagnetická indukce patří mezi nejvýznamnější objevy 19. století, protože umožnila podstatný rozvoj elektrotechniky, především elektrických strojů.



Obr. 141. Indukované elektromotorické napětí v sekundární cívce

Řadou měření se zjistilo, že indukované napětí v přímém pohyblivém vodiči je přímo úměrné součinu magnetické indukce B , aktivní délky l vodiče a rychlosti v vodiče. Pro indukované napětí tedy platí

$$U_i = Blv \sin \alpha$$

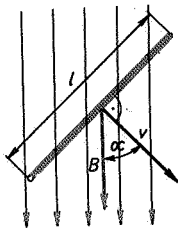
Úhel α je úhel vektoru magnetické indukce a vektoru rychlosti v vodiče (obr. 142). Mění-li se magnetické pole tak, že jeho vektor magnetické indukce je kolmý na vektor rychlosti vodiče, platí

$$U_i = Blv$$

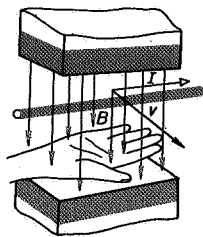
protože pro $\alpha = 90^\circ$ je $\sin \alpha = 1$.

Všimli jste si, že při přerušení proudu v primární cívce se v sekundární cívce indukovalo opačné napětí než při zapojení. Tento poznatek je ve shodě s tzv. *Lenzovým pravidlem*: Indukované napětí vyvolá proud, který svými účinky brání změně, která ho vyvolala.

Směr proudu se při elektromagnetické indukci určuje *Flemingovým pravidlem pravé ruky*: Položíme pravou ruku dlaní k vodiči tak, aby indukční čáry vstupovaly do dlaně a odvrácený palec ukazoval směr rychlosti pohybu vodiče. Dohodnutý směr proudu ve vodiči je od hřbetu ruky k napjatým prstům (obr. 143).



Obr. 142. K odvození vztahu pro indukované napětí



Obr. 143. Flemingovo pravidlo pravé ruky

Místo vodiče necháme v magnetickém poli otáčet obdélníkovou smyčku. Plochou ohraničenou vodičem prochází magnetický indukční tok Φ . V době Δt se při změně magnetického indukčního toku $\Delta \Phi$ podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce indukuje ve smyčce napětí

$$U = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Přitom uvažujeme rovnoměrnou změnu magnetického indukčního toku.

Podíl

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

je tzv. časová změna indukčního toku.

S využitím napětí, které se indukuje v závitě, je definována jednotka weber (odst. 6.4.4).

Jeden weber je magnetický indukční tok, který indukuje v závitě, jenž jej obepíná, napětí jednoho voltu, změní-li se tento tok rovnoměrně tak, že za jednu sekundu zanikne. Platí tedy

$$\Delta\Phi = U_1 \Delta t$$

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}$$

Jednotka weber nám umožňuje definovat jednotku tesla. Jeden tesla je magnetická indukce, při níž je v rovinné ploše s obsahem jednoho čtverečného metru, umístěné kolmo ke směru magnetické indukce, magnetický indukční tok jednoho webru.

Definice je odvozena ze vztahu

$$\Phi = BS$$

který jsme poznali v odst. 6.4.4. Úpravou dostaneme vztah

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

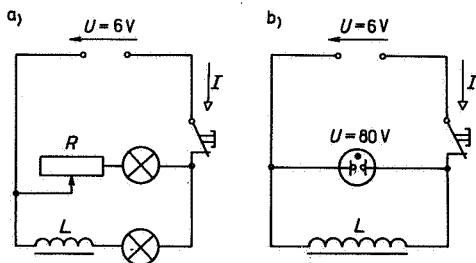
Jednotku tesla dostaneme dosazením jednotek

$$T = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

6.13.2. Vlastní indukce

Poznali jsme, že v cívce se indukuje napětí, mění-li se v jejím okolí magnetický tok. Pokusíme se zjistit, jaké jevy vznikají v cívce, kterou připojujeme ke zdroji, popř. ji od zdroje napětí odpojujeme.

Pokus 1: Sestavíme obvod podle obr. 144a. Proud procházející žárovkou nařídíme rezistorem s posuvným kontaktem tak, aby svítivost obou paralelně zapojených žárovek byla stejná. Proud v obvodu několikrát zapneme a vypneme.



Obr. 144. a) Obvod s rezistorem; b) obvod s doutnavkou

Všimneme si, že žárovka v obvodu s cívkou se rozsvítí vždy později než žárovka ve větvi s rezistorem.

Pokus 2: Sestavíme obvod podle obr. 144b. Opět ho několikrát zapneme a vypneme.

Při každém přerušení proudu se doutnavka krátce rozsvítí. Doutnavka svítí až při napětí větším než 80 V, ale obvod je připojen k akumulátoru s napětím 6 V. Je tedy zřejmé, že v cívce se při každém přerušení proudu indukuje napětí nejméně 80 V.

Oba pokusy potvrzují, že i v samotné cívce připojené ke zdroji napětí se při každé změně magnetického indukčního toku indukuje napětí. Podle Lenzova pravidla působí toto indukované napětí proti změně, která je jeho příčinou. Při zapnutí proudu se indukuje napětí opačného směru, proto se při prvním pokusu žárovka v obvodu cívky rozsvítí později. Při přerušení proudu zaniká elektromagnetické pole v okolí cívky, a tím se v ní indukuje napětí, které se přičte k napětí zdroje. Jak je z pokusu zřejmé, může být toto napětí mnohonásobně větší, než bylo původní napětí, a proto doutnavka svítí.

Všechny popsané jevy jsou důsledkem tzv. *vlastní elektromagnetické indukce*, tj. indukce, která probíhá přímo ve vodiči, v němž se mění proud. Na vodič zpětně působí magnetické pole, jež se kolem něj vytváří.

S vlastní indukci se setkáváme např. v *tlumivkách*. Nepříznivě působí např. při spínacích pochodech v rozvodných sítích a v obvodech elektrických strojů. Prudké zvýšení napětí vlivem vlastní indukce může být příčinou průrazu izolace.

6.14. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Co je příčinou vzniku indukovaného napětí? Na čem závisí toto napětí?
2. Určete napětí indukované ve vodiči dlouhém 150 mm, který se pohybuje rychlostí $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ v homogenním magnetickém poli v rovině odchýlené o 30° od směru vektoru magnetické indukce 1,6 T.
3. Ukažte, jak určíte směr indukovaného proudu v přímém vodiči.
- ▼ 4. Magnetická indukce homogenního magnetického pole je 1,4 T. a) Jaký magnetický indukční tok prochází kruhovou smyčkou s poloměrem 100 mm, jestliže rovina smyčky svírá s vektorem magnetické indukce úhel 60° ? b) Jaký magnetický indukční tok prochází stejnou smyčkou, je-li její rovina rovnoběžná s indukčními čarami?
- ▲ 5. Ve vodiči došlo ke změně magnetického toku o 0,7 Wb za 0,8 s. Jaké napětí se při tom indukovalo ve vodiči?
6. Jaké napětí se indukuje v cívce, změní-li se v jejím magnetickém obvodu magnetický tok o 0,25 Wb za 0,2 s? Cívka má 500 závitů.
7. Jaký vliv na výsledné napětí má napětí indukované vlastní indukci a) při uzavření obvodu, b) při přerušení obvodu?

6.15. ZTRÁTY VE FEROMAGNETICKÝCH MATERIÁLECH

■ 6.15.1. Hysterezní ztráty

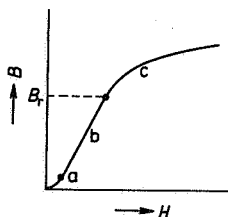
Sledovali jsme přeměny elektrické energie na energii magnetického pole a naopak. Jak jsme se zmínili, všechna energie magnetického pole se již nemění na energii elektrického pole, protože vznikají tzv. *hysterezní ztráty*.

Hysterezní ztráty jsou závislé na *druhu* magnetického materiálu, na tom, jak byl vyroben, na teplotě materiálu a na dalších vlivech.

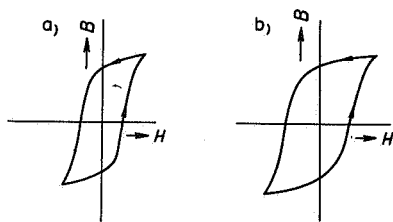
Závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H ve feromagnetické látce znázorňuje *magnetizační křivka*. Vložíme-li do magnetického pole feromagnetický materiál, který ještě nikdy nebyl zmagnetován, začne se materiál magnetovat podle *křivky prvotní magnetizace* (obr.

145). Jakmile magnetické pole zanikne, zůstane část domén v každé feromagnetické látce (tedy i magneticky měkké) orientována. Projeví se to tzv. *remanentní indukci* B_r . Remanentní (zbytkový) magnetismus magneticky měkké látky zanikne teprve po dlouhé době vlivem tepelných pohybů látkových částic. U magneticky tvrdých látek nezaniká.

Požadujeme-li, aby remanentní magnetismus zanikl ihned, *demagnetizujeme* látku tím, že na ni působíme opačným magnetickým polem. Zmagnetovaný šroubovák demagnetizujeme tak, že na jeho severní pól působíme jižním pólem magnetu. Magnetizaci však přerušíme právě v okamžiku, kdy látka nevykazuje žádné trvalé magnetické účinky, tedy když proběhla její demagnetizace. Je zřejmé, že k odstranění remanentního magnetismu musíme vynaložit práci.



Obr. 145. Křivka prvotní magnetizace



Obr. 146. a) Úzká hysterezní smyčka;
b) široká hysterezní smyčka

Pokračováním magnetizace dosáhneme nového zmagnetování feromagnetické látky, ale magnetické póly tělesa budou opačné. Na hysterezní křivce vidíme, že magnetizace pokračuje jen do bodu, který odpovídá nejvyšší dosažené magnetické indukci.

Magnetizace feromagnetických látek neprobíhá rovnoměrně. Zpočátku se v magnetickém poli usměrní nejvíce domén, později se přírůstek usměrněných domén stále zmenšuje. Po usměrnění všech domén již nelze žádným způsobem zvětšit magnetickou indukci látky. Říkáme, že došlo k jejímu magnetickému nasycení. V praxi se pouze magnetickému nasycení blížíme.

Po změně směru magnetického pole probíhá opět demagnetizace, takže se hysterezní křivka uzavře v tzv. *hysterezní smyčce*.

Z šířky hysterezní smyčky usuzujeme na druh feromagnetické látky. Úzkou hysterezní smyčku (obr. 146a) mají magneticky měkké látky, např.

magneticky měkké oceli. Pro *magneticky tvrdé látky* je charakteristická široká hysterezní smyčka (obr. 146b).

Čím větší je plošný obsah uvnitř hysterezní smyčky, tím větší práci musíme dodat, aby se feromagnetická látka vrátila do výchozího stavu. Tato práce se rovná ztrátám ve feromagnetických látkách.

Pro jednotlivé materiály se zjišťují tzv. *měrné ztráty* $\Delta p_{1,0}$ nebo $\Delta p_{1,5}$, které označují nežádoucí přeměnu energie v 1 kg feromagnetické látky při jejím střídavém zmagnetování při dané indukci a daném kmitočtu. Index 1,0 nebo 1,5 znamená, že měrné ztráty platí pro magnetickou indukci 1 T nebo 1,5 T.

Hysterezní křivka umožňuje zjistit průběh permeability. Ukazuje, že permeabilita

$$\mu = \frac{B}{H}$$

je závislá na tom, v jakém stavu je právě látka, především jak postoupila její magnetizace. Pouze u magneticky měkkých látek můžeme použít lineární závislost.

Jak jsme již naznačili, mění se při demagnetizaci část energie magnetického pole v teplo. Opakováním demagnetizace teplota magnetu roste, ale tím se zmenšuje magnetická indukce feromagnetické látky. Při dlouhodobém provozu zařízení s feromagnetickými látkami tedy jejich magnetické účinky slábnou.

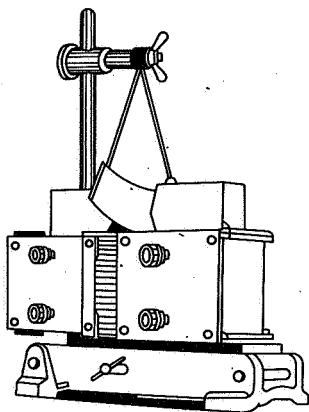
Malé hysterezní ztráty mají speciálně vyráběné materiály, např. permalloy (78,5 % Ni a 21,5 % Fe), arema (uhlíková ocel) a sendust (5,4 Al, 9,6 % Si, zbytek Fe). Relativní permeabilita těchto látek je obrovská, až 117 000.

S magnetizací a demagnetizací se setkáváme např. u elektrických strojů, transformátorů, ale i u elektrických zvonků. Pro tato zařízení se vyrábějí oceli s velmi úzkou hysterezní křivkou, aby hysterezní ztráty byly co nejmenší.

6.15.2. Ztráty vířivými proudy

Pokus: Mezi pólové nástavce elektromagnetu upevníme kyvadlo z hliníkového plechu (obr. 147). Kyvadlo rozkýváme a necháme kývat v době, kdy cívkou elektromagnetu neprochází proud. Potom opakujeme pokus, ale proud necháme elektromagnetem procházet.

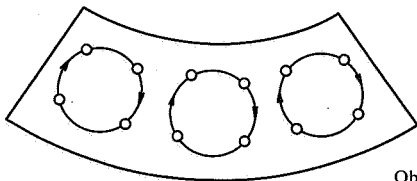
Vidíme, že v magnetickém poli nápadně rychle ustane kývání magnetu.



Obr. 147. Kyvadlo mezi pólovými nástavci

Hliník není feromagnetická látka a jeho brzdění nemůžeme přičítat jevům, jež pozorujeme u oceli.

Hliník je ovšem vodič a (jak již víme) vznikají indukci ve vodiči, který se pohybuje v magnetickém poli, elektrické proudy. Jsou to tzv. *vířivé proudy*, které se z kyvadla neodvádějí, ale probíhají kovem po uzavřených drahách (obr. 148).



Obr. 148. Vířivé proudy v kyvadle

Stejně jako jiné proudy i vířivé proudy vytvářejí ve svém okolí magnetické pole, takže nakonec je pohyb hliníkového kyvadla přece jen brzděn magnetickým polem, avšak polem vytvořeným vířivými proudy.

Vířivé proudy v kovech velmi rychle zanikají a mění se v teplo. Jejich účinky se využívají např. při *elektromagnetickém brzdění* okružních pil nebo setrvačnicků.

Tepelné účinky vzniklé při zániku vířivých proudů jsou základem *indukčního ohřevu*. Setkáváme se s ním např. při nasazování ložisek na hřídel. Teplota ložiska se indukčním ohřevem zvýší, tím se zvětší jeho průměr a lo-

žisko se nasadí na hřídel. Jakmile ložisko vychladne, jeho průměr se zmenší, a ložisko je tím nalisováno na hřídel. Indukčním ohřevem nevnikají do kovů žádné příměsi (jak by tomu bylo při ohřevu plamenem).

Nejčastěji je však teplo vzniklé vířivými proudy překážkou, protože zahřívá části elektrických strojů, např. elektromotorů a transformátorů. Vzhledem k tomu se části strojů, ve kterých by se mohly indukovat vířivé proudy, nezhotovují vcelku jako odlitky, ale skládají se z tenkých plechů, které jsou na povrchu izolované. Indukovaný proud nemůže tedy procházet z jednoho plechu do druhého, ale musí procházet pouze příslušným plechem, po značně dlouhé dráze. Vlivem větší délky plechu a přísad křemíku je v obvodu značný elektrický odpor, takže podle Ohmova zákona obvodem může projít pouze malý proud. Tím se zmenšují ztráty, které vířivé proudy působí.

Podle chemického složení se plechy pro elektrotechniku nazývaly *dynamové plechy* a *transformátorové plechy*. Obvyklé druhy dynamových plechů obsahují od 0,3 % do 3,5 % křemíku a používají se pro konstrukci točivých elektrických strojů. Transformátorové plechy obsahují od 3,5 % do 4,5 % křemíku a jsou určeny především pro výrobu transformátorů.

Nověji se plechy pro elektrotechniku člení podle *měrných ztrát*, což je označení pro ztráty vzniklé hysterezními ztrátami a ztrátami vířivými proudy v jednom kilogramu plechů. Číselně se měrné ztráty rovnají výkonu, který je třeba dodat na přemagnetování 1 kg plechů při střídavém napětí s kmitočtem 50 Hz při magnetické indukci 1,0 T. Jednotkou měrných ztrát je *watt na kilogram* ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Měrné ztráty se určují obvykle při magnetické indukci 1,0 T. Pro dynamové plechy válcované zatepla jsou měrné ztráty od $1,8 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ do $3,6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$. Transformátorové plechy válcované zatepla mají měrné ztráty mezi $0,9 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ až $1,6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.

6.16. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Načrtněte hysterezní křivku magneticky tvrdé látky. Vysvětlete, jak průběh křivky závisí na změnách magnetické indukce.
2. Jak se odstraní remanentní magnetismus magneticky měkké látky?
3. Jak se demagnetuje šroubovák?
4. Látka má malou plochu uvnitř hysterezní křivky. Jaké jsou magnetické vlastnosti této látky?
5. Jak závisí permeabilita na magnetizaci látky?

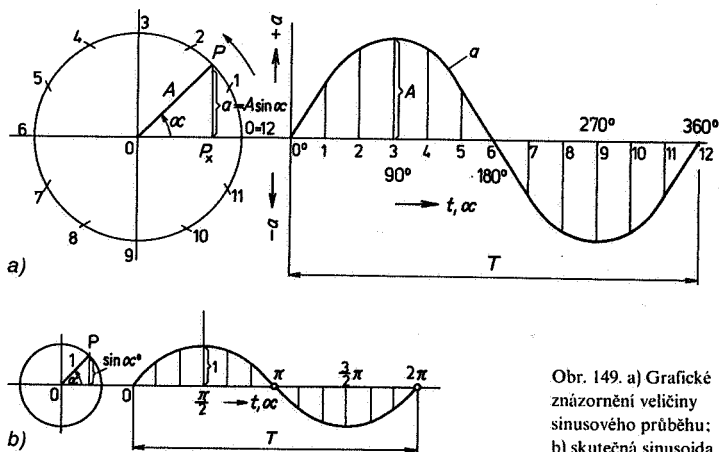
6. Proč vznikají hysterezní ztráty?
7. Vysvětlete, proč se v magnetickém poli brzdí pohyb všech kovových, tedy i nemagnetických těles.
8. Jmenujte dva materiály s velmi velkou permeabilitou.
9. Jak se využívají vířivé proudy?
10. Jaké škodlivé účinky mají vířivé proudy?
11. Jak se omezuje vznik vířivých proudů ve střídavých elektrických strojích?
12. Proč se kostry strojů na stejnosměrné napětí nevyrábějí z plechů, ale z odlitků?
13. Jaké jsou měrné ztráty transformátorových plechů a jaké dynamových plechů?
14. Jádru transformátoru má hmotnost 520 kg. Při kmitočtu 50 Hz a magnetické indukci 1 T určete ztráty v jádru. Měrné ztráty uvažujte $1,1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.

7. Střídavý proud

7.1. ZÁKLADNÍ VELIČINY SINUSOVÉHO PRŮBĚHU

Bude-li se úsečka $A = OP$ na obr. 149a otáčet kolem svého bodu O proti pohybu hodinových ručiček, bude bod P opisovat kružnici a úhel α se bude měnit od 0° do 360° . Svrá-li úsečka A s vodorovnou osou úhel α , rovná se souřadnice $PP_x = a = A \sin \alpha$ okamžitě hodnotě veličiny sinusového průběhu. Bude-li se úhel α zvětšovat od 0° do 90° , bude se úsečka a také zvětšovat, a to z nulové hodnoty až na maximální hodnotu A , tzv. amplitudu. Při zvětšení úhlu od 90° do 180° se bude úsečka a zmenšovat až na nulu, ale bude stále nad vodorovnou osou, tj. bude mít kladnou hodnotu. Při dalším zvětšování úhlu od 180° do 360° se bude úsečka a opět zvětšovat od nuly do A a pak se zase bude zmenšovat na nulu. Úsečka a leží v tomto intervalu pod vodorovnou osou, a proto okamžité hodnoty veličiny sinusového průběhu jsou záporné.

V pravé části obr. 149a je v rozvinutí vynesena závislost úsečky a na úhlu α . Je to grafické znázornění veličiny sinusového průběhu daného



Obr. 149. a) Grafické znázornění veličiny sinusového průběhu; b) skutečná sinusoida

rovnici $a = A \sin \alpha$. Na vodorovnou osu je nanesen úhel α ve stupních a na kolmice jsou vyneseny příslušné okamžité hodnoty úsečky a . Spojením jednotlivých bodů dostaneme plynulou křivku, zvanou sinusoida.

Kdybychom za úsečku A zvolili úsečku jednotkové délky (např. 1 m), dostali bychom místo vztahu $a = A \sin \alpha$ vztah $a = \sin \alpha$. Kružnice, po které by se pohyboval bod P, by byla jednotková kružnice a *délka oblouku odpovídající určitému úhlu by udávala tento úhel v radiánech* (obr. 149b). V rozvinuté části udávají délky souřadnic ve směru svislé osy přímo hodnoty sinu úhlu α , tj. tato křivka je skutečnou sinusoidou. Na obr. 149b vidíme, že se každý sinusový průběh pro úhel od 0° do 360° skládá ze dvou stejných půlvln, z nichž jedna je nad vodorovnou osou (kladná půlvlna) a druhá pod vodorovnou osou (záporná půlvlna). Obě půlvlny znázorňují jeden kmit. Čas potřebný k proběhnutí jednoho kmitu se nazývá *perioda* a označuje se T . Počet kmitů za 1 sekundu se nazývá *kmitočet* neboli *frekvence* a označuje se f .

$$f = \frac{1}{T}$$

Kmitočet je fyzikální veličina a její jednotkou je hertz (Hz). Rozměr Hz je s^{-1} .

Jeden hertz je kmitočet periodického (opakujícího se) děje, jehož jedna perioda trvá jednu sekundu.

V rovnici $a = A \sin \alpha$ se úhel α dosazuje ve stupních. Tento úhel je však úměrný času t , a protože $360^\circ = 2\pi$ rad, můžeme jej také vyjádřit v závislosti na čase úměrou

$$\alpha : 2\pi = t : T$$

$$\alpha = \frac{2\pi t}{T} = 2\pi f t = \omega t$$

Výraz $2\pi f = \omega$ (čti omega) vyjadřuje úhel, který proběhne otáčející se úsečka OP za jednu sekundu. Tento úhel nazýváme *úhlový kmitočet*; udává se v radiánech za sekundu.

Pro okamžitou hodnotu sinusového průběhu píšeme tedy rovnici

$$a = A \sin \omega t$$

Při stanovení velikosti funkce časového úhlu musíme tento úhel převést na stupně, a to tak, že časový úhel v radiánech násobíme číslem 57,3. Platí totiž

$$1 \text{ rad} = \frac{360^\circ}{2\pi} \doteq \frac{360^\circ}{6,28} \doteq 57,3^\circ$$

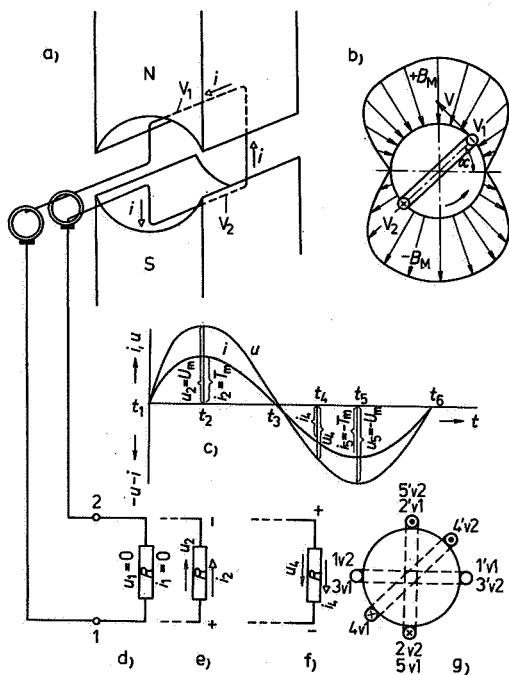
Úhel ve stupních je tedy

$$\alpha \doteq 57,3 \cdot \omega t$$

Protože na vodorovnou osu sinusového průběhu na obr. 149b vynášíme úhly vyjádřené v závislosti na čase, říkáme této ose také osa času.

Příklad 53: Převedte časový úhel 4,28 rad na stupně:

$$\alpha = 4,28 \cdot 57,3 = 245,24^\circ = 245^\circ 14' 38''$$



Obr. 150. Vznik střídavého napětí a proudu:

a) smyčka se otáčí v magnetickém poli; b) průběh magnetické indukce na rotoru; c) časový průběh střídavého (sinusového) napětí a proudu (místo T_m má být I_m); d, e, f) rezistor připojený na svorky 1 a 2; g) poloha smyčky pod póly

7.2. VZNIK SINUSOVÉHO NAPĚTÍ A PROUDU

Na obr. 150a je znázorněna smyčka (závit), která se otáčí v magnetickém poli mezi dvěma póly elektromagnetu. Konce smyčky jsou připojeny ke dvěma vodivým kroužkům, vzájemně od sebe izolovaným, na které dosedají dva kartáče. Smyčka je uložena na válci rotoru z elektrotechnických plechů, který však na obr. 150a není pro přehlednost nakreslen. Magnetické pole je buzeno stejnosměrným proudem, takže má stálou hodnotu. Póly magnetu mají takový tvar, že magnetická indukce na rotoru má průběh podle sinusoidy (obr. 150b). Indukční čáry vstupují ve vzduchové mezeře kolmo do rotoru. Magnetická indukce v libovolném místě na povrchu rotoru je dána vztahem

$$B = B_M \sin \alpha$$

Obvodová rychlost smyčky v je v každé poloze kolmá ke směru magnetické indukce a ve vodiči v_1 se indukuje napětí

$$u = Blv = B_M l v \sin \alpha$$

Stejně velké napětí se indukuje ve vodiči v_2 . Protože jsou vodiče v_1 , v_2 spojeny do série, indukovaná napětí se v nich sčítají a mezi kartáči je okamžitá hodnota napětí

$$u_s = 2 \cdot B_M l v \sin \alpha$$

kde B_M je maximální indukce ve vzduchové mezeře [T],

l délka vodiče [m],

v obvodová rychlost rotoru [m . s⁻¹],

α úhel, který svírá rovina smyčky s vodorovnou rovinou [°].

Směr indukovaného napětí ve vodičích určíme pravidlem pravé ruky.

Připojíme-li na svorky 1 a 2 (obr. 150a) vnější obvod (např. rezistor s činným odporem R) v okamžiku $t_1 = 0$ s, kdy je smyčka v poloze 1–1' (obr. 150g), neprotíná smyčka žádné indukční čáry a indukované napětí $u_1 = 0$ V a proud $i_1 = 0$ A. Je-li smyčka v čase $t_2 = 0,005$ s v poloze 2–2' (obr. 150g), indukuje se v ní napětí $u_2 = U_m$, neboť smyčka protíná místo s maximální magnetickou indukcí. Rezistorem prochází proud $i_2 = I_m$ od svorky 1 ke svorce 2 a dále smyčkou ke svorce 1. Tímto kladným směrem prochází proud tak dlouho, dokud se vodič v_1 pohybuje pod severním pólem. Po natočení smyčky do polohy 3–3' (obr. 150g), tj. v čase $t_3 = 0,01$ s, neprotíná smyčka zase žádné indukční čáry, takže se v ní neindukuje žádné napětí ($u_3 = 0$ V) a proud i_3 v obvodu poklesne na nulu.

V následujícím okamžiku přejde vodič v_1 pod jižní pól a vodič v_2 pod

pól severní. Indukované napětí v obou vodičích změní současně svůj směr a obvodem bude procházet proud od svorky 2 ke svorce 1. Svorka 2 se stane kladnou a svorka 1 zápornou, tj. jejich polarita se změní. Obvodem bude procházet proud opačným směrem tak dlouho, dokud se bude vodič v_1 pohybovat pod jižním pólem (viz okamžik $t_4 = 0,0125$ s, tj. poloha smyčky 4-4'). V poloze 5-5' bude smyčka protínat místo s maximální magnetickou indukcí a bude se v ní indukovat napětí $u_5 = U_m$. Proud v obvodu bude $i_5 = -I_m$. Potom se smyčka natočí do polohy 1-1' a dále se bude popisovaný děj opakovat. Číselné hodnoty časů t_1 až t_6 platí pro kmitočet 50 Hz.

Protože indukované napětí a proud, procházející obvodem, mění nejenom v každém okamžiku svou velikost, ale za určitý čas i svůj směr, říkáme jim střídavé napětí a střídavý proud.

Okamžitá hodnota indukovaného napětí je dána vztahem

$$u_s = U_m \sin \alpha$$

Vyjádříme-li úhel α časovým úhlem, dostaneme

$$u_s = U_m \sin \omega t$$

▼ Vzorec pro maximální hodnotu napětí

$$U_m = 2 \cdot B_M l v$$

můžeme upravit takto:

Obvodová rychlost smyčky

$$v = \frac{\pi D n}{60}$$

kde D je průměr smyčky (rotoru) [m],

n otáčky [min^{-1}].

U dvojpólového stroje vznikne jedna perioda indukovaného napětí za jednu otáčku rotoru, tj. kmitočet se rovná otáčkám. V technické praxi se ale uvažují otáčky v jednotce min^{-1} a platí tedy převodní vztah $f = n/60$. Proto po dosazení platí

$$U_m = 2 \cdot B_M l \frac{\pi D n}{60} = 2 \cdot B_M l \pi D f$$

Součin lD je obsah S plochy pod póly, kterou prochází magnetický tok, takže maximální napětí ve smyčce je

$$U_m = 2\pi f B_M S = \omega \Phi_m$$

Otáčí-li se v magnetickém poli místo smyčky cívka s N závitů, indukuje se v ní maximální napětí

$$U_m = \omega N \Phi_m$$

kde ω je úhlový kmitočet v $[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$,

N počet závitů cívky,

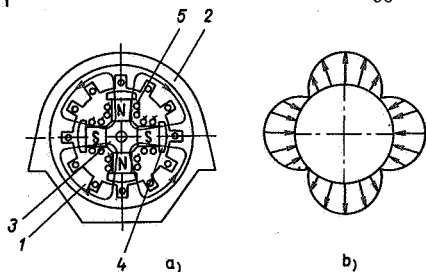
Φ_m maximální magnetický tok $[\text{Wb}]$.

Střídavé napětí sinusového průběhu získáváme v elektrárnách v generátorech, tzv. alternátorech. Jednoduchý alternátor je schematicky naznačen na obr. 151a. Skládá se ze statoru a rotoru. Stator tvoří kostra, ve které je uložen svazek plechů ve tvaru mezikruží. Na vnitřním obvodu jsou drážky, do kterých jsou uloženy cívky vinutí. V dutině statoru se otáčí rotor, který je u dvoupólového stroje válcový a u mnohopólového stroje má vyniklé póly. Na těchto pólech jsou budicí cívky. Jsou zapojeny tak, že se střídá severní pól s jižním pólem. Póly mají nástavce tvarované tak, aby ve vzduchové mezeře mezi póly a statorem byla magnetická indukce rozložena podle sinusoidy (obr. 151b). Největší magnetická indukce je v ose magnetu, nejmenší mezi póly. Otáčí-li se rotor, protíná jeho magnetické pole cívky vinutí statoru, ve kterém se indukuje střídavé napětí sinusového průběhu. Toto uspořádání má tu výhodu, že střídavé napětí odvádíme z pevných svorek statoru.

Kmitočet indukovaného napětí závisí na otáčkách a na počtu pólových dvojic. Proběhne-li pod vinutím statoru jedna pólová dvojice, bude se v něm indukovat napětí jedné periody. Při p pólových dvojicích bude počet period p . Koná-li rotor n otáček za minutu, proběhne vinutí pod cívkami $n/60$ krát za sekundu a počet period za sekundu bude také $n/60$ krát větší.

Podle uvedeného výkladu je kmitočet indukovaného napětí dán vztahem

$$f = \frac{pn}{60}$$



Obr. 151. Uspořádání alternátoru:

- a) 1 – stator, 2 – kostra, 3 – rotor, 4 – pólový nástavec, 5 – budicí vinutí;
b) rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře

kde f je kmitočet [Hz],

p počet pólových dvojic rotoru,

n otáčky rotoru [min^{-1}].

Příklad 54: Určete okamžitou hodnotu střídavého napětí po 1,041 s od průchodu počátkem, je-li doba kmitu 0,02 s a maximální hodnota napětí 250 V.

$U_m = 250 \text{ V}$, $T = 0,02 \text{ s}$, $t = 1,04 \text{ s}$

Okamžitá hodnota napětí $u = U_m \sin \omega t$.

Kmitočet

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,02} \text{ Hz} = 50 \text{ Hz}$$

Časový úhel převedeme na stupně.

$$\omega t = 2\pi f t = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,041 \text{ rad} = 104,1 \cdot \pi \text{ rad}$$

Odečteme maximální počet sudých π , neboť počítáme od počátku poslední periody, tj. $104 \cdot \pi \text{ rad}$, takže zbude $0,1 \cdot \pi \text{ rad} \cong 0,1 \cdot 180^\circ \cong 18^\circ$.

Okamžitá hodnota střídavého napětí

$$u = U_m \sin 18^\circ = 250 \cdot 0,309 \text{ V} = 77,25 \text{ V}$$

Příklad 55: Jaké otáčky má šestipólový alternátor, je-li kmitočet odebíraného napětí 50 Hz.

$p = 3$, $f = 50 \text{ Hz}$

$$f = \frac{pn}{60}$$

z toho

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} \text{ min}^{-1} = 1000 \text{ min}^{-1}$$

Alternátor má otáčky 1000 min^{-1} .

7.3. HODNOTY STŘÍDAVÉHO PROUDU A NAPĚTÍ

V minulém článku jsme poznali, že střídavý proud i napětí mají v každém okamžiku jinou velikost, a proto u nich rozeznáváme:

a) *okamžité hodnoty*, tj. hodnoty odpovídající určitému okamžiku; označujeme je malými písmeny i , u ;

b) *maximální hodnoty*, tj. největší okamžité hodnoty; označujeme je I_m , U_m ;

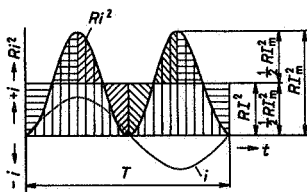
c) *efektivní hodnoty*; označujeme je I , U ;

d) *střední hodnoty*; označujeme je I_{AV} , U_{AV} .

Efektivní hodnoty jsou pro praxi nejdůležitější. Jsou to hodnoty naměřené běžnými ručkovými přístroji (elektromagnetickými, tepelnými). Tyto hodnoty jsou také vyznačeny na štítku elektrického stroje a přístroje.

Řekneme-li, že střídavé napětí je 220 V a střídavý proud je 10 A, jsou tím vždy míněny efektivní hodnoty.

Vzhledem k popisovaným změnám velikosti, průběhu a směru střídavého proudu a napětí se mění okamžitý výkon dodávaný do obvodu. Abychom určili celkovou práci vykonanou při průchodu střídavého proudu za určitou dobu, porovnáváme tuto práci se stejně velkou prací vykonanou při průchodu stejnosměrným proudem. Např. elektrickým vařičem procházel po dobu t jednou střídavý proud a podruhé (po stejnou dobu) stejnosměrný proud. Budou-li v obou případech tepelné účinky stejné, bude se práce při průchodu střídavého proudu rovnat práci při průchodu stejnosměrného proudu.



Obr. 152. Určení efektivní hodnoty střídavého proudu

Okamžitý výkon Ri^2 má průběh sinusový, s dvojnásobným kmitočtem a s osou posunutou nad časovou osu, neboť druhé mocniny záporných okamžitých hodnot proudu jsou kladné. Svisle vyšrafovaná plocha mezi křivkou Ri^2 a osou času (obr. 152) udává práci střídavého proudu za dobu T . Převedeme-li tuto plochu na obdélník s délkou odpovídající T , bude jeho šířka odpovídat stejnosměrnému proudu, který vykonává stejně velkou práci. Podle obr. 152 je

$$RI^2T = R \frac{I_m^2 T}{2}$$

Z toho

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \doteq 0,707 I_m$$

Hodnota proudu I se rovná efektivní hodnotě střídavého proudu. *Efektivní hodnota střídavého proudu je myšlená hodnota stejnosměrného proudu, který v rezistoru za stejnou dobu vyvolá stejné tepelné účinky jako uvažovaný střídavý proud.* Proto nerozlišujeme tepelné spotřebiče (např. vařiče, žárovky apod.) na střídavý a stejnosměrný proud.

Podobně bychom mohli odvodit efektivní hodnotu střídavého napětí

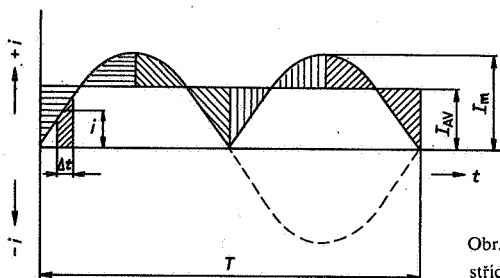
$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \doteq 0,707 U_m$$

Známe-li efektivní hodnoty, můžeme určit maximální hodnoty.

$$I_m = \sqrt{2} I \doteq 1,41 I$$

$$U_m = \sqrt{2} U \doteq 1,41 U$$

Střední hodnoty střídavého proudu nebo napětí mají význam pouze pro usměrněný střídavý proud a napětí.



Obr. 153. Určení střední hodnoty střídavého proudu

Na obr. 153 je znázorněn průběh usměrněného střídavého proudu. Ploška s rozměry $i \Delta t$ vyjadřuje náboj, který prošel obvodem za dobu Δt . Obsah plochy ohraničené oběma půlvlnami a časovou osou odpovídá náboji, jenž prošel obvodem za dobu T . Převedeme-li tuto plochu na obdélník se stejnou plochou, bude jeho šířka odpovídat střední hodnotě usměrněného střídavého proudu. Lze dokázat, že

$$I_{AV} = \frac{2}{\pi} I_m \doteq 0,637 I_m$$

Podobně

$$U_{AV} = \frac{2}{\pi} U_m \doteq 0,637 U_m$$

Střední hodnota střídavého proudu se rovná myšlené hodnotě stejnosměrného proudu, který má stejné chemické účinky jako uvažovaný střídavý usměrněný proud.

Příklad 56: Akumulátor se nabíjel usměrněným střídavým proudem 10 A po dobu 20 hodin. Vypočítejte, jaký elektrický náboj prošel akumulátorem. $I = 10 \text{ A}$, $t = 20 \text{ h}$,

$$Q = I_{AV} t$$

$$I_{AV} = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 \cdot I_m = 0,637 \cdot \sqrt{2} \cdot I = 0,3637 \cdot 1,41 \cdot 10 \text{ A} = 9 \text{ A} ;$$

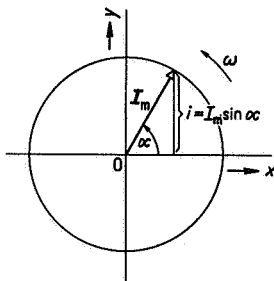
$$I_{AV} t = 9 \cdot 20 \text{ A} \cdot \text{h} = 180 \text{ A} \cdot \text{h}$$

Akumulátor přijal elektrický náboj $Q = 180 \text{ A} \cdot \text{h}$.

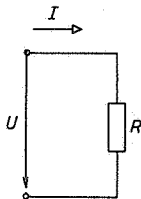
7.4. ZNÁZORŇOVÁNÍ SINUSOVÝCH VELIČIN FÁZORY

Při znázorňování veličin sinusového průběhu sinusoidami jsme poznali, že okamžité hodnoty sinusových veličin jsou určeny průměty otáčející se úsečky na svislou osu. Přitom délka úsečky se rovná maximální hodnotě (amplitudě) sinusové veličiny a úhel, který svírá rotující úsečka s kladným směrem osy x , určuje její okamžitou polohu (obr. 154).

Fázor se graficky znázorňuje úsečkou. Délka úsečky odpovídá maximální hodnotě (amplitudě) zobrazované veličiny (U_m, I_m). Směr fázoru je dán



Obr. 154. Znázornění střídavého proudu fázorem



Obr. 155. Rezistor v obvodu střídavého proudu

úhlem α , který svírá fázor s kladným směrem osy x . Orientace fázoru se vyznačuje šipkou na konci úsečky. Pro fázor napětí je šipka otevřená, pro fázor proudu uzavřená. Fázor se otáčí v kladném smyslu otáčení, tj. proti pohybu hodinových ručiček. Fázor má tedy vlastnosti vektoru, ale nemá fyzikální význam, jako má např. vektor síly nebo vektor intenzity magnetického pole. Fázor vyjadřuje sinusový průběh veličiny a jeho zavedení do znázorňování sinusových veličin umožňuje jednodušší početní i grafické řešení elektrických obvodů střídavého proudu (sinusového průběhu) podle pravidel platných pro počítání s vektory v rovině.

Obrazec znázorňující sinusové veličiny pomocí fázorů nazýváme fázorový diagram. Při jeho kreslení je třeba se řídit těmito zásadami:

a) Fázor se otáčí úhlovou rychlostí $\omega = 2\pi f$ proti směru hodinových ručiček; v diagramu je to vyznačeno šipkou ω .

b) Do jednoho diagramu můžeme zakreslit jen fázory těch sinusových veličin, které mají stejný kmitočet.

c) Fázory skládáme a rozkládáme podle stejných pravidel jako vektory, tj. skládáme a rozkládáme je pomocí rovnoběžníku nebo trojúhelníku.

d) Sčítat nebo odčítat můžeme fázory téže sinusové veličiny, např. fázory proudů, fázory napětí atd. Výslednici je zase sinusová veličina s tímž kmitočtem.

e) Fázorové diagramy lze kreslit také pro efektivní hodnoty sinusových veličin. Výsledná hodnota je potom také efektivní hodnota. *Maximální hodnotu z efektivní hodnoty dostaneme, znásobíme-li ji $\sqrt{2}$.*

f) Fázory kreslené nad osou x znázorňují kladné hodnoty, fázory kreslené pod osou x znázorňují hodnoty sinusových veličin opačného směru. Fázory ležící v ose x znamenají nulové okamžité hodnoty, kdežto fázory ležící v ose y odpovídají pro uvažovaný okamžik maximálním okamžitým hodnotám sinusových veličin.

g) Při psaní (rukou nebo strojem) označujeme fázory dohodnutou značkou – stříškou nad písmenem (např. $\hat{U}$, $\hat{I}$). V tisku je vyznačujeme poloúčným kurzívním gílem (***U***, ***I***).

7.5. REZISTOR V ELEKTRICKÉM OBVODU STŘÍDAVÉHO PROUDU

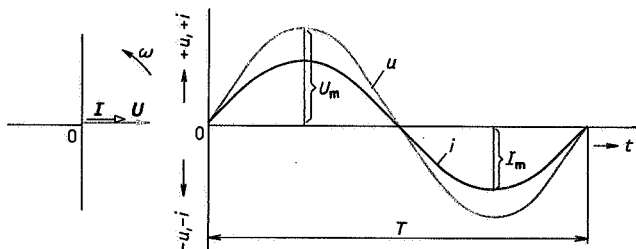
Na obr. 155 je schéma elektrického obvodu střídavého proudu, ve kterém je zapojen rezistor (spotřebič) s činným odporem. Činný odpor mají tepelné spotřebiče (např. vařič, žehlička, akumulární kamna), ale i žárovka. Jsou to spotřebiče, u nichž můžeme zanedbat indukčnost i kapacitu. Po při-

pojení na střídavé (sinusové) napětí prochází spotřebičem střídavý proud, jehož okamžitá hodnota podle Ohmova zákona je

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R}$$

$$\frac{U_m}{R} = I_m \quad \text{neboli} \quad i = I_m \sin \omega t$$

Střídavý proud i procházející rezistorem má také sinusový průběh, se stejným kmitočtem jako svorkové napětí. Snadno se o tom můžeme přesvědčit na osciloskopu.



Obr. 156. Znáznornění střídavého napětí a proudu v obvodu rezistorem

Osciloskop je přístroj, který po připojení k elektrickému obvodu zaznamená na obrazovce průběh proudu a napětí v závislosti na čase. Na obrazovce uvidíme dvě sinusoidy (obr. 156). Ze záznamu sinusoid je patrné, že střídavý proud i procházející rezistorem sleduje přesně změny svorkového střídavého napětí. Při maximální hodnotě napětí je i hodnota proudu maximální; pro $u = 0 \text{ V}$ je rovněž proud $i = 0 \text{ A}$. O takovémto proudu a napětí říkáme, že jsou ve fázi. Ve fázorovém diagramu znázorňujeme proud a napětí ve fázi podle obr. 156. Fázor proudu a fázor napětí kreslíme ve vodorovné ose. Oba fázory odpovídají efektivním hodnotám.

Dosadíme-li do vztahu

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

efektivní hodnoty, dostaneme

$$\sqrt{2} I = \frac{\sqrt{2} U}{R}$$

Z toho

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

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 s rezistorem s odporem R .

Zavedeme-li místo činného odporu vodivost (konduktanci)

$$G = \frac{1}{R}$$

dostaneme Ohmův zákon ve tvaru

$$I = GU$$

V obvodu s rezistorem s činným odporem se veškerá elektrická energie přeměňuje v teplo.

7.6. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Co je to perioda sinusového průběhu?
2. Co je to kmitočet (frekvence) veličiny sinusového průběhu?
3. Jak označujeme periodu a jak kmitočet?
4. Jak vypočítáme kmitočet, známe-li periodu?
5. Čemu se rovná úhlový kmitočet?
6. Jak převedeme radiány na stupně?
7. Co to je amplituda sinusového napětí?
8. Z které rovnice vypočítáme okamžitou hodnotu veličiny sinusového průběhu?
9. Vysvětlete vznik střídavého napětí a střídavého proudu podle obr. 150a až 150g.
10. Popište stručně alternátor.
11. Který vzorec platí pro výpočet maximální hodnoty (amplitudy) střídavého napětí?
12. Vyjádřete závislost mezi otáčkami rotoru alternátoru, počtem pólových dvojic rotoru a kmitočet indukovaného střídavého napětí.
13. Jaké hodnoty rozeznáváme u střídavého napětí a u střídavého proudu?
14. Co je efektivní hodnota střídavého proudu?
15. Jaký je vztah mezi maximální a efektivní hodnotou?

16. Co je to střední hodnota střídavého proudu?
17. Jaký je vztah mezi střední hodnotou a maximální hodnotou střídavého proudu?
18. Co je to fázor?
19. Jak zobrazujeme veličiny sinusového průběhu pomocí fázorů?
20. Vyjmenujte zásady pro kreslení fázorového diagramu.
21. Podle kterých pravidel sčítáme a odečítáme fázory?
22. Co to je činný odpor?
23. Co to znamená, když se řekne, že střídavý proud a střídavé napětí jsou ve fázi?
24. V jakém tvaru je Ohmův zákon pro jednoduchý elektrický obvod střídavého proudu s rezistorem s činným odporem?
25. Nakreslete fázorový diagram pro střídavý proud a napětí ve fázi.
26. Nakreslete průběh sinusového střídavého napětí podle obr. 149a pro maximální hodnotu 500 V. Měřítka napětí: 1 mm $\hat{=}$ 5 V, měřítka úhlů: 1 mm $\hat{=}$ 2°.
- Z grafu potom zjistěte:
- aa) okamžité hodnoty napětí pro úhly
- a) $\alpha_1 = 60^\circ$, b) $\alpha_2 = 180^\circ$, c) $\alpha_3 = 210^\circ$
- bb) úhly pro okamžité hodnoty střídavého napětí
- a) $u_1 = 433$ V, b) $u_2 = 0$, c) $u_3 = 250$ V.
27. Určete periodu T , je-li kmitočet sinusového průběhu
- a) $16\frac{2}{3}$ Hz, b) 50 Hz, c) 1 kHz.
28. Určete kmitočet, je-li perioda
- a) 0,0016 s, b) 0,025 s, c) 0,5 ms.
29. Vypočítejte úhlový kmitočet střídavého napětí s kmitočtem
- a) 50 Hz, b) 700 Hz, c) 5 kHz.
30. Určete ve stupních úhly
- a) $\alpha_1 = 3,5$ rad, b) $\alpha_2 = 1,85$ rad, c) $\alpha_3 = 6$ rad.
31. Kolik otáček musí vykonat rotor alternátoru, aby se ve vinutí statoru indukovalo napětí s kmitočtem 50 Hz, má-li rotor
- a) 8 polů, b) $p = 10$ a c) $2p = 32$.
32. Kolik polů má rotor alternátoru, jestliže se ve vinutí statoru indukuje napětí s kmitočtem 50 Hz a rotor má otáčky
- a) 500 min^{-1} , b) 375 min^{-1} , c) 200 min^{-1} ?
33. Vypočítejte maximální hodnotu střídavého napětí, je-li jeho efektivní hodnota
- a) 24 V b) 380 V, c) 22 kV.

34. Určete efektivní hodnotu střídavého napětí, je-li jeho maximální hodnota
a) 59,4 V, b) 707 V, c) 155 kV.
35. Určete maximální a střední hodnotu střídavého proudu, je-li jeho efektivní hodnota 15 A.
36. Rezistorem s činným odporem $5\ \Omega$ prochází střídavý proud 44 A. Určete
a) napětí na svorkách rezistoru a jeho maximální hodnotu,
b) maximální hodnotu proudu,
c) nakreslete fázorový diagram pro měřítko proudu $1\text{ mm} \cong 1\text{ A}$ a měřítko napětí $1\text{ mm} \cong 4\text{ V}$.
37. Určete činný odpor rezistoru, který je připojen na maximální střídavé napětí 170 V a jímž prochází maximální proud 5,65 A. Stanovte efektivní hodnoty napětí a proudu a nakreslete fázorový diagram.
Měřítka: $1\text{ mm} \cong 2\text{ V}$, $1\text{ cm} \cong 1\text{ A}$.

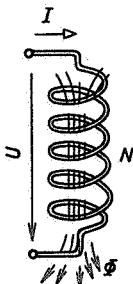
● 7.7. INDUKČNOST

7.7.1. Vlastní indukčnost

Připojíme-li cívku s N závitů ke zdroji střídavého napětí U (obr. 157), prochází jí střídavý proud I , který v ní vyvolá střídavý magnetický tok Φ . V závitcích cívky se bude indukovat napětí.

V odst. 6.13.1 jste poznali, že ve smyčce se indukuje napětí, které se podle Faradayova zákona rovná

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



Obr. 157. K výkladu vlastní indukčnosti – cívka v obvodu střídavého proudu

V cívce, která má N závitů, se indukuje N krát větší napětí, tj.

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

Indukované napětí je podle tohoto zákona úměrné počtu závitů N a rovnoměrné změně magnetického toku $\Delta \Phi / \Delta t$. Indukované napětí působí vždy proti změně, která jej vyvolala. Při zvětšování proudu působí indukované napětí proti připojenému svorkovému napětí a při klesání proudu působí ve směru svorkového napětí.

Protože je střídavý magnetický tok Φ úměrný střídavému proudu I , je také změna magnetického toku úměrná změně proudu $\Delta I / \Delta t$, a tedy i napětí indukované tokem je úměrné změně střídavého proudu. Vlastní indukci charakterizuje fyzikální veličina zvaná indukčnost. Pro indukované napětí platí vztah

$$u = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Z toho

$$L = \frac{u}{\frac{\Delta I}{\Delta t}}$$

vyvozíme jednotku indukčnosti henry (H).

$$[L] = \frac{V}{\frac{A}{s}} = \frac{V \cdot s}{A} = \frac{Wb}{A} = H$$

Cívka, kterou prochází střídavý proud, má indukčnost jeden henry, jestliže se v ní indukuje napětí jednoho voltu při rovnoměrné změně proudu jeden ampér za sekundu.

Magnetický spřažený tok cívky $\psi = N\Phi$ je u cívky bez jádra přímo úměrný proudu procházejícímu cívkou. Grafické zobrazení tohoto vztahu je na obr. 158. Vyšrafovaná plocha se rovná energii magnetického pole v cívce, neboť platí

$$E_m = \frac{1}{2} \psi I$$

Jednotku energie magnetického pole joule (J) odvodíme takto:

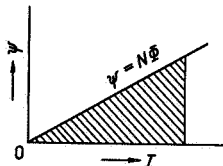
$$[E_m] = Wb \cdot A = V \cdot s \cdot A = W \cdot s = J = \text{joule}$$

Indukčnost můžeme také definovat staticky, tj. magnetickým spřaženým tokem, který je v cívce vyvolán proudem 1 A. Vyjádřeno matematicky

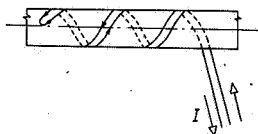
$$L = \frac{\psi}{I}$$

Dosadíme-li do vztahu pro výpočet energie magnetického pole za $\psi = LI$, dostaneme

$$E_m = \frac{1}{2}LI^2$$



Obr. 158. Závislost spřaženého magnetického toku cívky na proudu



Obr. 159. Bifilární vinutí cívky

Odvozený vztah použijeme pro určení výsledné indukčnosti několika cívek zařazených do série. Cívky s jádrem z feromagnetického materiálu mají větší indukčnost než stejné cívky bez jádra, protože se v nich při stejném proudu vyvolá větší magnetický tok. Potřebujeme-li cívku bez indukčnosti, navineme ji tzv. bifilárně, tj. současně dvěma vodiči (obr. 159). Po navinutí oba vodiče na jednom konci spojíme a druhé dva konce tvoří přívody. Tím dosáhneme toho, že vždy ve dvou společně navinutých vodičích prochází proud opačného směru, takže jejich magnetická pole působí proti sobě a navzájem se ruší. Ve vodičích se neindukuje žádné napětí.

Příklad 57: Jak velká je indukčnost cívky L , ve které se při rovnoměrné změně proudu z 8 A na 3 A za 2 sekundy indukuje napětí 5 V?

$u = 5 \text{ V}$, $t = 2 \text{ s}$, $I_1 = 8 \text{ A}$, $I_2 = 3 \text{ A}$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{8 - 3}{2} \text{ A} \cdot \text{s}^{-1} = 2,5 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$L = \frac{u}{\frac{\Delta I}{\Delta t}} = \frac{5}{2,5} \text{ H} = 2 \text{ H}$$

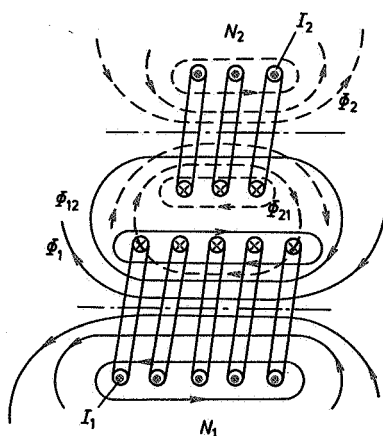
Cívka má indukčnost 2 H.

7.7.2. Vzájemná indukčnost

Na obr. 160 jsou dvě cívky. Jedna cívka má N_1 závitů a prochází ji střídavý proud I_1 , který v ní vyvolá magnetický tok Φ_1 . Část tohoto toku Φ_{12} zasahuje do druhé cívky, která má N_2 závitů. Protože střídavý proud I_1 je časově proměnný, je časově proměnný i magnetický tok Φ_1 , a tedy i tok Φ_{12} . To má za následek, že se v cívce s N_2 závity indukuje napětí

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

kde M je tzv. vzájemná indukčnost, jejíž jednotkou je také henry.



Obr. 160. Dvě cívky sprzęžené magnetickým tokem

Dvě cívky (obvody) mají vzájemnou indukčnost jeden henry, jestliže se v jedné (pasivní) cívce indukuje napětí jeden volt při rovnoměrné změně proudu v druhé (aktivní) cívce o jeden ampér za jednu sekundu. Vzájemná indukčnost dvou cívek závisí pouze na geometrickém uspořádání obou 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 .

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

Jsou-li dvě cívky na společném jádru z feromagnetického materiálu, lze předpokládat, že se vzniklý magnetický tok bude uzavírat pouze v jádru,

takže vzájemná indukčnost bude záviset pouze na vlastní indukčnosti jednotlivých cívek (L_1, L_2). Potom platí

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

kde M je geometrický průměr L_1 a L_2 .

Vzniknou-li rozptylové toky, je vzájemná indukčnost menší.

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

kde κ je *činitel vazby*. Činitel vazby má velikost od 0 do 1. Je-li $\kappa = 1$, je *vazba těsná*, pro $\kappa = 0$ je *vazba volná*.

7.8. ŘAZENÍ CÍVEK

7.8.1. Sériové řazení cívek

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 (obr. 161), je vzájemná indukčnost $M = 0$ a energie magnetického pole obou cívek je

$$E_m = \frac{1}{2} L_1 I^2 + \frac{1}{2} L_2 I^2 = \frac{1}{2} L I^2$$

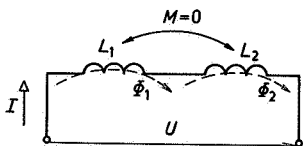
Z toho

$$L = L_1 + L_2$$

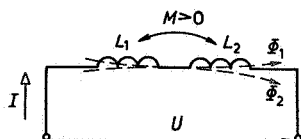
Cívky se chovají jako jedna cívka s indukčností L . Je-li *zařazeno do série několik cívek* a není-li žádná dvojice cívek vázána vzájemnou indukčností, je *výsledná indukčnost cívek*

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

Odvozený vztah je analogický vztahu pro rezistory zařazené do série.



Obr. 161. Dvě cívky s indukčnostmi L_1 a L_2 , zařazené do série, při vzájemné indukčnosti $M = 0$



Obr. 162. Dvě cívky s indukčnostmi L_1 a L_2 , zařazené do série, vázané vzájemnou indukčností M při působení magnetických toků ve stejném smyslu

Jsou-li dvě cívky s indukčnostmi L_1 a L_2 zařazeny do série tak, že magnetické toky vyvolané proudem v obou cívkách mají stejný směr a vzájemně se protínají (obr. 162), je vzájemná indukčnost $M > 0$ H a energie magnetického pole obou cívek je

$$E_m = \frac{1}{2}L_1 I^2 + \frac{1}{2}L_2 I^2 + 2 \cdot \frac{1}{2}MI^2 = \frac{1}{2}LI^2$$

Z toho

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

Zařadíme-li dvě cívky s indukčnostmi L_1 a L_2 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 (obr. 163), je vzájemná indukčnost $M > 0$ H a energie magnetického pole obou cívek je

$$E_m = \frac{1}{2}L_1 I^2 + \frac{1}{2}L_2 I^2 - 2 \cdot \frac{1}{2}MI^2 = LI^2$$

Výsledná indukčnost obou cívek je

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

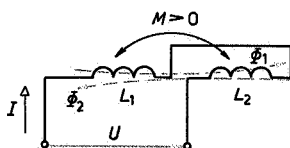
7.8.2. Paralelní řazení cívek

Při paralelním zařazení dvou cívek (obr. 164) s indukčnostmi L_1 a L_2 se v obou cívkách indukuje stejně velké napětí jenom tehdy, je-li jejich činný odpor zanedbatelný. Potom platí

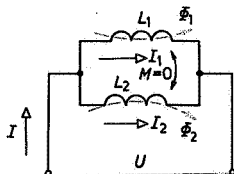
$$u = L_1 \frac{\Delta i_1}{\Delta t} = L_2 \frac{\Delta i_2}{\Delta t} = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

kde L je výsledná indukčnost,

i výsledný střídavý proud paralelně zařazených cívek.



Obr. 163. Dvě cívky s indukčnostmi L_1 a L_2 , zařazené do série, vázané vzájemnou indukčností M při působení magnetických toků proti sobě



Obr. 164. Dvě cívky s indukčnostmi L_1 a L_2 , zařazené paralelně, při vzájemné indukčnosti $M = 0$

Pro výsledný proud platí

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{\Delta i_1}{\Delta t} + \frac{\Delta i_2}{\Delta t}$$

neboli

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

Je tedy

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

Pro dvě cívky platí

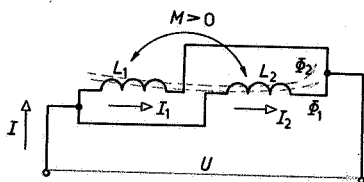
$$L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$$

Tento vztah je analogický vztahu pro dva paralelně zařazené rezistory, a platí za uvedeného předpokladu.

Jsou-li dvě cívky s indukčnostmi L_1 a L_2 , u nichž můžeme zanedbat jejich činný odpor, zařazené paralelně tak, že magnetické toky mají souhlasný směr a vzájemně se protínají (obr. 165), je vzájemná indukčnost $M > 0$ H. Výslednou indukčnost dvou cívek pak určíme z rovnice

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

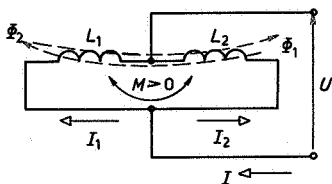
Jsou-li dvě cívky se zanedbatelným činným odporem a indukčnostmi L_1 a L_2 zařazené paralelně tak, že magnetické toky působí proti sobě a obě



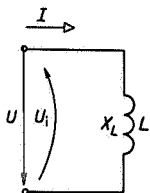
Obr. 165. Dvě cívky s indukčnostmi L_1 a L_2 , zapojené paralelně, vázané vzájemnou indukčností M při působení magnetických toků ve stejném smyslu

cívky jsou jimi protínány (obr. 166), vypočítáme výslednou indukčnost dvou cívek z rovnice

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



Obr. 166. Dvě cívky s indukčnostmi L_1 a L_2 , zapojené paralelně, vázané vzájemnou indukčností M při působení magnetických toků proti sobě



Obr. 167. Ideální cívka v obvodu střídavého proudu

U cívek, u kterých nelze zanedbat jejich činné odpory a které jsou paralelně zařazeny, nemůžeme výslednou indukčnost stanovit podle uvedených vztahů. Při řešení obvodů střídavého proudu počítáme u cívek s impedancemi a výslednou indukčnost určíme z výsledné impedance náhradní cívky.

7.9. CÍVKA V ELEKTRICKÉM OBVODU STŘÍDAVÉHO PROUDU

Na obr. 167 je schéma obvodu s ideální cívkou, u které je činný odpor vodiče tak malý, že je zanedbatelný ($R = 0 \Omega$). Proud I procházející cívkou vyvolá v cívce magnetický tok Φ , který je časově proměnný a je ve fázi s proudem. Je-li proud nulový, je i magnetický tok nulový; je-li proud maximální, je magnetický tok také maximální.

Časově proměnný magnetický tok indukuje v závitech cívky napětí u_i , které je maximální při maximální změně magnetického toku, tj. v okamžiku, když magnetický tok má nulovou hodnotu. V tom okamžiku se jeho kladná hodnota mění na hodnotu zápornou nebo naopak. V okamžiku, kdy má magnetický tok maximální hodnotu, je jeho změna nulová, a proto se indukované napětí rovná také nule (obr. 168). Protože má magnetický tok sinusový průběh, probíhá i indukované napětí podle sinusoidy. Jeho směr určíme podle Lencova pravidla. Zvětšuje-li se magnetický tok v kladném směru, brání indukované napětí zvětšování magnetického toku, a má proto

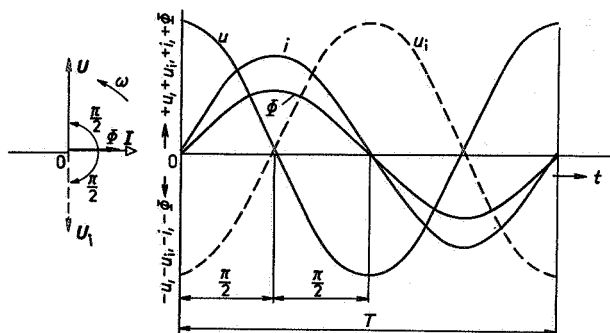
zápornou hodnotu (obr. 168). Zmenšuje-li se magnetický tok v kladném směru, působí indukované napětí stejným směrem, takže má kladnou hodnotu. Průběh indukovaného napětí během druhé půlviny magnetického toku je obdobný. Aby cívkou procházel proud i , musí napětí zdroje u potlačit indukované napětí u_i . Průběh indukovaného napětí je zakreslen na obr. 168. Na obr. 168 je fázorový diagram pro obvod s ideální cívkou s indukčností L , ze kterého je vidět, že napětí zdroje předbíhá proud o 90° , tj. o úhel $\varphi = \pi/2$, a je s indukovaným napětím v protifázi, tzn. předbíhá jej o úhel π .

V článku 7.2 jsme odvodili, že maximální indukované napětí je

$$U_m = \omega N \Phi_m$$

V odst. 7.1 bylo odvozeno, že

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N \Phi_m}{I_m}$$



Obr. 168. Grafické znázornění průběhu střídavého napětí a střídavého proudu v obvodu s ideální cívkou

Můžeme tedy napsat

$$N \Phi_m = L I_m$$

a po dosazení do rovnice pro U_m dostaneme

$$U_m = \omega L I_m$$

Tuto rovnici můžeme také napsat pro efektivní hodnoty

$$U \sqrt{2} = \omega L I \sqrt{2}$$

Proud procházející cívkou je potom

$$I = \frac{U}{\omega L}$$

V této rovnici ωL označujeme X_L a je to tzv. *indukční reaktance*, kterou měříme v ohmech. Proto píšeme Ohmův zákon pro elektrický obvod s cívkou s indukčností L ve tvaru

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

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

Převrácená hodnota indukční reaktance

$$\frac{1}{X_L} = B_L$$

se nazývá indukční jalová vodivost (indukční susceptance) a její jednotkou je siemens (S).

Upozorňujeme, že obdoba Ohmova zákona je zde pouze formální a ne fyzikální. Indukční reaktance není činný odpor, ale je to fyzikální veličina, kterou matematicky vyjadřujeme vlastní indukční účinky cívky. Ohmův zákon platí jen pro maximální a efektivní hodnoty, nikoliv pro okamžité hodnoty, jako je tomu v obvodu s činným odporem.

Příklad 58: Jak velká je indukčnost cívky zapojené v elektrickém obvodu, který je připojen na střídavé napětí 220 V, 50 Hz, a jímž prochází proud 1 A.
 $U = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $I = 1 \text{ A}$

Indukční reaktance

$$X_L = \frac{U}{I} = \frac{220}{1} \Omega = 220 \Omega$$

Indukčnost

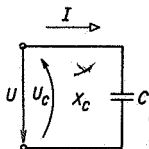
$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{220}{2\pi \cdot 50} \text{ H} = 0,7 \text{ H}$$

Indukčnost cívky je 0,7 H.

7.10. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Co se děje v cívce, kterou prochází střídavý proud?
2. Co je to vlastní indukčnost a jaká je její jednotka?
3. Kdy má cívka indukčnost 1 H?
4. Která cívka ze dvou stejných cívek má větší indukčnost — cívka s jádrem nebo bez jádra? Proč?
5. Co je to bifilární vinutí cívky a jaká je jeho výhoda?
6. Kdy nastává vzájemná indukčnost a jaká je její jednotka?
7. Kdy mají dvě cívky vzájemnou indukčnost 1 H?
8. Jaký vztah platí pro vzájemnou indukčnost dvou cívek s indukčnostmi L_1 a L_2 ?
9. Co vyjadřuje činitel vazby? Jakou může mít hodnotu?
10. Jak vypočítáme výslednou indukčnost cívek řazených do série, je-li vzájemná indukčnost 0 H?
11. Jak vypočítáme výslednou indukčnost dvou cívek řazených do série, je-li jejich vzájemná indukčnost větší než 0 H a působí-li magnetické toky stejným směrem?
12. Jak vypočítáme výslednou indukčnost dvou cívek řazených do série, je-li jejich vzájemná indukčnost větší než 0 H a působí-li magnetické toky proti sobě?
13. Jaký vztah platí pro dvě cívky s indukčnostmi L_1 a L_2 řazené paralelně, je-li vzájemná indukčnost 0 H?
14. Jaký je vztah mezi svorkovým napětím a střídavým proudem v obvodu, ve kterém je zapojena ideální cívka?
15. Jaký je fázový posun mezi proudem a svorkovým střídavým napětím v obvodu s ideální cívkou?
16. Čemu se rovná indukční reaktance a jaká je její jednotka?
17. Jak se mění indukční reaktance, když se kmitočet napětí zvyšuje nebo snižuje? Zdůvodněte!
18. Co je to jalová indukční vodivost a jaká je její jednotka?
19. Jak velká je indukčnost cívky, ve které se indukuje napětí 63 V při rovnoměrné změně proudu z 10 A na 1 A za 0,004 s?
20. Určete vzájemnou indukčnost dvou cívek, z nichž jedna má indukčnost 50 mH a druhá má indukčnost 70 mH, je-li činitel vazby 0,55.
21. Určete činitele vazby dvou cívek, z nichž první má indukčnost 0,03 H a druhá 0,06 H a jejichž vzájemná indukčnost je 21 mH.
22. Dvě cívky mají vzájemnou indukčnost 50 mH. Určete napětí v druhé cívce, zvětší-li se v první cívce proud rovnoměrně z 2 A na 8 A za 5 ms.

23. Jak velkou indukční reaktanci má cívka s indukčností 15 mH při kmitočtu
a) 50 Hz, b) 700 Hz, c) 3 kHz?
24. Určete indukčnost pro indukční reaktanci 15 Ω při kmitočtu
a) 50 Hz, b) 900 Hz, c) 3 kHz.
25. Určete, při kterém kmitočtu má cívka s indukčností 0,03 H indukční reaktanci
a) 9,42 Ω , b) 150,7 Ω , c) 565,2 Ω .
26. Jak velká je indukčnost cívky, kterou prochází proud 1,4 A po připojení na svorkové napětí 220 V, 50 Hz?
27. Cívkou s indukčností 220 mH prochází proud 159 mA při napětí 1 kV. Určete, jaký je kmitočet střídavého proudu.
28. Jak velká je indukční vodivost (susceptance) cívky s indukčností 30 mH při kmitočtu 50 Hz?



Obr. 169. Ideální kondenzátor
v obvodu střídavého proudu

7.11. KONDENZÁTOR V ELEKTRICKÉM OBVODU STŘÍDAVÉHO PROUDU

Na obr. 169 je schéma obvodu s ideálním kondenzátorem, tj. s kondenzátorem, který má dokonale nevodivé dielektrikum, takže má pouze kapacitu. Po připojení obvodu na střídavé sinusové napětí se bude kondenzátor střídavě nabíjet a vybíjet a jeho okamžitý náboj se v každém okamžiku změní. Okamžitý náboj je dán vztahem

$$q = uC$$

Zvyšuje-li se napětí v první čtvrtině periody (obr. 170) z nuly na maximální hodnotu, kondenzátor se nabíjí a jeho náboj dosáhne při napětí U_m největší hodnoty, při níž je kondenzátor nabit. Ve druhé čtvrtině periody klesá napětí u na nulovou hodnotu a kondenzátor se vybíjí. Ve třetí a čtvrté čtvrtině periody se děj opakuje, ale proud prochází opačně. Při nabíjení a vybíjení kondenzátoru prochází obvodem střídavý proud, který má sinusový průběh. Je maximální v okamžiku, když napětí u prochází právě nulovou hodnotou, tj. v okamžiku, ve kterém se kondenzátor začíná nabíjet.

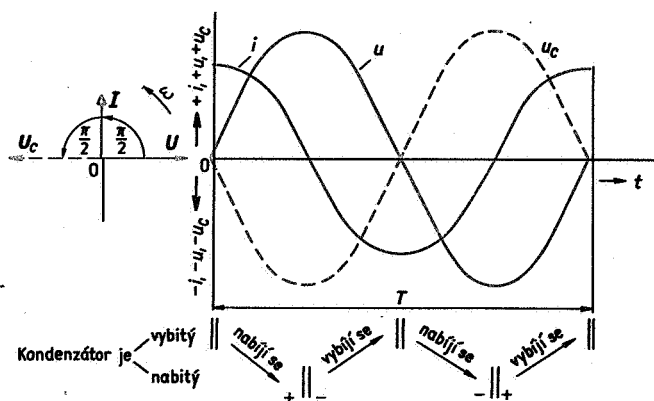
Nulovou hodnotu má proud, je-li napětí $u = U_m$. Kondenzátor je v tomto okamžiku nabit. Nabíjení a vybíjení kondenzátoru trvá přesně čtvrtinu periody, to znamená, že přívody ke kondenzátoru prochází střídavý proud.

Na začátku nabíjení se svorkové napětí zdroje i napětí na kondenzátoru rovná nule. Během nabíjení kondenzátoru se na něm napětí zvyšuje a v okamžiku, kdy je kondenzátor nabit, dosáhne maximální hodnoty. Napětí na kondenzátoru působí proti svorkovému napětí, je v protifázi. Jakmile začne svorkové napětí klesat, kondenzátor se vybíjí, napětí na něm se také snižuje na nulovou hodnotu a pro $u = 0$ je kondenzátor zcela vybit. Průběh napětí na kondenzátoru je sinusový, protože napětí je vyvoláno sinusovým proudem.

Na obr. 170 je fázorový diagram, podle kterého proud v obvodu s kapacitou předbíhá svorkové napětí zdroje o 90° , tj. o úhel $\varphi = \pi/2$. Časový průběh proudu, svorkového napětí a napětí na kondenzátoru je na obr. 170.

Střídavý proud v obvodu s kondenzátorem je tím větší, čím větší je kapacita, čím vyšší je kmitočet svorkového napětí (tj. čím rychleji se střídá nabíjení s vybíjením kondenzátoru) a čím větší je maximální hodnota (amplituda) svorkového napětí. Maximální hodnota nabíjecího proudu je tedy

$$I_m = \omega U_m C$$



Obr. 170. Grafické znázornění průběhu střídavého napětí a střídavého proudu v obvodu s ideálním kondenzátorem s kapacitou C

Pro efektivní hodnotu proudu, který prochází obvodem, platí

$$I \sqrt{2} = \omega U \sqrt{2} \cdot C$$

$$I = \omega U C$$

Porovnáme-li tento vztah s Ohmovým zákonem pro obvod s cívkou

$$I_L = \frac{U}{X_L} = B_L U$$

vidíme, že podobně jako $I_L = B_L U$, můžeme psát $I_C = B_C U$. Výraz $\omega C = B_C$ je jalová kapacitní vodivost neboli kapacitní susceptance. Převrácená hodnota jalové kapacitní vodivosti je kapacitní reaktance

$$\left| \frac{1}{B_C} = X_C = \frac{1}{\omega C} \quad \text{takže} \quad I_C = \frac{U}{X_C} \right.$$

Jednotkou kapacitní reaktance je ohm (Ω); odvodíme ji takto:

$$[X_C] = \frac{1}{\frac{1}{\text{s}} \cdot \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}}} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$$

Jednotkou jalové kapacitní vodivosti je siemens (S); odvodíme ji takto:

$$[B_C] = \frac{1}{\text{s}} \cdot \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}} = \frac{\text{A}}{\text{V}} = \text{S}$$

Uvedený tvar Ohmova zákona platí pouze pro maximální a efektivní hodnoty. Neplatí (stejně jako při indukčnosti) pro okamžité hodnoty.

Příklad 59: Jak velká je kapacita kondenzátoru zapojeného v obvodu, prochází-li obvodem po připojení na napětí 220 V s kmitočtem 50 Hz proud 1,46 A.

$$U = 220 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}, I = 1,46 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{U}{I} = \frac{220}{1,46} \Omega = 150,6 \Omega \approx 150 \Omega$$

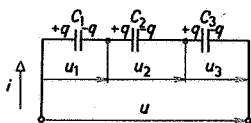
$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 150} \text{ F} = 0,000\,021 \text{ F} = 21 \mu\text{F}$$

Kapacita kondenzátoru je 21 μF .

7.12. ŘAZENÍ KONDENZÁTORŮ

Kondenzátory se vyrábějí s kapacitami a jmenovitým napětím danými normami. V praxi často potřebujeme kapacitu, která není v normalizované řadě. Získáme ji vhodným řazením kondenzátorů.

7.12.1. Sériové řazení kondenzátorů



Obr. 171. Sériové řazení kondenzátorů

Schéma sériového řazení kondenzátorů je na obr. 171. Po připojení ke zdroji střídavého napětí (jak jsme poznali v předcházejícím článku) se kondenzátory střídavě nabíjejí a vybíjejí. V určitém okamžiku má napětí hodnotu u a přívody ke kondenzátorům projde proud i , který přenese na elektrody kondenzátorů náboj q . Na jedné elektrodě se nahromadí náboj $+q$, na druhé elektrodě, která je oddělena dielektrikem, se nahromadí náboj $-q$. To se opakuje tolikrát, kolik kondenzátorů je řazeno do série. Při různých kapacitách je na kondenzátorech různé okamžité napětí, ale jejich součet se musí rovnat okamžitému napětí zdroje.

$$u = u_1 + u_2 + u_3$$

Vyjádříme-li napětí pomocí kapacity a náboje, platí

$$u = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

$$u = q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

$$u = q \frac{1}{C}$$

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

kde C je výsledná kapacita kondenzátoru, který lze nahradit kondenzátory řazenými do série.

Při řazení kondenzátorů do série se rovná převrácená hodnota výsledné kapacity součtu převrácených hodnot kapacit jednotlivých kondenzátorů. Výsledná kapacita je vždy menší než kapacita nejmenšího z kondenzátorů řazených do série.

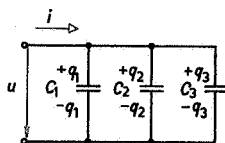
Pro dva kondenzátory řazené do série platí

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

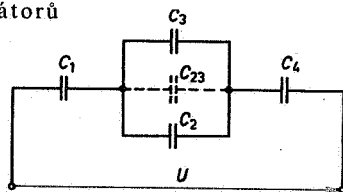
Pro řazení kondenzátorů do série platí vzorce analogické vzorcům pro rezistory řazené paralelně.

Kondenzátory řadíme do série, potřebujeme-li kapacitu zmenšit nebo je-li jmenovité napětí kondenzátoru menší než provozní; toto zapojení lze použít i jako dělič napětí.

7.12.2. Paralelní řazení kondenzátorů



Obr. 172. Paralelní řazení kondenzátorů



Obr. 173. Sériově paralelní řazení kondenzátorů

Při paralelním řazení kondenzátorů (obr. 172) je na všech kondenzátorech stejné okamžité střídavé napětí. Jsou-li kapacity kondenzátorů různé, je na každém z nich také různý okamžitý náboj, ale součet těchto nábojů se rovná celkovému náboji q .

$$q = q_1 + q_2 + q_3$$

Vyjádříme-li náboj pomocí kapacity a napětí, platí

$$q = uC_1 + uC_2 + uC_3$$

$$q = u(C_1 + C_2 + C_3)$$

$$q = uC$$

Výsledná kapacita kondenzátorů řazených paralelně

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

Při paralelním řazení kondenzátorů se výsledná kapacita rovná součtu kapacit jednotlivých kondenzátorů; platí zde analogie s rezistory řazenými do série.

Při paralelním řazení kondenzátorů kapacitu zvětšujeme, ale jmenovité napětí kondenzátorů se musí rovnat provoznímu napětí.

7.12.3. Sériově paralelní řazení kondenzátorů

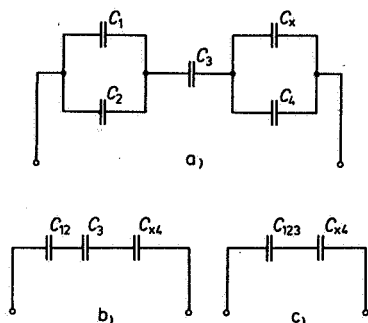
Sériově paralelní řazení kondenzátorů je řazení smíšené. Jsou v něm řazeny kondenzátory paralelně i v sérii (obr. 173). Výslednou kapacitu určíme tak, že paralelní kondenzátory nahradíme kondenzátory s dílčími kapacitami, a tím daný obvod převedeme na obvod, ve kterém jsou kondenzátory řazeny pouze do série

$$C_{23} = C_2 + C_3$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{23}} + \frac{1}{C_4}$$

Toto řazení kondenzátorů používáme, potřebujeme-li zmenšit kapacitu a je-li jmenovité napětí kondenzátorů nižší, než je napětí provozní.

- ▼ **Příklad 60:** Určete kapacitu kondenzátoru C_x zapojeného podle schématu na obr. 174a tak, aby výsledná kapacita byla $C = 4 \mu\text{F}$. Kapacity kondenzátorů jsou: $C_1 = 5 \mu\text{F}$, $C_2 = 10 \mu\text{F}$, $C_3 = 10 \mu\text{F}$, $C_4 = 5 \mu\text{F}$.



Obr. 174. Schéma zapojení k příkladu 60

Schéma zapojení zjednodušíme na zapojení podle obr. 174b a potom podle obr. 174c.

$$C_{12} = C_1 + C_2$$

$$C_{12} = (5 + 10) \mu\text{F} = 15 \mu\text{F}$$

$$C_{123} = \frac{C_{12} C_3}{C_{12} + C_3}$$

$$C_{123} = \frac{15 \cdot 10}{15 + 10} \mu\text{F} = 6 \mu\text{F}$$

Výsledná kapacita

$$C = \frac{C_{123} C_{x4}}{C_{123} + C_{x4}}$$

Po dosazení za C a C_{123} dostaneme

$$4 \mu\text{F} = \frac{6 \mu\text{F} \cdot C_{x4}}{6 \mu\text{F} + C_{x4}}$$

$$24 \mu\text{F} + 4 \mu\text{F} \cdot C_{x4} = 6 \mu\text{F} \cdot C_{x4}$$

$$24 \mu\text{F} = 2 \mu\text{F} \cdot C_{x4}$$

$$C_{x4} = 12 \mu\text{F}$$

a tedy

$$C_x = C_{x4} - C_4$$

$$C_x = (12 - 5) \mu\text{F} = 7 \mu\text{F}$$

Zkouška podle schématu (obr. 174b)

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_{x4}}$$

$$\frac{1}{C} = \left(\frac{1}{15} + \frac{1}{10} + \frac{1}{12} \right) \mu\text{F}^{-1}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{4 + 6 + 5}{60} \mu\text{F}^{-1} = \frac{15}{60} \mu\text{F}^{-1}$$

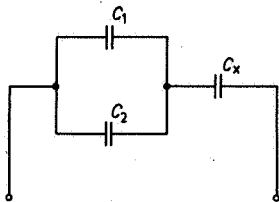
$$C = \frac{60}{15} \mu\text{F} = 4 \mu\text{F}$$

▲ Aby výsledná kapacita C byla $4 \mu\text{F}$, musí mít kondenzátor C_x kapacitu $7 \mu\text{F}$.

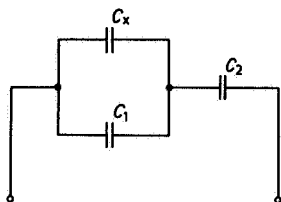
7.13. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Vysvětlete, jak působí kondenzátor v obvodu střídavého proudu.
2. Jak určíme proud v obvodu s kapacitou?
3. Jaký vztah platí pro kapacitní reaktanci, kterou představuje kondenzátor s kapacitou C po připojení na napětí s kmitočtem f ?
4. Jaká je jednotka kapacitní reaktance?
5. Jak se změní kapacitní reaktance, jestliže se kmitočet napětí zvyšuje nebo snižuje? Zdůvodněte!
6. Jaký je fázový posun mezi napětím zdroje a proudem v obvodu s ideálním kondenzátorem?
7. Co je to jalová kapacitní vodivost a jaká je její jednotka?
8. Jak určíme výslednou kapacitu několika kondenzátorů řazených do série, se stejnými a různými kapacitami?
9. Čemu se rovná výsledná kapacita dvou kondenzátorů řazených do série, se stejnými a různými kapacitami?
10. Jak určíme výslednou kapacitu několika kondenzátorů řazených paralelně, se stejnými a různými kapacitami?
11. vysvětlete, jak postupujeme při výpočtu výsledné kapacity obvodu, ve kterém je několik kondenzátorů řazeno sériově paralelně.
12. Kdy používáme sériové řazení kondenzátorů?
13. Kdy používáme paralelní řazení kondenzátorů?
14. Kdy používáme sériově paralelní řazení kondenzátorů?
15. Jak velká je kapacitní reaktance kondenzátoru s kapacitou
a) $318,4 \mu\text{F}$, b) $63,66 \mu\text{F}$, c) $21,23 \mu\text{F}$, při kmitočtu 50 Hz?
16. Jak velkou kapacitu musí mít kondenzátor, abychom při kmitočtu 50 Hz dostali kapacitní reaktanci
a) 15Ω , b) 300Ω , c) $1 \text{ k}\Omega$?
17. Určete kmitočet střídavého napětí, při kterém má kondenzátor s kapacitou $32 \mu\text{F}$ kapacitní reaktanci
a) 30Ω , b) $99,5 \Omega$, c) 130Ω .
18. Kondenzátor s kapacitou $32 \mu\text{F}$ je připojen na střídavé napětí 25 V a prochází jím proud 5 A. Jaký je kmitočet tohoto střídavého napětí?
19. Jak velká je kapacitní vodivost (susceptance) pro kapacitu $16 \mu\text{F}$ při kmitočtu 50 Hz.
20. Jak velký střídavý proud prochází obvodem, je-li v něm zapojen kondenzátor s kapacitou $30 \mu\text{F}$ při napětí 220 V, 50 Hz.

21. Kondenzátory s kapacitami $C_1 = 4 \mu\text{F}$, $C_2 = 5 \mu\text{F}$, $C_3 = 6 \mu\text{F}$ jsou řazeny
 a) všechny paralelně, b) všechny do série, c) C_1 a C_2 paralelně a C_3 k nim do série. Nakreslete schéma zapojení a vypočítejte výslednou kapacitu.
22. Určete kapacitu C_x ve schématu na obr. 175 tak, aby při hodnotách $C_1 = 8 \mu\text{F}$, $C_2 = 12 \mu\text{F}$ byla výsledná kapacita $C = 4 \mu\text{F}$.
23. Určete kapacitu C_x kondenzátoru, který je třeba zapojit do obvodu podle schématu na obr. 176, aby výsledná kapacita byla $C = 0,15 \text{ pF}$. Kapacity kondenzátorů jsou $C_1 = 0,5 \text{ pF}$, $C_2 = 0,2 \text{ pF}$.



Obr. 175. Schéma zapojení k cvičení 22 z čl. 7.13.



Obr. 176. Schéma zapojení k cvičení 23 z čl. 7.13.

7.14. SLOŽENÉ OBVODY STŘÍDAVÉHO PROUDU

Rezistor, cívk a kondenzátor můžeme řadit sériově (za sebou) nebo paralelně (vedle sebe) nebo sériově paralelně (kombinovaně). Tak vznikají složené obvody. Při řešení těchto obvodů zachováváme určitý postup, který vysvětlíme v dalším článku.

7.14.1. Skutečná cívka v elektrickém obvodu střídavého proudu

Každá cívka (kromě bifilární) má indukčnost, a protože je navinuta z drátu, má i činný odpor. Představuje tedy obvod složený z ideální cívky s indukčností a z rezistoru s činným odporem, řazeného v sérii. Schéma obvodu je na obr. 177 a při řešení postupujeme takto:

a) Do schématu vyznačíme zvolený kladný směr svorkového napětí U . Tím je dán kladný směr proudu I , úbytek napětí na rezistoru U_R a na cívce U_L .

b) Potom nakreslíme fázorový diagram (obr. 178) pro efektivní hodnoty. Začínáme jej kreslit od řídícího fázoru, tj. od fázoru veličiny, která je spo-

lečná všem prvkům zapojeným v obvodu. Při sériovém zapojení prvků je to *fázor proudu*, neboť proud prochází jak rezistorem, tak i cívkou. Délku fázoru proudu volíme libovolnou a fázor nakreslíme v kladném směru vodorovné osy. Úbytek napětí U_R je ve fázi s proudem, a proto fázor U_R nakreslíme také v kladném směru vodorovné osy. Úbytek napětí na cívce U_L předbíhá proud o úhel 90° (tj. $\pi/2$), a fázor U_L tedy nakreslíme do kladného směru svislé osy. Fázor svorkového napětí dostaneme geometrickým sečtením fázoru U_R a U_L .

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_R + \mathbf{U}_L$$

c) Po nakreslení fázorového diagramu řešíme obvod matematicky. Fázory U_R a U_L svírají úhel 90° , takže svorkové napětí U můžeme vyjádřit pomocí Pythagorovy věty

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

Dosadíme-li za $U_R = IR$ a za $U_L = IX_L$, dostaneme

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

Výraz s odmocninou je *impedance* a označuje se Z . Jednotkou impedance je ohm.

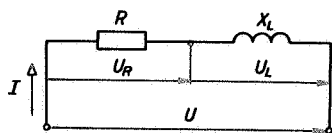
$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Velikost svorkového napětí je potom dána vztahem

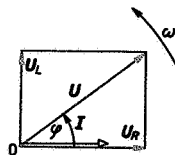
$$U = IZ$$

Z toho proud je

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



Obr. 177. Schéma skutečné cívky v obvodu střídavého proudu



Obr. 178. Fázorový diagram pro střídavý obvod na obr. 177

Převrácena hodnota impedance je admittance. Jednotkou admittance je siemens (S).

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

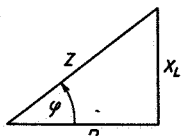
Z fázorového diagramu vyplývá, že svorkové napětí předbíhá proud o úhel φ . Určíme jej pomocí goniometrických funkcí

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

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

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

Ve fázorovém diagramu tvoří fázory U , U_R , U_L pravoúhlý trojúhelník zvaný trojúhelník napětí. Dělíme-li napětí proudem, dostaneme trojúhelník odporů a z něho vyplývají vztahy (obr. 179)



Obr. 179. Trojúhelník odporů

$$R = Z \cos \varphi$$

$$X_L = Z \sin \varphi$$

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

Z trojúhelníku napětí dostaneme

$$U_R = U \cos \varphi$$

$$U_L = U \sin \varphi$$

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

Příklad 61: Po připojení cívky na stejnosměrné napětí 60 V prochází cívkou stejnosměrný proud 4 A a po připojení na střídavé napětí 60 V s kmitočtem 50 Hz prochází cívkou proud 1 A. Určete indukčnost cívky, fázový posun a úbytky napětí U_R a U_L .

$U_{ss} = 60 \text{ V}$, $I_{ss} = 4 \text{ A}$, $U = 60 \text{ V}$, $I = 1 \text{ A}$, $f = 50 \text{ Hz}$

Činný odpor

$$R = \frac{U_{\text{ss}}}{I_{\text{ss}}} = \frac{60}{4} \Omega = 15 \Omega$$

Impedance

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{60}{1} \Omega = 60 \Omega$$

Indukční reaktance

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{60^2 - 15^2} \Omega = \sqrt{3600 - 225} \Omega \doteq 58 \Omega$$

Indukčnost

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2 \cdot \pi f} = \frac{58}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \text{ H} = 0,1847 \text{ H} \doteq 185 \text{ mH}$$

Fázový posun

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{15}{60} = 0,25$$

$$\varphi \doteq 75^\circ 30'$$

$$\sin 75^\circ 30' = 0,968$$

Úbytek napětí U_R

$$U_R = U \cos 75^\circ 30' = 60 \cdot 0,25 \text{ V} = 15 \text{ V}$$

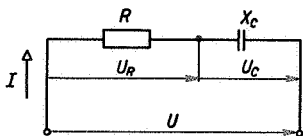
Úbytek napětí U_L

$$U_L = U \sin 75^\circ 30' = 60 \cdot 0,968 \text{ V} \doteq 58 \text{ V}$$

Cívka má indukčnost 185 mH, fázový posun $75^\circ 30'$, napětí $U_R = 15 \text{ V}$ a $U_L \doteq 58 \text{ V}$.

7.14.2. Skutečný kondenzátor v elektrickém obvodu střídavého proudu

Na obr. 180 je schéma zapojení *skutečného kondenzátoru*, u kterého jsou vlastní ztráty vyjádřeny *rezistorem* zapojeným v sérii s *ideálním kondenzátorem*.



Obr. 180. Skutečný kondenzátor v obvodu střídavého proudu

Obvod řešíme obdobně jako sériový obvod s rezistorem a ideální cívkou. Ve schématu zapojení vyznačíme kladný směr svorkového napětí, proudu a úbytků napětí U_R a U_C . Na obr. 181 je fázorový diagram, který se liší od fázorového diagramu pro obvod s rezistorem v sérii s ideální cívkou tím, že fázor úbytku napětí U_C je zakreslen v záporném směru na ose y, protože se napětí na ideálním kondenzátoru zpožďuje za proudem o úhel $\varphi = 90^\circ$ (tj. $\pi/2$). Geometrický součet fázorů úbytků napětí U_R a U_C se rovná fázoru svorkového napětí U .

$$U = U_R + U_C$$

Podle Pythagorovy věty dostaneme z trojúhelníku napětí (obr. 181) vztah

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

Protože platí

$$U_R = IR \quad \text{a} \quad U_C = IX_C$$

je

$$U = I \sqrt{R^2 + X_C^2} = I \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$$

Impedance

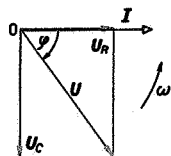
$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$$

Proud procházející obvodem

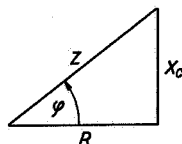
$$I = \frac{U}{Z}$$

Admittance

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



Obr. 181. Fázorový diagram pro obvod na obr. 180



Obr. 182. Trojúhelník odporů

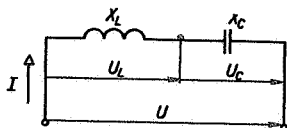
Dělíme-li napětí proudem, dostaneme trojúhelník odporů (obr. 182), podle kterého platí

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

$$\sin \varphi = \frac{X_C}{Z} = \frac{1}{\omega C Z} \quad X_C = Z \sin \varphi \quad U_C = U \sin \varphi$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega C R}$$

7.14.3. Sériové zapojení cívky a kondenzátoru

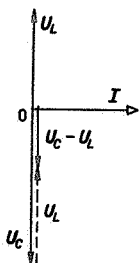


Obr. 183. Cívka a kondenzátor zapojené v sérii

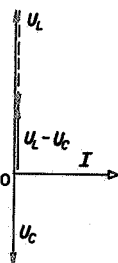
Schéma sériového obvodu s ideální cívkou s indukčností L a ideálním kondenzátorem s kapacitou C je na obr. 183. Fázorový diagram pro úbytek napětí $U_C > U_L$ je na obr. 184. Na obr. 185 je fázorový diagram pro $U_L > U_C$. Fázor svorkového napětí U se rovná rozdílu

$$U_C - U_L \quad \text{nebo} \quad U_L - U_C$$

Uvažujme, že platí $U_L > U_C$. Potom platí $U = U_L - U_C$.



Obr. 184. Fázorový diagram pro obvod na obr. 183 pro $U_C > U_L$



Obr. 185. Fázorový diagram pro obvod na obr. 183 pro $U_L > U_C$

Dosadíme-li za $U_L = IX_L$ a za $U_C = IX_C$, dostaneme

$$U = I(X_L - X_C)$$

Výsledná reaktance obvodu

$$X = X_L - X_C$$

Výsledná jalová vodivost

$$B = \frac{1}{X}$$

Proud procházející obvodem

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

Příklad 62: Cívka s indukčností 12,7 mH a kondenzátor s kapacitou 200 μF jsou zapojeny do série a prochází jimi střídavý proud 5 A. Určete, na jaké napětí s kmitočtem 50 Hz jsou připojeny. Schéma zapojení a fázorový diagram jsou na obr. 183 a 184.

Uvažujeme ideální cívku a ideální kondenzátor.

$$L = 12,7 \text{ mH} = 0,0127 \text{ H}, C = 200 \mu\text{F} = 200 \cdot 10^{-6} \text{ F}, I = 5 \text{ A},$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Indukční reaktance

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,0127 \Omega = 4 \Omega$$

Kapacitní reaktance

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} \Omega = 16 \Omega$$

Úbytky napětí na cívce a kondenzátoru

$$U_L = IX_L = 5 \cdot 4 \text{ V} = 20 \text{ V}$$

$$U_C = IX_C = 5 \cdot 16 \text{ V} = 80 \text{ V}$$

Napětí zdroje

$$U = U_C - U_L = (80 - 20) \text{ V} = 60 \text{ V}$$

Obdobně platí

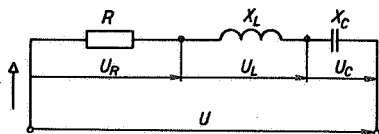
$$X = X_C - X_L$$

$$X = (16 - 4) \Omega$$

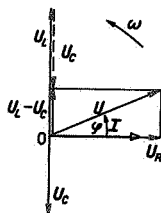
$$X = 12 \Omega$$

7.14.4. Sériové zapojení rezistoru, cívky a kondenzátoru

Schéma sériového obvodu s rezistorem s činným odporem R , ideální cívku s indukčností L a ideálním kondenzátorem s kapacitou C je na obr. 186 a jeho fázorový diagram je na obr. 187.



Obr. 186. Rezistor, cívka a kondenzátor zapojené v sérii



Obr. 187. Fázorový diagram pro obvod na obr. 186

Při kreslení fázorového diagramu postupujeme takto:

a) Proud je v celém obvodu stejný. Jeho fázor nakreslíme ve zvolené velikosti do kladného směru vodorovné osy.

b) Úbytek napětí na rezistoru $U_R = IR$ je s proudem ve fázi. Znázorníme jej fázorem, který má stejný směr jako fázor proudu.

c) Úbytek napětí na cívce $U_L = IX_L = I\omega L$ předbíhá proud o úhel 90° (tj. $\pi/2$), a proto jeho fázor nakreslíme v kladném směru svislé osy.

d) Úbytek napětí na kondenzátoru $U_C = IX_C = I(1/\omega C)$ je zpožděn za proudem o úhel 90° (tj. $\pi/2$), takže jeho fázor kreslíme v záporném směru svislé osy.

e) Geometrický součet fázorů úbytků napětí U_R , U_L a U_C se rovná fázoru svorkového napětí zdroje U .

$$U = U_R + U_L + U_C$$

Mezi svorkovým napětím a proudem je fázový posun φ kladný nebo záporný podle toho, zda má výsledná reaktance charakter indukčnosti nebo kapacity. Převládá-li v obvodu indukčnost nad kapacitou ($X_L > X_C$), je proud zpožděn za svorkovým napětím a fázový posun je kladný, $+\varphi$. V obvodu, ve kterém převládá kapacita nad indukčností ($X_C > X_L$), předbíhá proud svorkové napětí a fázový posun je záporný, $-\varphi$.

Po nakreslení fázorového diagramu řešíme obvod matematicky. Předpokládáme, že $X_L > X_C$.

Z trojúhelníku napětí vypočítáme svorkové napětí

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

Výraz s odmocninou je impedance uvažovaného obvodu

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Platí tedy

$$U = IZ$$

Proud procházející obvodem

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

Admitance obvodu

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

Z trojúhelníků odporů vyplývá (obr. 188)

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

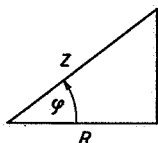
$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

$$\sin \varphi = \frac{X}{Z} = \frac{X_L - X_C}{Z} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{Z} = \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega ZC}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{\omega^2 LC - 1}{R\omega C}$$

$$R = Z \cos \varphi \quad X = Z \sin \varphi$$

Pro obvod, ve kterém převládá kapacita nad indukčností ($X_C > X_L$), je ve všech odvozených vztazích výsledná reaktance $X = X_C - X_L$.



$$X = X_L - X_C$$

nebo

$$X = X_C - X_L$$

Obr. 188. Trojúhelník odporů

Příklad 63: Rezistor s činným odporem $14,5 \Omega$, cívka s indukčností $0,2 \text{ H}$ a kondenzátor s kapacitou $150 \mu\text{F}$ jsou zapojeny v sérii a obvodem prochází proud 5 A . Určete svorkové napětí s kmitočtem 50 Hz , úbytky napětí U_R , U_L , U_C , indukční a kapacitní reaktance X_L a X_C , impedanci Z a fázový posun φ .

Schéma zapojení a fázorový diagram jsou na obr. 186 a 187.

$R = 14,5 \Omega$, $L = 0,2 \text{ H}$, $C = 150 \mu\text{F} = 150 \cdot 10^{-6} \text{ F}$, $I = 5 \text{ A}$, $f = 50 \text{ Hz}$
Nejdříve určíme indukční a kapacitní reaktance.

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,2 \Omega = 62,8 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 150 \cdot 10^{-6}} \Omega = 21,2 \Omega$$

Úbytky napětí

$$U_R = IR = 5 \cdot 14,5 \text{ V} = 72,5 \text{ V}$$

$$U_L = IX_L = 5 \cdot 62,8 \text{ V} = 314 \text{ V}$$

$$U_C = IX_C = 5 \cdot 21,2 \text{ V} = 106 \text{ V}$$

Podle fázorového diagramu je svorkové napětí

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{72,5^2 + (314 - 106)^2} \text{ V} = \\ = \sqrt{48\,520} \text{ V} \doteq 220 \text{ V}$$

Impedance

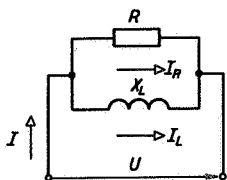
$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} \Omega = 44 \Omega$$

Fázový posun

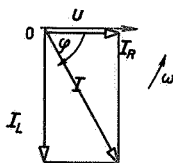
$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{14,5 \Omega}{44 \Omega} \doteq 0,233\,95 \\ \varphi \doteq 70^\circ 46'$$

● 7.14.5. Paralelní zapojení rezistoru a cívky

Schéma paralelního obvodu s rezistorem s činným odporem R a ideální cívkou s indukčností L je na obr. 189. Fázorový diagram je na obr. 190. Při kreslení fázorového diagramu vycházíme od řídicího fázoru; tím je při paralelním zapojení fázor svorkového napětí U , neboť je na rezistoru i na cívce stejné napětí. Řídicí fázor U ve zvolené velikosti nakreslíme do kladného směru vodorovné osy. Proud procházející rezistorem je ve fázi



Obr. 189. Rezistor a cívka
zapojené paralelně



Obr. 190. Fázorový diagram
pro obvod na obr. 189

se svorkovým napětím, a proto jeho fázor I_R kreslíme ve směru fázoru svorkového napětí. Proud procházející cívkou je zpožděn za svorkovým napětím o úhel 90° (tj. $\pi/2$). Jeho fázor I_L kreslíme ve směru záporné svíslé osy. Geometrickým sečtením fázorů I_R a I_L dostaneme fázor výsledného proudu procházejícího obvodem

$$I = I_R + I_L$$

Dosadíme-li za $I_R = U/R$ a za $I_L = U/X_L$, dostaneme podle Pythagorovy věty

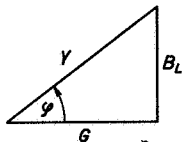
$$I = \sqrt{\frac{U^2}{R^2} + \frac{U^2}{X_L^2}} = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}$$

Výraz pod odmocninou je admitance obvodu Y

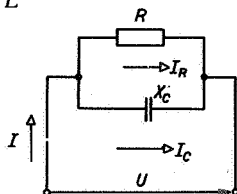
$$Y = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{\omega^2 L^2}} = \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{R^2 \omega^2 L^2}} = \frac{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}{R \omega L}$$

Převrácená hodnota admitance je impedance Z

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{R \omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$



Obr. 191. Trojúhelník
vodivosti



Obr. 192. Rezistor
a kondenzátor zapojené
paralelně

Dělíme-li proudy I , I_R a I_L napětím U , můžeme sestrojit trojúhelník vodivosti se stranami $G = I_R/U$, $B_L = I_L/U$, $Y = I/U$ (obr. 191). Z trojúhelníku vodivosti dostaneme

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

a z trojúhelníku proudů

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

Fázový posun určíme ze vztahu

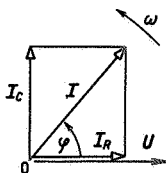
$$\cos \varphi = \frac{G}{Y} = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{Z}} = \frac{Z}{R}$$

$$\sin \varphi = \frac{B_L}{Y} = \frac{\frac{1}{\omega L}}{\frac{1}{Z}} = \frac{Z}{\omega L}$$

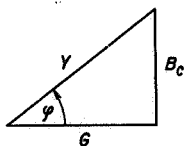
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B_L}{G} = \frac{\frac{1}{\omega L}}{\frac{1}{R}} = \frac{R}{\omega L}$$

7.14.6. Paralelní zapojení rezistoru a kondenzátoru

Schéma paralelního obvodu s rezistorem s činným odporem R a ideálním kondenzátorem s kapacitou C je na obr. 192. Příslušný fázorový diagram je na obr. 193. Na rezistoru a kondenzátoru je stejné svorkové napětí, takže řídicím fázorem je zde opět fázor svorkového napětí U . Nakreslíme



Obr. 193. Fázorový diagram pro obvod na obr. 192



Obr. 194. Trojúhelník vodivosti

ho tedy do kladného směru vodorovné osy. Proud procházející rezistorem je ve fázi se svorkovým napětím a jeho fázor nakreslíme do směru svorkového napětí. Proud procházející kondenzátorem předbíhá svorkové napětí o úhel 90° (tj. $\pi/2$). Jeho fázor I_C kreslíme do kladného směru svislé osy. Fázor výsledného proudu I dostaneme geometrickým součtem fázorů I_R a I_C .

$$I = I_R + I_C$$

Podle Pythagorovy věty platí

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{\frac{U^2}{R^2} + U^2 \omega^2 C^2}$$

$$I = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2}$$

Z trojúhelníku vodivosti (obr. 194) je admitance obvodu

$$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2} = \sqrt{\frac{1 + R^2 \omega^2 C^2}{R^2}} = \frac{\sqrt{1 + R^2 \omega^2 C^2}}{R}$$

Převrácená hodnota admitance je impedance

$$Z = \frac{R}{\sqrt{1 + R^2 \omega^2 C^2}}$$

Proud procházející obvodem

$$I = UY = \frac{U}{Z}$$

Z trojúhelníku vodivosti plyne

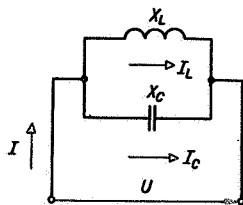
$$\cos \varphi = \frac{G}{Y} = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{Z}} = \frac{Z}{R}$$

$$\sin \varphi = \frac{B_C}{Y} = \frac{\omega C}{\frac{1}{Z}} = Z\omega C$$

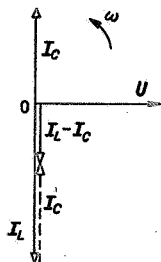
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B_C}{G} = \frac{\omega C}{\frac{1}{R}} = R\omega C$$

7.14.7. Paralelní zapojení cívky a kondenzátoru

Schéma paralelního obvodu s ideální cívkou s indukčností L a ideálním kondenzátorem s kapacitou C je na obr. 195. Jeho fázorový diagram je na obr. 196.



Obr. 195. Cívka
a kondenzátor zapojené
paralelně



Obr. 196. Fázorový diagram
pro obvod na obr. 195

Řídicím fázorem je fázor svorkového napětí U ; ten nakreslíme do kladného směru vodorovné osy. Proud procházející cívkou se za svorkovým napětím zpožďuje o úhel 90° (tj. $\pi/2$), a proto jeho fázor I_L kreslíme do směru záporné svislé osy. Proud procházející kondenzátorem předbíhá svorkové napětí o úhel 90° (tj. $\pi/2$). Jeho fázor I_C kreslíme do kladného směru svislé osy. Fázor výsledného proudu I dostaneme geometrickým součtem fázorů I_L a I_C . Při $I_L > I_C$ má obvod indukční charakter, kdežto při $I_C > I_L$ má charakter kapacitní.

Předpokládáme, že $I_L > I_C$. Potom platí $I = I_L - I_C$.

$$I = \frac{U}{\omega L} - U\omega C = U \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) = U \frac{1 - \omega^2 LC}{\omega L}$$

Zlomek $1 - \omega^2 LC / \omega L$ je jalová indukční vodivost (susceptance) B_L obvodu a její převrácená hodnota je výsledná indukční reaktance obvodu

$$X_L = \frac{\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$

Proud procházející obvodem

$$I = UB_L = \frac{U}{X_L}$$

Je-li $I_C > I_L$, je výsledná kapacitní susceptance obvodu

$$B_C = \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega L}$$

a výsledná kapacitní reaktance je

$$X_C = \frac{\omega L}{\omega^2 LC - 1}$$

Rovná-li se indukční vodivost B_L kapacitní vodivosti B_C , rovná se výsledná vodivost obvodu nule a v ustáleném stavu neprochází přívody obvodu žádný proud; $I = I_L - I_C = 0$ A.

Kondenzátor se vybíjí a nabíjí proudem procházejícím cívkou.

Příklad 64: Jak velký proud prochází obvodem složeným z cívky s indukčností 3 H a kondenzátoru s kapacitou 20 μ F, zapojených paralelně a připojených na svorkové napětí 220 V, 50 Hz.

První způsob řešení:

$$L = 3 \text{ H}, C = 20 \mu\text{F} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ F}, U = 220 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}$$

Indukční reaktance

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 3 \Omega = 942 \Omega$$

Kapacitní reaktance

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} \Omega = \frac{10^6}{314 \cdot 20} \Omega = 159,2 \Omega$$

Proud procházející cívkou

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{220}{314 \cdot 3} \text{ A} = 0,23 \text{ A}$$

Proud procházející kondenzátorem

$$I_C = U \omega C = 220 \cdot 314 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 1,38 \text{ A}$$

Celkový proud procházející obvodem

$$I = I_C - I_L = (1,38 - 0,23) \text{ A} = 1,15 \text{ A}$$

Druhý způsob řešení:

Výsledná reaktance obvodu

$$X = \frac{\omega L}{\omega^2 LC - 1} = \frac{314 \cdot 3}{314^2 \cdot 3 \cdot 20 \cdot 10^{-6} - 1} \Omega = 191,46 \Omega$$

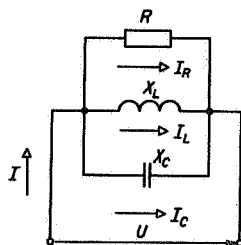
Celkový proud procházející obvodem

$$I = \frac{U}{X} = \frac{220}{191,46} \text{ A} = 1,15 \text{ A}$$

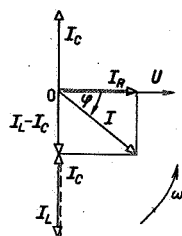
Z výpočtu je vidět, že příklad lze řešit několika způsoby, ale při řešení se snažíme volit jednodušší postup.

7.14.8. Paralelní zapojení rezistoru, cívky a kondenzátoru

Při paralelním zapojení rezistoru s činným odporem R , ideální cívky s indukčností L a ideálním kondenzátorem s kapacitou C je svorkové napětí zdroje na všech paralelních větvích stejné (obr. 197). Fázorový diagram na obr. 198 nakreslíme podle pravidel uvedených v předcházejících článcích.



Obr. 197. Rezistor, cívka a kondenzátor zapojené paralelně



Obr. 198. Fázorový diagram pro obvod na obr. 197

Proud procházející rezistorem

$$I_R = \frac{U}{R} = UG$$

Proud procházející cívkou

$$I_L = \frac{U}{\omega L} = UB_L$$

Proud procházející kondenzátorem

$$I_C = \frac{U}{X_C} = U\omega C = UB_C$$

Fázor celkového proudu I procházejícího obvodem dostaneme, sečteme-li geometricky fázory I_R , I_{LC} a I_C .

Pro $I_L > I_C$ platí podle Pythagorovy věty

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}$$

$$I = U \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$$

Výraz pod odmocninou je admitance obvodu

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$$

Prevrácená hodnota admitance je impedance

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

Fázový posun vyplývá z trojúhelníku proudů nebo z trojúhelníku vodivosti

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

▼ **Příklad 65:** Rezistor s činným odporem 44Ω , cívka s indukčností $0,7 \text{ H}$ a kondenzátor s kapacitou $50 \mu\text{F}$ jsou zapojeny paralelně a připojeny na zdroj napětí 220 V , 50 Hz . Určete I_R , I_L , I_C , I , Z , Y a φ .

$R = 44 \Omega$, $L = 0,7 \text{ H}$, $C = 50 \mu\text{F} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ F}$, $U = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$

Proud procházející rezistorem

$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{220}{44} = 5 \text{ A}$$

Proud procházející cívkou

$$I_L = \frac{U}{\omega L} = \frac{220}{314 \cdot 0,7} \text{ A} \doteq 1 \text{ A}$$

Proud procházející kondenzátorem

$$I_C = U\omega C = 220 \cdot 314 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 3,45 \text{ A}$$

Celkový proud procházející obvodem

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} = \sqrt{5^2 + (3,45 - 1)^2} \text{ A} = \sqrt{31} \text{ A}$$

$$I = 5,57 \text{ A}$$

Impedance

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{5,57} \Omega \doteq 42 \Omega$$

Admittance

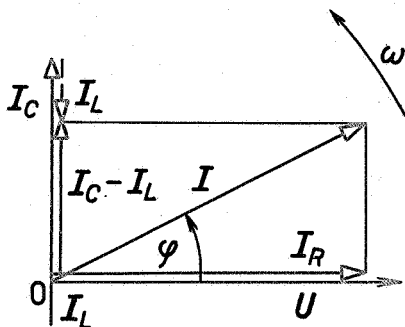
$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{42} \text{ S} \doteq 0,024 \text{ S}$$

Fázový posun

$$\cos \varphi = \frac{Z}{R} = \frac{42}{44} = 0,9545; \quad \varphi = 5^\circ 30'$$

Fázorový diagram nakreslený v měřítku je na obr. 199. Měřítka napětí:

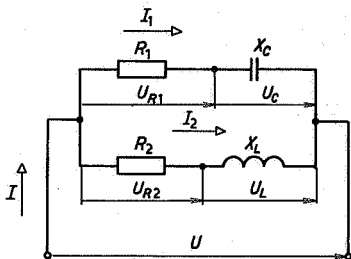
▲ 1 cm $\doteq$ 40 V, měřítko proudu: 1 cm $\doteq$ 1 A.



Obr. 199. Fázorový diagram k příkladu 65

▽ Příklad 66: Rezistory, kondenzátor a cívka jsou zapojeny podle obr. 200. Činné odpory $R_1 = 24 \Omega$ a $R_2 = 6 \Omega$, kapacitní reaktance $X_C = 7 \Omega$ a indukční reaktance $X_L = 8 \Omega$. Obvod je připojen na zdroj napětí 100 V, 50 Hz.

Určete: a) impedanci větve s kondenzátorem a cívkou, b) proudy I_1 , I_2 , c) napětí U_{R1} , U_{R2} , U_C , U_L , d) fázové posuny ve větvích, e) proud odebraný ze zdroje, f) impedanci a admitanci obvodu, g) fázový posun obvodu, h) kapacitu a indukčnost obvodu, ch) odpor a reaktanci náhradního obvodu.



Obr. 200. Schéma obvodu k příkladu 66

Fázorový diagram na obr. 201 nakreslíme takto: Nejdříve nakreslíme fázor $\mathbf{U}$ svorkového napětí, které je pro obě větve společné. Proud $\mathbf{I}_1$ předbíhá svorkové napětí $\mathbf{U}$ o úhel φ_1 . S proudem $\mathbf{I}_1$ je ve fázi napětí $\mathbf{U}_{R1}$ a k němu je kolmé napětí $\mathbf{U}_C$. Opíšeme proto kružnici s průměrem $\mathbf{U}$. Bod, ve kterém fázor $\mathbf{U}_{R1}$ protne kružnici, spojíme s koncem fázoru $\mathbf{U}$, a tím dostaneme pravoúhlý trojúhelník $\mathbf{U}_{R1}\mathbf{U}\mathbf{U}_C$. Proud $\mathbf{I}_2$ je zpožděn za svorkovým napětím $\mathbf{U}$ o úhel φ_2 a je ve fázi s napětím $\mathbf{U}_{R2}$. Stejným způsobem nakreslíme pravoúhlý trojúhelník napětí $\mathbf{U}_{R2}\mathbf{U}\mathbf{U}_L$. Výsledný proud se rovná geometrickému součtu $\mathbf{I}_1$ a $\mathbf{I}_2$. Fázový posun proudu $\mathbf{I}$ proti svorkovému napětí $\mathbf{U}$ je φ .

$R_1 = 24 \Omega$, $R_2 = 6 \Omega$, $X_C = 7 \Omega$, $X_L = 8 \Omega$, $U = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$

a) Impedance větve R_1C

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_C^2} = \sqrt{24^2 + 7^2} \Omega = \sqrt{625} \Omega = 25 \Omega$$

Impedance větve R_2L

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_L^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} \Omega = \sqrt{100} \Omega = 10 \Omega$$

b) Proudů I_1 a I_2

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{100}{25} \text{ A} = 4 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{100}{10} \text{ A} = 10 \text{ A}$$

c) Úbytky napětí na rezistorech, kondenzátoru a cívce

$$U_{R1} = I_1 R_1 = 4 \cdot 24 \text{ V} = 96 \text{ V}$$

$$U_{R2} = I_2 R_2 = 10 \cdot 6 \text{ V} = 60 \text{ V}$$

$$U_C = I_1 X_C = 4 \cdot 7 \text{ V} = 28 \text{ V}$$

$$U_L = I_2 X_L = 10 \cdot 8 \text{ V} = 80 \text{ V}$$

d) Fázové posuny ve větvích

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{24}{25} = 0,96$$

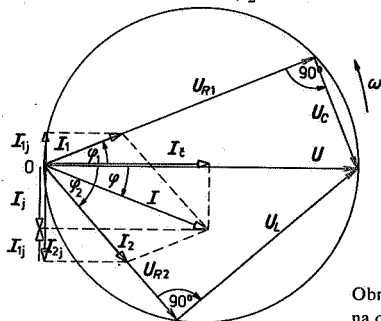
$$\varphi_1 = 16^\circ 15' 37''$$

$$\sin \varphi_1 = \frac{X_C}{Z_1} = \frac{7}{25} = 0,28$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{6}{10} = 0,6$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_L}{Z_2} = \frac{8}{10} = 0,8$$

$$\varphi_2 = 53^\circ 7' 48''$$



Obr. 201. Fázorový diagram obvodu
na obr. 200

e) Proud odebíraný ze zdroje určíme sečtením proudů I_1 a I_2 . Abychom jej vypočítali, rozložíme fázory proudu I_1 a I_2 do vodorovné a svislé osy. Složka proudu ve vodorovné ose

$$I_x = I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2$$

$$I_x = (4 \cdot 0,96 + 10 \cdot 0,6) \text{ A} = 9,84 \text{ A}$$

Složka proudu ve svislé ose

$$I_y = I_2 \sin \varphi_2 - I_1 \sin \varphi_1$$

$$I_y = (10 \cdot 0,8 - 4 \cdot 0,28) \text{ A}$$

$$I_y = 6,88 \text{ A}$$

Celkový proud odebíraný ze zdroje vypočítáme podle Pythagorovy věty

$$I = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} = \sqrt{9,84^2 + 6,88^2} \text{ A} = \sqrt{114,16} \text{ A} = 12 \text{ A}$$

f) Impedance a admitance obvodu

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{100}{12} \Omega = 8,33 \Omega$$

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{8,33} \text{ S} = 0,12 \text{ S}$$

g) Fázový posun v obvodu

$$\cos \varphi = \frac{I_x}{I} = \frac{9,84}{12} = 0,82$$

$$\varphi = 34^\circ 55'$$

$$\sin \varphi = \frac{I_y}{I} = \frac{6,88}{12} = 0,573$$

h) Kapacita kondenzátoru a indukčnost cívky zapojených v obvodu

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{314 \cdot 7} \text{ F} = 0,000455 \text{ F} = 455 \mu\text{F}$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{8}{314} \text{ H} = 0,0255 \text{ H} = 25,5 \text{ mH}$$

ch) Obvod lze nahradit rezistorem s odporem

$$R_n = Z \cos \varphi = 8,33 \cdot 0,82 \Omega = 6,83 \Omega$$

a cívkou s reaktancí

$$X_{nL} = Z \sin \varphi = 8,33 \cdot 0,573 \Omega = 4,78 \Omega$$

Indukčnost této cívky

$$\triangle \quad L_n = \frac{X_{nL}}{\omega} = \frac{4,78}{314} \text{ H} = 0,0152 \text{ H} = 15,2 \text{ mH}$$

7.15. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Co to je složený obvod střídavého proudu?
2. Co je to impedance elektrického obvodu?
3. Co je to admitance elektrického obvodu a jak se vypočítá z impedance?
4. Která fyzikální veličina je řídícím fázorem při sériovém zapojení rezistoru, cívky a kondenzátoru?
5. Která fyzikální veličina je řídícím fázorem při paralelním zapojení rezistoru, cívky a kondenzátoru?
6. Vysvětlíte postup při kreslení fázorového diagramu sériového obvodu, ve kterém jsou zapojeny rezistor, cívka a kondenzátor.
7. Vysvětlíte postup při kreslení fázorového diagramu paralelního obvodu, ve kterém jsou zapojeny rezistor, cívka a kondenzátor.
8. Co je to fázový posun a z čeho jej určíme?
9. Vyjmenujte strany trojúhelníku odporů a určete, pro který obvod jej kreslíme.
10. Vyjmenujte strany trojúhelníku vodivosti a určete, pro který obvod jej kreslíme.
11. Rezistor s činným odporem 4Ω a cívka s indukční reaktancí 3Ω jsou zapojeny v sérii a připojeny na napětí 24 V , 50 Hz . Nakreslete fázorový diagram a určete: Z , I , φ , L , U_R a U_L .
12. Rezistor s činným odporem 12Ω a kondenzátor s kapacitní reaktancí 5Ω jsou zapojeny v sérii a připojeny na napětí 26 V , 50 Hz . Nakreslete schéma zapojení, fázorový diagram a určete: Z , I , φ , U_R , U_C a C .
13. Cívka s indukčností $0,5 \text{ H}$ a rezistor s činným odporem 368Ω jsou paralelně připojeny ke zdroji napětí 220 V , 50 Hz . Nakreslete schéma zapojení a vypočítejte: I_R , I_L , I , Z , φ .
14. Kondenzátor s kapacitou $332 \mu\text{F}$ a rezistor s činným odporem 12Ω jsou připojeny paralelně na napětí 48 V , 50 Hz . Nakreslete schéma zapojení, fázorový diagram a vypočítejte: I_R , I_C , I , Z a φ .

15. Kondenzátor s kapacitou $31,8 \mu\text{F}$ a cívka s indukčností $0,159 \text{ H}$ jsou paralelně připojeny na zdroj napětí 220 V , 50 Hz . Nakreslete schéma zapojení, fázorový diagram a vypočítejte: I_L , I_C , I , X a B .

▼ 16. Kondenzátor s kapacitou $300 \mu\text{F}$, cívka s indukčností $0,08 \text{ H}$ a rezistor s činným odporem 12Ω jsou zapojeny v sérii a připojeny na napětí 120 V , 50 Hz . Nakreslete schéma zapojení, fázorový diagram a vypočítejte: Z , I , U_R , U_L a U_C a φ .

17. Rezistor s činným odporem 25Ω , kondenzátor s kapacitní reaktancí 100Ω a cívka s indukční reaktancí 25Ω jsou paralelně připojeny na napětí 100 V , 50 Hz . Nakreslete schéma zapojení, fázorový diagram a vypočítejte: I_R , I_C , I_L , I , Z , L , C a φ .

18. Rezistor s činným odporem 20Ω je zapojen v sérii s cívkou s indukčností L a obvod je připojen na zdroj napětí 120 V , 50 Hz , ze kterého odebírá proud 2 A . Vypočítejte: Z , L , φ , U_R , U_L a nakreslete fázorový diagram v měřítku $1 \text{ mm} \cong 1 \text{ V}$, $1 \text{ cm} \cong 0,5 \text{ A}$.

19. Rezistor s činným odporem $R_1 = 24,8 \Omega$ je zapojen v sérii s cívkou s indukčností $0,1 \text{ H}$. Paralelně k nim je připojen rezistor s činným odporem $R_2 = 240 \Omega$. Obvod je připojen na napětí 120 V , 50 Hz . Nakreslete schéma zapojení, fázorový diagram a vypočítejte: I_1 , I_2 , I , Z , φ , U_{R1} , U_L .

▼ 20. Cívka s indukční reaktancí 10Ω a kondenzátor s kapacitní reaktancí 15Ω jsou zapojeny v sérii a k nim je paralelně připojen rezistor s činným odporem 10Ω . Obvod je připojen na napětí 100 V , 50 Hz . Nakreslete schéma zapojení, fázorový diagram a vypočítejte: proud I_1 procházející cívkou a kondenzátorem, proud I_2 procházející rezistorem, celkový proud I , úbytky napětí U_L a U_C , fázový posun φ a impedanci Z .

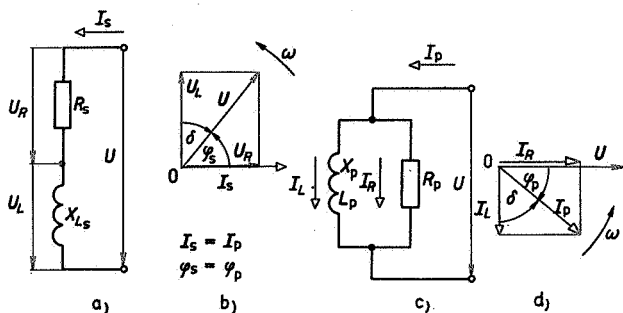


▼ 7.16. DUÁLNÍ OBVODY STŘÍDAVÉHO PROUDU

Výpočet obvodu střídavého proudu se někdy zjednoduší, nahradíme-li sériové zapojení rezistoru s cívkou nebo rezistoru s kondenzátorem paralelním zapojením nebo naopak (obr. 202 a 203). Velikost činného odporu, velikost indukčnosti a velikost kapacity jsou však v náhradním zapojení jiné než v původním zapojení, ale impedance a fázový posun pro oba obvody zůstávají stejné. *Náhradní zapojení* ale vyhovuje jen *při kmitočtu*, pro který bylo *vypočítáno*.

Pro přepočet sériového obvodu na duální (rovnocenný) paralelní obvod lze odvodit vztahy

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} \quad X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s}$$

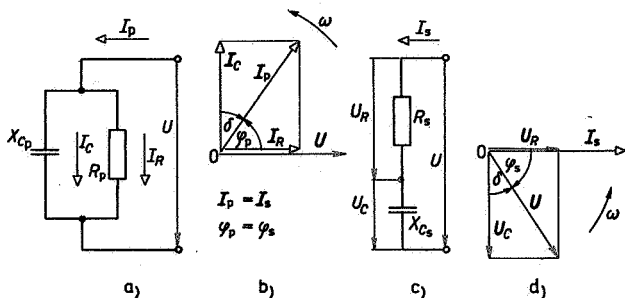


Obr. 202. Duální obvody:

- a) Rezistor R_s a cívka L_s zapojené v sérii. b) fázorový diagram pro sériové zapojení.
c) rezistor R_p a cívka L_p zapojené paralelně. d) fázorový diagram pro paralelní zapojení

Pro přepočet paralelního obvodu na duální sériový obvod platí vztahy

$$R_s = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} \quad X_s = \frac{R_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2}$$



Obr. 203. Duální obvody:

- a) Rezistor R_p a kondenzátor C_p zapojené paralelně. b) fázorový diagram pro paralelní zapojení. c) rezistor R_s a kondenzátor C_s zapojené v sérii. d) fázorový diagram pro sériové zapojení

Příklad 67: Rezistor s činným odporem $30\ \Omega$ a cívka s indukčností $100\ \text{mH}$ jsou zapojeny v sérii. Máme je nahradit duálním paralelním obvodem pro kmitočet $100\ \text{Hz}$ a napětí $100\ \text{V}$.

$$R = 30\ \Omega, L = 100\ \text{mH} = 0,1\ \text{H}, U = 100\ \text{V}, f = 100\ \text{Hz}$$

Indukční reaktance

$$X_s = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 0,1\ \Omega = 62,8\ \Omega$$

Činný odpor pro paralelní zapojení

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} = \frac{30^2 + 62,8^2}{30}\ \Omega = 161,46\ \Omega$$

Indukční reaktance pro paralelní zapojení

$$X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} = \frac{30^2 + 62,8^2}{62,8}\ \Omega = 77,13\ \Omega$$

Kontrola výpočtu

Impedance sériového obvodu

$$Z = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \sqrt{30^2 + 62,8^2}\ \Omega = 69,6\ \Omega$$

Proud odebíraný ze zdroje sériovým obvodem

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{100}{69,6}\ \text{A} = 1,44\ \text{A}$$

Proud procházející rezistorem v paralelním obvodu

$$I_R = \frac{U}{R_p} = \frac{100}{161,46}\ \text{A} = 0,62\ \text{A}$$

Proud procházející cívkou v paralelním obvodu

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{100}{77,13}\ \text{A} = 1,3\ \text{A}$$

Proud odebíraný ze zdroje paralelním obvodem

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{0,62^2 + 1,3^2}\ \text{A} = 1,44\ \text{A}$$

Příklad 68: Rezistor s činným odporem $5\ \Omega$ a kondenzátor s kapacitní reaktancí $10\ \Omega$ jsou zapojeny paralelně a k nim je do série připojena cívka s indukční reaktancí $10\ \Omega$. Obvod je připojen na zdroj napětí $20\ \text{V}$, $50\ \text{Hz}$.

Určete: Z , U_1 , U_2 , I_1 , I_2 , I , φ , C , L a náhradní obvod. Schéma zapojení je na obr. 204.

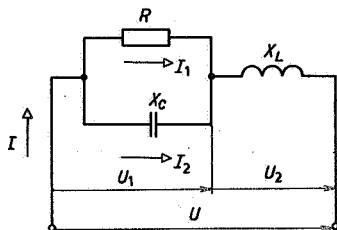
Paralelně zapojený rezistor s činným odporem $5\ \Omega$ a kondenzátor s kapacitní reaktancí $10\ \Omega$ přepočítáme na duální sériové zapojení.

$R = 5\ \Omega$, $X_C = 10\ \Omega$, $X_L = 10\ \Omega$, $U = 20\ \text{V}$, $f = 50\ \text{Hz}$

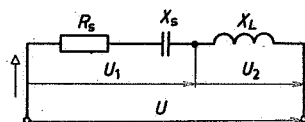
$$R_s = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} = \frac{5 \cdot 10^2}{5^2 + 10^2} \Omega = \frac{500}{125} \Omega = 4\ \Omega$$

$$X_s = \frac{R_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2} = \frac{5^2 \cdot 10}{5^2 + 10^2} \Omega = \frac{250}{125} \Omega = 2\ \Omega$$

Duální schéma obvodu je na obr. 205.



Obr. 204. Schéma obvodu k příkladu 68



Obr. 205. Schéma duálního obvodu k obvodu na obr. 204

Impedance duálního obvodu

$$Z = \sqrt{R_s^2 + (X_L - X_s)^2} = \sqrt{4^2 + (10 - 2)^2} \Omega = \sqrt{80} \Omega = 8,94\ \Omega$$

Proud procházející obvodem

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{20}{8,94} \text{ A} = 2,23 \text{ A}$$

Impedance

$$Z_1 = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \sqrt{4^2 + 2^2} \Omega = \sqrt{20} \Omega = 4,47\ \Omega$$

Napětí

$$U_1 = I Z_1 = 2,23 \cdot 4,47 \text{ V} = 9,97 \text{ V} \doteq 10 \text{ V}$$

Napětí

$$U_2 = I X_L = 2,23 \cdot 10 \text{ V} = 22,3 \text{ V}$$

Proudy

$$I_1 = \frac{U_1}{R} = \frac{10}{5} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U_1}{X_C} = \frac{10}{10} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

Kontrola výpočtu

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} = \sqrt{2^2 + 1^2} \text{ A} = \sqrt{5} \text{ A} = 2,23 \text{ A}$$

Fázový posun

$$\cos \varphi = \frac{R_s}{Z} = \frac{4}{8,94} = 0,447 = 63^\circ 25''$$

$$\sin \varphi = \sin 63^\circ 25' = 0,894$$

Kapacita kondenzátoru a indukčnost cívky zapojených v obvodu podle obr. 204 jsou

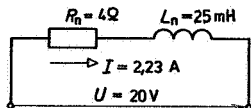
$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{314 \cdot 10} \text{ F} = 0,000 32 \text{ F} = 320 \mu\text{F}$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{10}{314} \text{ H} = 0,032 \text{ H}$$

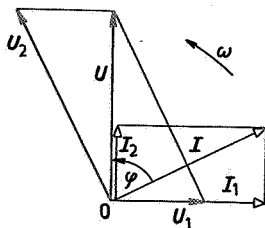
Obvod na obr. 204 je možné nahradit rezistorem s činným odporem R_n zapojeným v sérii s cívkou s indukční reaktancí X_{L_n} . Schéma náhradního obvodu je na obr. 206.

Činný odpor

$$R_n = Z \cos \varphi = 8,94 \cdot 0,447 \Omega = 4 \Omega$$



Obr. 206. Náhradní schéma obvodu na obr. 204



Obr. 207. Fázorový diagram obvodu proudu na obr. 204

Indukční reaktance

$$X_{Ln} = Z \sin \varphi = 8,94 \cdot 0,894 \, \Omega = 8 \, \Omega$$

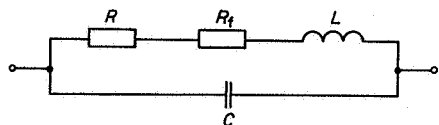
Indukčnost

$$L_n = \frac{X_{Ln}}{\omega} = \frac{8}{314} \, \text{H} = 0,025 \, \text{H} = 25 \, \text{mH}$$

▲ Fázorový diagram je na obr. 207.

17. NÁHRADNÍ SCHÉMA REZISTORU, CÍVKY A KONDENZÁTORU

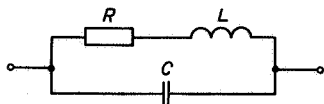
Rezistor má v obvodu střídavého proudu kromě *činného odporu* R ještě *odpor* R_f vlivem *povrchového jevu*. Povrchový jev (zvaný také *skinefekt*) způsobuje vlivem vlastní indukce uvnitř vodiče nerovnoměrné rozložení hustoty elektrického proudu ve vodiči. Největší hustota proudu je pod povrchem vodiče, 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



Obr. 208. Náhradní schéma skutečného rezistoru

a *kapacitní reaktanci* tvořenou kapacitou C mezi závity u rezistorů vinutých drátem a mezi vývody. V náhradním schématu rezistoru (obr. 208) kreslíme proto rezistory s odpory R , R_f a cívku s indukčností L v sérii a kondenzátor s kapacitou C k nim zapojený paralelně. Vlivem indukčností a kapacity se odpory rezistoru stanou závislými na kmitočtu.

Cívka v obvodu střídavého proudu má kromě *indukčnosti* L a *kapacity* C mezi závity ještě tzv. *ztrátový odpor*, jenž v sobě zahrnuje *činný odpor drátu*, kterým je cívka navinuta, *vliv povrchového jevu* a další *přídavné ztráty*. Náhradní schéma skutečné cívky je na obr. 209. Rezistor s odporem R a cívka s indukčností L jsou zapojeny v sérii a paralelně k nim je zapojen



Obr. 209. Náhradní schéma skutečné cívky

kondenzátor s kapacitou C . 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, neboť jsou to duální obvody. Působením ztrátového odporu R je fázový úhel svorkového napětí U na skutečné cívce menší než 90° , a to o úhel označený δ , tzv. ztrátový úhel. Tangens ztrátového úhlu se nazývá ztrátový činitel a označuje se $\operatorname{tg} \delta$. Převrácená hodnota ztrátového činitele je činitel jakosti Q .

Z fázorového diagramu pro sériové zapojení (obr. 202b) vyplývá

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_L} = \frac{IR_s}{IX_{L_s}} = \frac{R_s}{\omega L_s}$$

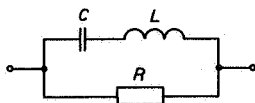
Z fázorového diagramu pro paralelní zapojení (obr. 202d) plyne

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_L} = \frac{\frac{U}{R_p}}{\frac{U}{\omega L_p}} = \frac{\omega L_p}{R_p}$$

Činitel jakosti

$$Q = \frac{\omega L_s}{R_s} = \frac{R_p}{\omega L_p}$$

Kondenzátor v obvodu střídavého proudu musíme považovat za součástku, která má kromě kapacity ještě další vlastnosti. Jsou to *izolační odpor* R_{iz} , *odpor způsobený povrchovým jevem* R_p , *odpor vyjadřující ztráty v dielektriku* R_d a *indukčnost fólií a přívodů* L . Indukčnost se projevuje zejména u svitkových kondenzátorů při vysokých kmitočtech; jinak k ní nepřihlížíme. Všechny odpory zahrnujeme do výsledného ztrátového odporu R . Náhradní schéma skutečného kondenzátoru je na obr. 210. Zanedbáme-li indukčnost, dostaneme zjednodušené schéma, v němž je kondenzátor s kapacitou C zapojený paralelně s rezistorem se ztrátovým odporem R (obr. 203a). Duální obvod tvoří kondenzátor, k němuž je v sérii zapojen rezistor (obr. 203c). Z fázorového diagramu na obr. 203b vidíme, že proud I_p je zpožděn za proudem I_c o úhel δ . Tangens úhlu δ se nazývá ztrátový činitel kondenzátoru. Stejný ztrátový úhel je na obr. 203d mezi svorkovým napětím U a napětím U_c . Pro paralelní i duální sériové zapojení dostaneme pro ztrátový činitel vztah



Obr. 210. Náhradní schéma skutečného kondenzátoru

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{U}{R_p}}{U \omega C_p} = \frac{1}{\omega R_p C_p}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{I R_s}{\frac{I}{\omega C_s}} = \omega R_s C_s$$

Převrácená hodnota ztrátového činitele je činitel jakosti

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \omega R_p C_p = \frac{1}{\omega R_s C_s}$$

Příklad 69: Jak velký je činitel jakosti Q cívky s indukčností 2 mH při kmitočtu 500 Hz v paralelním zapojení s rezistorem se ztrátovým odporem 150 Ω ?

$L = 2 \text{ mH} = 0,002 \text{ H}$, $f = 500 \text{ Hz}$, $R = 150 \Omega$

Indukční reaktance cívky

$$X_p = \omega L_p = 2\pi \cdot 500 \cdot 0,002 \Omega = 6,28 \Omega$$

Činitel jakosti

$$Q = \frac{R_p}{X_p} = \frac{150}{6,28} = 23,9$$

Příklad 70: Jak velký je ztrátový odpor R a kapacitní reaktance X_C kondenzátoru s kapacitou 31,8 μF pro sériové i paralelní zapojení, je-li ztrátový činitel 0,015 pro kmitočet 50 Hz?

$C = 31,8 \mu\text{F} = 31,8 \cdot 10^{-6} \text{ F}$, $\operatorname{tg} \delta = 0,015$, $f = 50 \text{ Hz}$

Ztrátový činitel pro sériové zapojení

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_s C_s$$

Ztrátový odpor v sériovém zapojení

$$R_s = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C_s} = \frac{0,015}{314 \cdot 31,8 \cdot 10^{-6}} \Omega = 1,5 \Omega$$

Kapacitní reaktance v sériovém zapojení

$$X_s = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 31,8 \cdot 10^{-6}} \Omega = 100 \Omega$$

Ztrátový odpor v paralelním zapojení

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} = \frac{1,5^2 + 100^2}{1,5} \Omega = 6668,17 \Omega$$

Kapacitní reaktance v paralelním zapojení

$$X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} = \frac{1,5^2 + 100^2}{100} \Omega = 100 \Omega$$

$$X_p = \frac{1}{\omega C_p}$$

Z toho

$$\omega C_p = \frac{1}{X_p} = \frac{1}{100 \Omega} = 0,01 \text{ S}$$

Ztrátový činitel pro paralelní zapojení

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_p C_p} = \frac{1}{6668,17 \cdot 0,01} = 0,015$$

Ztrátový činitel je stejný pro sériové i paralelní zapojení.

Příklad 71: Jak velká je indukčnost L cívky při kmitočtu 50 Hz, je-li činitel jakosti 40 a ztrátový odpor 50Ω při paralelním zapojení.

$Q = 40$, $R_p = 50 \Omega$, $f = 50 \text{ Hz}$

Činitel jakosti

$$Q = \frac{R_p}{X_p}$$

Z toho

$$X_p = \frac{R_p}{Q} = \frac{50}{40} \Omega = 1,25 \Omega$$

Indukčnost cívky

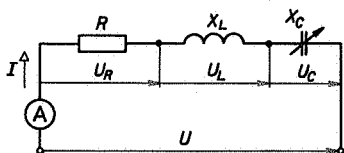
$$L_p = \frac{X_p}{\omega} = \frac{1,25}{2\pi \cdot 50} \text{ H} = 0,004 \text{ H}$$

Cívka má indukčnost $L = 4 \text{ mH}$.

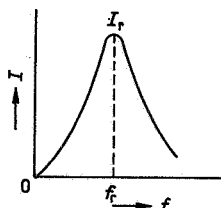
7.18. REZONANCE

V elektrických obvodech, které kromě rezistorů obsahují i cívky a kondenzátory, nastává při určitém kmitočtu stav, kdy indukční a kapacitní reaktance se vzájemně rovnají a kdy zdroj napětí zatěžují pouze rezistory. Tomuto stavu říkáme *rezonance*. Vyznačuje se tím, že svorkové napětí zdroje a proud z něho odebíraný jsou ve fázi.

Rezonance může obecně (za určitých podmínek) nastat v každém obvodu střídavého proudu. Podle zapojení použitých součástek vzhledem ke zdroji napětí dělíme rezonanční obvody na sériové a paralelní.



Obr. 211. Rezonanční sériový obvod střídavého proudu



Obr. 212. Průběh proudu v sériovém obvodu při rezonanci

7.18.1. Sériová rezonance

Na obr. 211 je složený obvod *RLC* s proměnnou kapacitou, do kterého je zapojen ampérmetr. Impedance obvodu je

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$$

Ze vzorce je patrné, že $X_C > X_L$. Budeme-li proměnnou kapacitu zvětšovat, bude se kapacitní reaktance zmenšovat, a tím se bude také zmenšovat i dvojiteln ($X_C - X_L$). V důsledku toho se bude zmenšovat také impedance obvodu a proud procházející obvodem se bude zvětšovat (budeme to pozorovat na ampérmetru). Při určité kapacitě dosáhne kapacitní reaktance velikosti indukční reaktance a dvojiteln ($X_C - X_L$) se bude rovnat nule. Tomuto stavu říkáme *sériová rezonance*. *Rezonanční impedance* Z_r bude *minimální* a bude se rovnat odporu rezistoru.

$$Z_r = \sqrt{R^2} = R$$

Při sériové rezonanci prochází obvodem *maximální proud*, který je ve *fázi se svorkovým napětím*.

$$I_r = \frac{U}{Z_r} = \frac{U}{R}$$

Při dalším zvětšování kapacity C bude kapacitní reaktance menší než indukční reaktance a dvojčlen $(X_C - X_L)$ se bude zvětšovat. Impedance obvodu se bude zvětšovat a proud v obvodu bude klesat.

Kdybychom popsaný pokus opakovali se zdrojem napětí s proměnlivým kmitočtem, zjistili bychom při stálé kapacitě C , že se při zvyšování kmitočtu proud v obvodu zvětšuje. Při určitém kmitočtu dosáhne proud zase maximální hodnoty a při dalším zvyšování kmitočtu proud v obvodu opět klesá. Závislost proudu na kmitočtu je znázorněna na obr. 212. Tento graf nazýváme rezonanční křivka proudu. Kmitočet, při němž obvodem prochází maximální proud I_r , se nazývá rezonanční kmitočet f_r . Při kmitočtu $f < f_r$ má impedance obvodu kapacitní charakter, kdežto při kmitočtu $f > f_r$ má charakter indukční.

Rezonanční kmitočet f_r určíme z rezonanční podmínky.

$$\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C}$$

Úhlový rezonanční kmitočet

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Dosadíme-li za $\omega_r = 2\pi f_r$, dostaneme rezonanční kmitočet

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Tomuto vztahu říkáme *Thomsonův vzorec*.

Při stálém kmitočtu f_r a při stálé kapacitě C nastane rezonance při indukčnosti

$$L_r = \frac{1}{\omega_r^2 C}$$

Při stálé indukčnosti L nastane rezonance při kapacitě

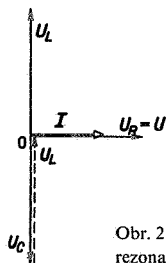
$$C_r = \frac{1}{\omega_r^2 L}$$

Při rezonanci jsou úbytky napětí na jednotlivých součástkách

$$U_{Rr} = U = I_r R$$

$$U_{Lr} = U_{Cr} = I_r X_{Lr} = I_r X_{Cr}$$

Při *sériové rezonanci* může být *napětí* na cívce L a kondenzátoru C několika-násobně *vyšší než svorkové napětí*. Obě napětí mohou ohrozit izolaci elektrických zařízení. Sériové rezonanci říkáme také *napětová rezonance*, neboť se při ní vzájemně ruší napětí na cívce a kondenzátoru (jak je vidět na fázorovém diagramu na obr. 213). Sériové rezonanční obvody se využívají jako laděné obvody v rozhlasových přijímačích, v televizorech, v navigačních systémech apod.



Obr. 213. Fázorový diagram pro sériový rezonanční obvod na obr. 211

Příklad 72: Určete, při kterém kmitočtu nastane rezonance v obvodu uvedeném v příkladu 63. V sérii jsou zapojeny součástky s těmito parametry: $R = 14,5 \Omega$, $L = 0,2 \text{ H}$, $C = 150 \mu\text{F}$, $U = 220 \text{ V}$.

Rezananční kmitočet

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{0,2 \cdot 150 \cdot 10^{-6}}} \text{ Hz} \doteq 29 \text{ Hz}$$

Proud při rezonanci

$$I_r = \frac{U}{R} = \frac{220}{14,5} \text{ A} = 15,2 \text{ A}$$

Indukční reaktance při rezonanci

$$X_L = \omega_r L = 2\pi f_r L = 2\pi \cdot 29 \cdot 0,2 \Omega = 36,5 \Omega$$

Kapacitní reaktance při rezonanci

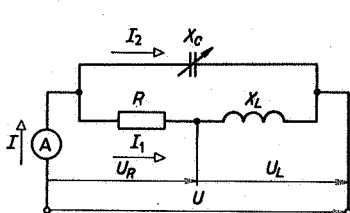
$$X_C = \frac{1}{\omega_r C} = \frac{1}{2\pi f_r C} = \frac{1}{2\pi \cdot 29 \cdot 150 \cdot 10^{-6}} \Omega = 36,5 \Omega$$

Napětí na rezistoru

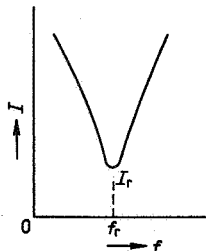
$$U_R = RI_r = 14,5 \cdot 15,2 \text{ V} = 220 \text{ V}$$

Napětí na cívce a kondenzátoru

$$U_L = U_C = X_L I_r = X_C I_r = 36,5 \cdot 15,2 \text{ V} \approx 555 \text{ V}$$



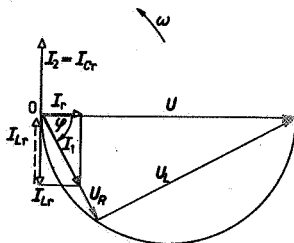
Obr. 214. Paralelní zapojení skutečné cívky s ideálním kondenzátorem C



Obr. 215. Průběh proudu v paralelním obvodu při rezonanci

7.18.2. Paralelní rezonance

Na obr. 214 je schéma paralelního obvodu, který se skládá z rezistoru s odporem R zapojeného v sérii s cívkou s indukčností L , k nimž je paralelně připojen kondenzátor s kapacitou C . Připojíme-li obvod ke zdroji napětí, u kterého bychom mohli měnit kmitočet, a sledujeme-li na ampérmetru proud procházející obvodem, zjistíme, že při zvyšování kmitočtu proud klesá. Při určitém kmitočtu je proud minimální. Při dalším zvyšování kmitočtu se proud v obvodu zvětšuje. Závislost proudu na kmitočtu, znázorňuje rezonanční křivka proudu na obr. 215. Fázorový diagram je na obr. 216. Řídicím fázorem je fázor svorkového napětí U . Fázor proudu I_1 ,



Obr. 216. Fázorový diagram pro paralelní rezonanční obvod na obr. 214

který prochází rezistorem s cívkou, je zpožděn za svorkovým napětím o úhel φ . Ve fázi s proudem I_1 je úbytek napětí U_R a úbytek napětí na cívce předbíhá proud I_1 o úhel 90° . Proud $I_2 = I_{Cr}$ předbíhá svorkové napětí U o úhel 90° . Proud I_1 rozložíme na dvě složky. Na složku I_r , která je ve fázi se svorkovým napětím U , a na složku I_{Lr} , která je v protifázi (v opačné fázi) s proudem I_{Cr} .

Rezonance v obvodu nastane, rovná-li se proud I_{Cr} proudu I_{Lr} . Proto paralelní rezonanci říkáme také proudová rezonance. Rezonanční kmitočet určíme z podmínky rezonance

$$I_{Lr} = I_{Cr}$$

$$I_{Lr} = I_1 \sin \varphi = \frac{U}{Z_1} \frac{X_L}{Z_1} = \frac{UX_L}{Z_1^2}$$

kde

$$Z_1^2 = R^2 + (\omega_r L)^2$$

$$I_{Cr} = U \omega_r C$$

$$\frac{UX_L}{Z_1^2} = U \omega_r C$$

$$\frac{\omega_r L}{R^2 + (\omega_r L)^2} = \omega_r C$$

$$\frac{L}{C} = R^2 + (\omega_r L)^2$$

$$L = CR^2 + \omega_r^2 L^2 C$$

$$L - CR^2 = \omega_r^2 L^2 C$$

Z toho rezonanční úhlový kmitočet

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}$$

Rezonanční kmitočet

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}$$

Je-li odpor R malý, je R^2/L^2 zanedbatelné. Potom platí

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

což je Thomsonův vzorec.
Rezonanční impedance

$$Z_r = \frac{L}{CR}$$

Proud při rezonanci

$$I_r = \frac{U}{Z_r}$$

je minimální, ale proud v rezonančním obvodu může dosáhnout nebezpečné velikosti, jak je patrné z fázorového diagramu. Při stálém rezonančním kmitočtu a stálé indukčnosti nastává rezonance při kapacitě

$$C_r = \frac{L}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

Paralelní rezonanční obvody se používají v elektronice, např. k zamezení vstupu střídavého proudu s nežádoucím kmitočtem do dalšího obvodu, zejména v ladicích a vazebních obvodech v rozhlasových přijímačích a televizorech.

Příklad 73: Určete rezonanční kmitočet pro obvod, ve kterém je zapojen rezistor s činným odporem 40Ω v sérii s cívkou s indukčností $0,6 \text{ H}$ a paralelně k nim je připojen kondenzátor s kapacitou $50 \mu\text{F}$; napětí zdroje je 220 V , kmitočet 50 Hz .

$R = 40 \Omega$, $L = 0,6 \text{ H}$, $C = 50 \mu\text{F} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ F}$, $U = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$
Rezonanční kmitočet

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\frac{1}{0,6 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} - \frac{40^2}{0,6^2}}} \text{ Hz} = 27,06 \text{ Hz}$$

Rezonanční kmitočet podle Thomsonova vzorce

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{0,6 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}} \text{ Hz} = 29,07 \text{ Hz}$$

Indukční rezonanční reaktance

$$X_{Lr} = \omega_r L = 2\pi \cdot 27,06 \cdot 0,6 \Omega = 102 \Omega$$

Rezonanční impedance

$$Z_r = \frac{L}{CR} = \frac{0,6}{50 \cdot 10^{-6} \cdot 40} \Omega = 300 \Omega$$

Rezonanční proud

$$I_r = \frac{U}{Z_r} = \frac{220}{300} \text{ A} = 0,73 \text{ A}$$

Kontrola výpočtu

Impedance součástek zapojených v sérii

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + X_{Lr}^2} = \sqrt{40^2 + 102^2} \Omega = 109,56 \Omega$$

Proud procházející obvodem s impedancí Z_1

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{220}{109,56} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

Kapacitní rezonanční reaktance

$$X_{Cr} = \frac{1}{\omega_r C} = \frac{1}{2\pi \cdot 27,06 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} \Omega = 17,7 \Omega$$

Proud procházející obvodem s kondenzátorem při rezonanci

$$I_{Cr} = \frac{U}{X_{Cr}} = \frac{220}{17,7} \text{ A} = 1,86 \text{ A}$$

$$\sin \varphi_1 = \frac{X_{Lr}}{Z_1} = \frac{102 \Omega}{109,56 \Omega} = 0,9309$$

$$\cos \varphi_1 = 0,3650$$

Proud I_{Lr}

$$I_{Lr} = I_1 \sin \varphi_1 = 2 \cdot 0,931 \text{ A} = 1,86 \text{ A} = I_{Cr}$$

Rezonanční proud

$$I_r = I_1 \cos \varphi_1 = 2 \cdot 0,365 \text{ A} = 0,73 \text{ A}$$

7.19. VÝKON A PRÁCE V OBVODU STŘÍDAVÉHO PROUDU

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

$$p = ui$$

Na obr. 217 je grafické znázornění časového průběhu výkonu střídavého sinusového napětí a střídavého sinusového proudu, který je s napětím ve fázi. Okamžitý výkon v kladné i záporné polovině periody je 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 opačný směr, je jejich součin kladný. Obsah plochy omezené osou času a sinusoidou výkonu znamená práci střídavého proudu za periodu při proměnném výkonu. Přeměníme-li tuto plochu na obdélník se základnou T , odpovídá jeho výška střednímu výkonu P za jednu periodu.

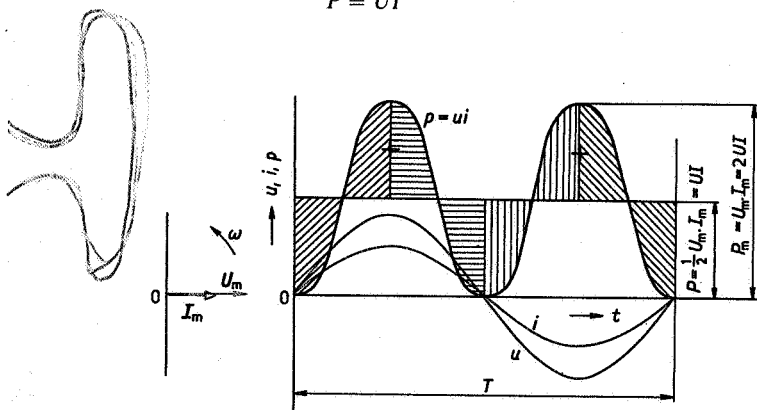
Střední výkon

$$P = \frac{1}{2} U_m I_m$$

Dosadíme-li za $U_m = \sqrt{2}U$ a $I_m = \sqrt{2}I$, dostaneme

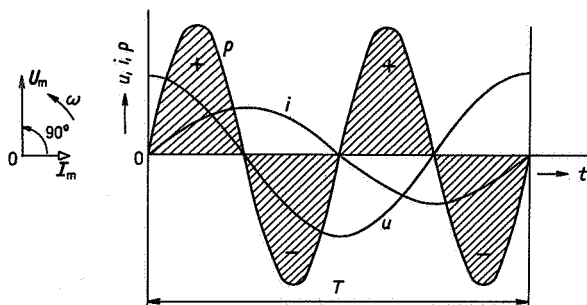
$$P = \frac{1}{2} \sqrt{2}U \sqrt{2}I$$

$$P = UI$$



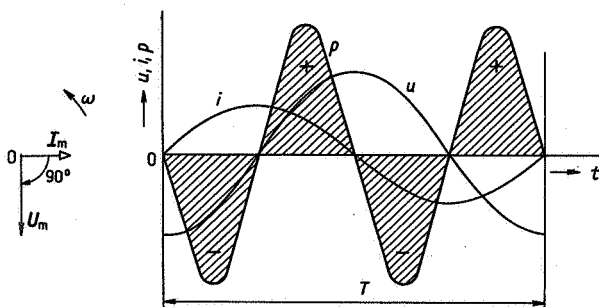
Obr. 217. Okamžitý výkon střídavého (sinusového) proudu, který je ve fázi s napětím

Výkon střídavého proudu je dán součinem efektivních hodnot napětí a proudu. Tento vztah platí pouze tehdy, jsou-li proud a napětí ve fázi, tj. platí v obvodu, ve kterém jsou zapojeny jenom spotřebiče s činným odporem (žárovky, topná tělesa apod.).



Obr. 218. Okamžitý výkon střídavého (sinusového) proudu, který je zpožděn za napětím o 90°

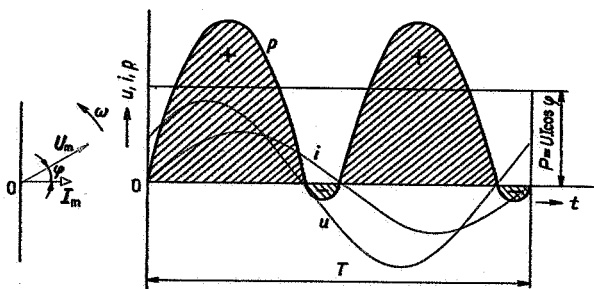
Na obr. 218 je časový průběh okamžitého výkonu v obvodu střídavého proudu, který je za střídavým napětím zpožděn o 90° , tzn. výkonu proudu, který prochází ideální cívkou. Z grafu vidíme, že okamžitý výkon $p = ui$ má v jedné čtvrtině periody hodnotu kladnou a v následující čtvrtině periody hodnotu zápornou. Střední hodnota práce za celou periodu je nulová. V cívce se vlivem indukčnosti během jedné čtvrtiny periody vytváří



Obr. 219. Okamžitý výkon střídavého proudu (sinusového), který předbíhá napětí o 90°

magnetické pole a práce proudu se mění na energii magnetického pole. Během druhé čtvrtiny periody magnetické pole zaniká a jeho energie se elektromagnetickou indukcí mění na elektrickou energii a vrací se do zdroje.

Na obr. 219 je časový průběh okamžitého výkonu, je-li do obvodu zapojen ideální kondenzátor s dokonale nevodivým dielektrikem. V takovém případě proud předbíhá napětí o 90° . Kondenzátor se během jedné čtvrtiny periody nabíjí a mezi deskami kondenzátoru vzniká elektrické pole. Elektrická práce proudu se mění na energii elektrického pole. Během druhé čtvrtiny periody se kondenzátor vybíjí, elektrické pole zaniká a jeho energie se mění v elektrickou energii, která se vrací do zdroje. Střední hodnota práce střídavého proudu, který předbíhá napětí o 90° , je nulová.



Obr. 220. Okamžitý výkon střídavého (sinusového) proudu, který je zpožděn za napětím o úhel φ

Na obr. 220 je znázorněn okamžitý výkon pro fázový posun napětí před proudem o úhel φ , tj. pro obvod, ve kterém převládá indukčnost. Odebírá-li se výkon, odebírá se i energie ze zdroje, která se ve spotřebiči mění jednak na užitečnou práci, jednak na energii k vybudování magnetického pole. Jakmile se začne proud zmenšovat, magnetické pole slábne, jeho energie se uvolňuje, tj. mění se v elektrickou energii a vrací se do zdroje.

Výkon střídavého proudu při fázovém posunu φ určíme, rozložíme-li fázor proudu I ve fázorovém diagramu (obr. 221) na dvě složky. Jedna složka je ve fázi s napětím (je to tzv. proud činný, $I_c = I \cos \varphi$) a druhá složka je kolmá k napětí (je to tzv. proud jalový, $I_j = I \sin \varphi$).

Sečteme-li v časovém diagramu na obr. 221 okamžité hodnoty i_c a i_j , dostaneme průběh proudu, který prochází elektrickým obvodem. Obě složky proudu, I_c a I_j , jsou jen teoretické, neboť je nemůžeme změřit.

Elektrickou práci koná pouze činný proud I_e , takže činný výkon je

$$P = UI_e = UI \cos \varphi$$

Činný výkon se měří wattmetrem a udává se ve wattech (W), v kilowattech (kW) nebo v megawattech (MW).

Z uvedeného vztahu vidíme, že činný výkon závisí na úhlu fázového posunu φ mezi proudem a napětím. Je úměrný $\cos \varphi$, a proto se $\cos \varphi$ nazývá účinník.

Jalový proud I_j je zpožděn za napětím o 90° . Nekoná práci, ale vytváří magnetické (elektrické) pole a tzv. jalový výkon

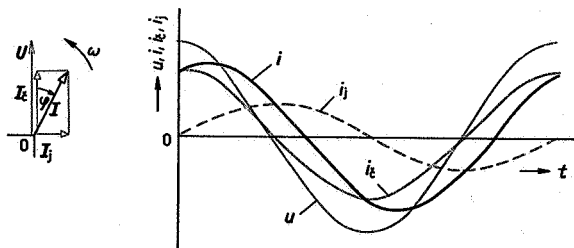
$$Q = UI_j = UI \sin \varphi$$

Jalový výkon se udává ve varech (var), kilovarech (kvar) nebo megavarech (Mvar).

V rovnicích pro činný i jalový výkon se vyskytuje součin UI . Tomuto součinu efektivních hodnot napětí a proudu říkáme zdánlivý výkon. Označuje se S a platí pro něj vztah

$$S = UI$$

Zdánlivý výkon je pojem elektrický; je velmi důležitý, neboť se podle něj dimenzují elektrické stroje a elektrorozvodné sítě a určuje se podle něj skutečný proud. Zdánlivý výkon se počítá z údajů voltmetru a ampérmetru. Jednotkou je volt ampér (V . A) a jeho násobky (kV . A, MV . A). Činný výkon se rovná zdánlivému výkonu při účinníku $\cos \varphi = 1$.



Obr. 221. Fázový diagram pro střídavý obvod, v němž napětí předbíhá proud o úhel φ , a časový průběh napětí u a proudů i_e , i_j , i

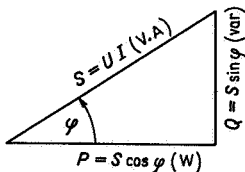
Znásobíme-li proudy z fázorového diagramu (obr. 221) napětím, dostaneme trojúhelník výkonů (obr. 222). Podle něho platí

$$P = S \cos \varphi = UI_{\text{e}}$$

$$Q = S \sin \varphi = UI_{\text{j}}$$

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

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad \sin \varphi = \frac{Q}{S}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}$$



Obr. 222. Trojúhelník výkonů střídavého proudu

Elektrickou práci střídavého proudu určíme, násobíme-li činný výkon časem

$$W = Pt = UI \cos \varphi t$$

Elektrickou práci měříme elektroměrem. Jednotkou elektrické práce je joule (J), ale častěji se udává v jednotce watt sekunda (W . s) (1 J = 1 W . s). Větší jednotky jsou watt hodina (W . h) nebo kilowatt hodina (kW . h).

Příklad 74: Jednofázový elektromotor s výkonem 300 W, účinností 85 % a účinnkem 0,75 je připojen na napětí 220 V, 50 Hz. Určete

- činný, zdánlivý a jalový příkon;
- proud odebíraný ze zdroje; činný a jalový proud;
- práci odebíranou ze zdroje za 30 dní, pracuje-li elektromotor denně 8 hodin.

$$P_2 = 300 \text{ W}, \quad \eta = 85 \% = 0,85, \quad \cos \varphi = 0,75, \quad U = 220 \text{ V}, \quad f = 50 \text{ Hz}$$

Činný příkon

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{300}{0,85} \text{ W} = 353 \text{ W}$$

Proud odebíraný ze zdroje

$$I = \frac{P_1}{U \cos \varphi} = \frac{353}{220 \cdot 0,75} \text{ A} = 2,14 \text{ A}$$

Zdánlivý výkon

$$S_1 = UI = 220 \cdot 2,14 \text{ V} \cdot \text{A} = 470,8 \text{ V} \cdot \text{A}$$

$$\cos \varphi = 0,75, \quad \sin \varphi = 0,661$$

Jalový výkon

$$Q_1 = S_1 \sin \varphi = 470,8 \cdot 0,661 \text{ var} = 311 \text{ var}$$

Činný proud

$$I_e = I \cos \varphi = 2,14 \cdot 0,75 \text{ A} = 1,6 \text{ A}$$

Jalový proud

$$I_j = I \sin \varphi = 2,14 \cdot 0,661 \text{ A} = 1,4 \text{ A}$$

Práce odebraná ze zdroje

$$W = P_1 t = 353 \cdot 30 \cdot 8 \text{ W} \cdot \text{h} = 84\,720 \text{ W} \cdot \text{h} = 84,7 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

▼ **Příklad 75:** U cívky, připojené na napětí 220 V, 50 Hz, s indukčností 300 mH a s činitelem jakosti 25 určete:

a) proud odebíraný ze zdroje; činný a jalový proud;

b) zdánlivý, činný a jalový výkon.

$$U = 220 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}, L = 300 \text{ mH} = 0,3 \text{ H}, Q = 25$$

Indukční reaktance

$$X_L = \omega L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,3 \Omega = 94,2 \Omega$$

Činitel jakosti

$$Q = \frac{\omega L_s}{R_s}$$

z toho

$$R_s = \frac{\omega L_s}{Q} = \frac{94,2}{25} \Omega = 3,8 \Omega$$

Impedance cívky

$$Z = \sqrt{R_s^2 + X_L^2} = \sqrt{3,8^2 + 94,2^2} \Omega = 94,3 \Omega$$

Proud odebíraný ze zdroje

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{94,3} \text{ A} = 2,3 \text{ A}$$

$$\cos \varphi = \frac{R_s}{Z} = \frac{3,8}{94,3} = 0,040$$

$$\varphi \doteq 87^\circ 40' \quad \sin 87^\circ 40' = 0,999$$

Činný proud

$$I_{\phi} = I \cos \varphi = 2,3 \cdot 0,040 \text{ A} = 0,09 \text{ A}$$

Jalový proud

$$I_j = I \sin \varphi = 2,3 \cdot 0,999 \text{ A} = 2,29 \text{ A}$$

Zdánlivý výkon

$$S = UI = 220 \cdot 2,3 \text{ V} \cdot \text{A} = 506 \text{ V} \cdot \text{A}$$

Činný výkon

$$P = S \cos \varphi = 506 \cdot 0,04 \text{ W} = 20,2 \text{ W}$$

Jalový výkon

▲ $Q = S \sin \varphi = 506 \cdot 0,999 \text{ var} = 505,5 \text{ var}$

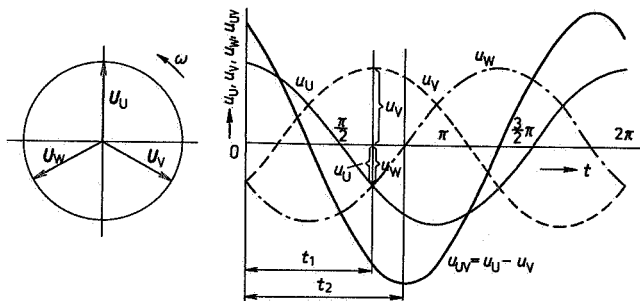
▼ 7.20. OTÁZKY A CVIČENÍ

- ▲
1. Co jsou to duální obvody střídavého proudu a kterým podmínkám musí vyhovovat?
 2. Ze kterých prvků se skládá náhradní schéma rezistoru? Jak jsou tyto prvky zapojeny?
 3. Ze kterých prvků se skládá náhradní schéma skutečné cívky? Jak jsou tyto prvky zapojeny?
 4. Ze kterých prvků se skládá náhradní schéma skutečného kondenzátoru? Jak jsou tyto prvky zapojeny?
 5. Co to je ztrátový činitel? Jak jej označujeme?
 6. Co je to činitel jakosti? Jak jej označujeme?
 7. Jak se mění indukční a kapacitní reaktance při změně kmitočtu?
 8. Co je to rezonance obvodu střídavého proudu?
 9. Kdy nastane rezonance v sériovém obvodu střídavého proudu?
 10. Čemu se rovná impedance sériového obvodu při rezonanci?
 11. Jaký proud prochází sériovým obvodem při rezonanci – minimální nebo maximální?
 12. Co udává Thomsonův vzorec? Jak zní?
 13. Popište schéma paralelního rezonančního obvodu.
 14. Kdy nastane rezonance v paralelním obvodu střídavého proudu?
 15. Jaký proud prochází paralelním obvodem při rezonanci – minimální nebo maximální?
 16. Za jaké podmínky platí Thomsonův vzorec i pro paralelní rezonanční obvod?
 17. Co to je zdánlivý výkon, čím ho měříme a jaká je jeho jednotka?

18. Z jakého vztahu určíme činný výkon střídavého proudu, čím ho měříme a jaká je jeho jednotka?
19. Co je to účinník?
20. Z jakého vztahu určíme jalový výkon střídavého proudu a jaká je jeho jednotka?
21. Jaký význam má jalový výkon a zdánlivý výkon?
22. Jak se kreslí trojúhelník výkonů?
23. Co to je činný a jalový proud?
24. Z jakého vztahu vypočítáme zdánlivý výkon, známe-li činný a jalový výkon?
25. Z jakého vztahu určíme elektrickou práci střídavého proudu, čím ji měříme a jaká je její jednotka?
- ▼ 26. Sériový obvod, ve kterém je zapojen rezistor s činným odporem $50\ \Omega$ a cívka s indukčností $0,5\ \text{H}$, máme nahradit paralelním obvodem pro kmitočet $50\ \text{Hz}$ a napětí $220\ \text{V}$. Určete R_p a X_p .
27. Paralelní obvod složený z rezistoru s činným odporem $10\ \Omega$ a z kondenzátoru s kapacitní reaktancí $20\ \Omega$ máme nahradit sériovým obvodem pro kmitočet $50\ \text{Hz}$ a napětí $24\ \text{V}$. Určete R_s a X_s .
28. Jak velký je ztrátový činitel pro kondenzátor s kapacitou $1000\ \text{pF}$ při kmitočtu $1\ \text{kHz}$, je-li ztrátový odpor $79,62\ \Omega$?
29. Jak velký je činitel jakosti a ztrátový činitel u cívky s indukčností $0,5\ \text{H}$ a odporem $2\ \Omega$ pro kmitočet $50\ \text{Hz}$?
30. Určete rezonanční kmitočet pro sériový obvod popsany ve cvičení 16 v části 7.15. Dále určete proud při rezonanci I_r a napětí U_L a U_C .
31. Rezistor s činným odporem $40\ \Omega$ je zapojen v sérii s cívkou s indukčností $0,5\ \text{H}$ a paralelně k nim je připojen kondenzátor s kapacitou $100\ \mu\text{F}$. Obvod je připojen na napětí $120\ \text{V}$, $50\ \text{Hz}$. Určete rezonanční kmitočet, rezonanční impedanci a proudy I_r , I_C , I_L .
32. Elektrickým obvodem připojeným na napětí $220\ \text{V}$, $50\ \text{Hz}$, prochází proud $10\ \text{A}$ při $\cos \varphi = 0,8$. Určete zdánlivý, činný a jalový příkon.
33. Určete zdánlivý, činný a jalový příkon elektrického obvodu popsaného ve cvičení 16, v části 7.15.
34. Obvod s impedancí $40\ \Omega$ je připojen na střídavé napětí $120\ \text{V}$. Proud, který prochází obvodem, je zpožděn za napětím o úhel 30° . Vypočítejte zdánlivý, činný a jalový příkon a účinník.
- ▲ 35. Spotřebič s příkonem $2\ \text{kW}$ je připojen na střídavé napětí $220\ \text{V}$ a odbírá proud $12\ \text{A}$. Určete účinník, zdánlivý a jalový příkon a činný a jalový proud.

7.21. TROJFÁZOVÁ SOUSTAVA

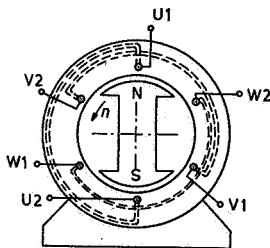
Trojfázová soustava má tři stejně velká napětí sinusového průběhu, jejichž časové průběhy jsou vzájemně posunuty o 120° , tj. o $\frac{1}{3}$ periody (obr. 223).



Obr. 223. Časový průběh trojfázového napětí

Taková trojfázová napětí vznikají v trojfázových generátorech, jejichž principiální uspořádání je na obr. 224. Generátor se skládá z nehybné části, zvané stator, a z otočné části, zvané rotor. Uvnitř statoru jsou uloženy v drážkách cívky vinutí tři fází. Na obr. 224 jsou cívky znázorněny pouze jedním závitem. Začátky vinutí (fáze) jsou označeny U1, V1, W1, konce vinutí U2, V2, W2. Cívky fází jsou na statoru vzájemně posunuty o 120° . V dutině statoru se otáčí rotor, který je dvojpólový. Cívka na rotoru je napájena stejnosměrným proudem, takže se polarita pólů nemění. Pólové nástavce mají takový tvar, že magnetická indukce má pod póly sinusový průběh (obr. 151b).

Otáčí-li se rotor, otáčí se také jeho magnetické pole. Přitom protíná vodiče vinutí na statoru a indukuje v nich střídavé sinusové napětí. V trojfázovém



Obr. 224. Konstruktivní uspořádání generátoru na střídavý proud

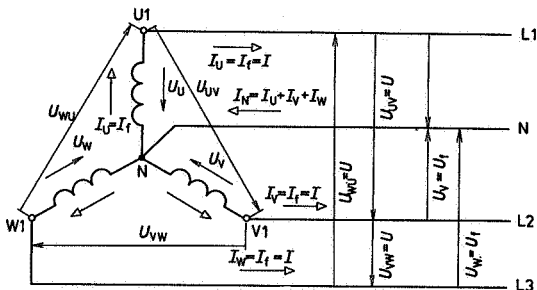
vinutí se indukují tři samostatná napětí, U_U , U_V , U_W , vzájemně posunutá o 120° .

Fázorový diagram pro trojfázové napětí kreslíme tak, jak je to na obr. 223, tj. pro okamžik, kdy má napětí ve fázi U maximální hodnotu. Z časového průběhu vidíme, že napětí ve fázi V dosáhne maximální hodnoty později než napětí fáze U, a to o dobu odpovídající fázovému úhlu 120° . Napětí fáze W má maximální hodnotu později než napětí fáze U o dobu odpovídající fázovému posunu 240° . Fázory ve fázorovém diagramu kreslíme proto také vzájemně posunutě o 120° .

Z časového průběhu trojfázového napětí vidíme, že algebraický součet okamžitých hodnot se v kterémkoli okamžiku rovná nule. Např. v době t_1 ve fázi W je okamžitá hodnota indukovaného napětí maximální a kladná; ve fázi U a W jsou okamžité hodnoty záporné a každá se rovná polovině maximální hodnoty napětí ve fázi V. V době t_2 je napětí ve fázi W nulové, ve fázi U záporné, ve fázi V kladné, ale tato napětí jsou stejně velká, takže jejich součet se rovná nule. Tato vlastnost trojfázové soustavy, tj. skutečnost, že v každém okamžiku se algebraický součet indukovaných napětí rovná nule, umožňuje spojovat trojfázové vinutí generátorů (transformátorů) do hvězdy nebo do trojúhelníku, což je výhodné z hlediska přenosu elektrické energie. Místo šesti vodičů stačí jen tři nebo čtyři vodiče. Přenos třemi vodiči se uskutečňuje zejména při vysokém a velmi vysokém napětí.

7.21.1. Spojení trojfázového vinutí do hvězdy

Trojfázový generátor schematicky zobrazujeme jako tři cívky vzájemně pootočené o 120° (obr. 225). Spojení fází do hvězdy se označuje Y. Vznikne tak sdružená trojfázová soustava. Při spojení vinutí do hvězdy spojujeme



Obr. 225. Spojení fází generátoru do hvězdy

fáze (cívky) do jednoho bodu, tzv. uzlu, a to buď začátky, nebo konce všech tří fází. Uzel se nazývá také *nulový bod* a vodič z něho vyvedený je *střední vodič* N. Na obr. 225 jsou do jednoho bodu zapojeny všechny tři konce fází. Začátky fází, U1, V1, W1, jsou vyvedeny na svorky generátoru, na které jsou připojeny tři vodiče – L1, L2, L3, jimž říkáme *fázové vodiče*. Tak dostaneme trojfázovou sdruženou čtyřvodičovou soustavu.

Každá fáze generátoru má své fázové napětí, U_U , U_V , U_W , které naměříme mezi začátkem fáze a uzlem nebo mezi fázovým a středním vodičem. Kromě toho jsou zde ještě sdružená napětí U_{UV} , U_{VW} , U_{WU} , která naměříme mezi začátky jednotlivých fází nebo mezi fázovými vodiči. *Fázové napětí* se označuje U_f a sdružené napětí U_s nebo U . Platí

$$U_f = U_U = U_V = U_W$$

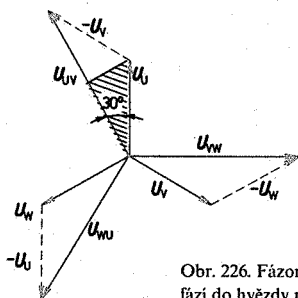
$$U_s = U = U_{UV} = U_{VW} = U_{WU}$$

Ve schématu na obr. 225 je kladný směr napětí zvolen od začátku každé fáze k jejímu konci (k uzlu). Sdružené napětí určíme podle druhého Kirchhoffova zákona. Pro sdružené napětí U_{UV} platí

$$U_{UV} + U_V - U_U = 0$$

$$U_{UV} = U_U - U_V$$

Sdružené napětí je dáno geometrickým rozdílem napětí dvou fází. Je to proto, že vinutí dvou fází jsou spojena proti sobě, a proto se jejich napětí odečítají. Na obr. 223 je znázorněno sdružené napětí U_{UV} sinusoidou, která byla sestavena pomocí okamžitých hodnot u_U a u_V . Velikost sdruženého napětí určíme z fázorového diagramu (obr. 226). přičteme-li k fázoru U_U



Obr. 226. Fázorový diagram pro spojení fází do hvězdy na obr. 225

opačně vzatý fázor $\mathbf{U}_v$. Výslednice je fázor sdruženého napětí $\mathbf{U}_{uv}$. Z pravoúhlého trojúhelníku, který je na obr. 226 vyšrafován, vyplývá

$$\frac{U_{uv}}{2} = U_u \cos 30^\circ = U_u \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$U_{uv} = \sqrt{3} U_u$$

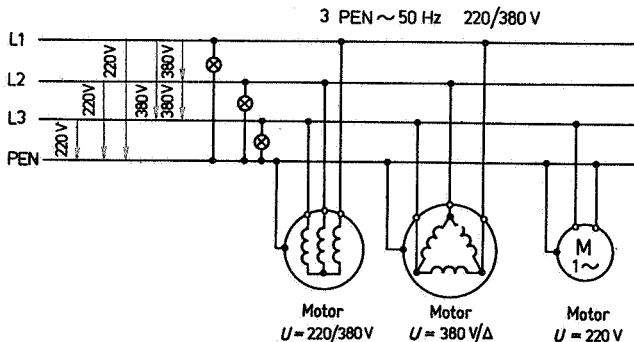
Obecně pro všechny tři fáze platí

$$U_s = U = \sqrt{3} U_f \doteq 1,73 U_f$$

Při spojení vinutí do hvězdy je sdružené napětí $\sqrt{3}$ krát větší než napětí fázové. Při tomto spojení fáze zdroje napětí s vyvedeným středním vodičem je tedy v síti dvojnásobek napětí. Mezi libovolným fázovým vodičem a středním vodičem je fázové napětí U_f a mezi libovolnými dvěma fázovými vodiči je sdružené neboli síťové napětí $U_s = U$.

U nás je normalizované napětí $3 \times 220/380 \text{ V}$ (obr. 227). Na fázové napětí 220 V připojujeme drobné spotřebiče, tj. žárovky, zářivky, vařiče, rozhlasové přijímače, televizory apod. Na sdružené napětí 380 V připojujeme trojfázové spotřebiče, tj. elektromotory, sporáky; akumulární kamna s větším příkonem apod. V sítích s napětím $3 \times 220/380 \text{ V}$ spojíme vinutí spotřebičů buď do hvězdy, nebo do trojúhelníku, podle jmenovitého napětí.

Trojfázové spotřebiče zatěžují rozvodnou síť souměrně, tzn. ze všemi fázovými vodiči sítě prochází stejně velký proud. Ve fázorovém diagramu



Obr. 227. Způsoby zapojení spotřebičů na síť $3 \times 220/380 \text{ V}$

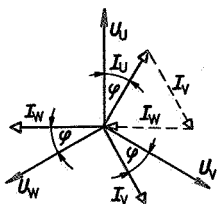
(obr. 228) jsou fázory proudů I_U , I_V a I_W stejně dlouhé, jsou vzájemně natočeny o 120° a s fázovým napětím svírají úhel φ . Jejich geometrický součet se rovná nule.

$$I_U + I_V + I_W = 0$$

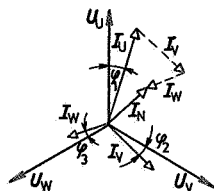
Znamená to, že středním vodičem neprochází žádný proud, $I_0 = 0$ A. Střední vodič se v tomto případě pro přenos elektrické energie nevyužívá a připojuje se pouze k vodivé kostře spotřebiče jako ochranný vodič. Nazývá se nulovací vodič a označuje se PEN. Drobné spotřebiče rozdělujeme pokud možno rovnoměrně do všech tří fází, ale při odběru elektrické energie není síť souměrně zatížena. Při nesouměrném zatížení procházejí fázovými vodiči různé velké proudy a nulovacím vodičem prochází proud rovnající se geometrickému součtu proudů v jednotlivých fázích. Z fázového diagramu na obr. 229 vyplývá

$$I_U + I_V + I_W = I_N$$

Proud v nulovacím vodiči je vždy menší než proudy ve fázových vodičích. Nulovací vodič se nesmí nikdy nikde přerušit, ani se do něho nesmějí zapojovat pojistky. Na nulovací vodič jsou připojeny vodivé kostry elektrických spotřebičů a po jeho přerušení nebo vypnutí by bylo přerušeno ochranné uzemnění.



Obr. 228. Fázorový diagram pro souměrné zatížení trojfázové soustavy

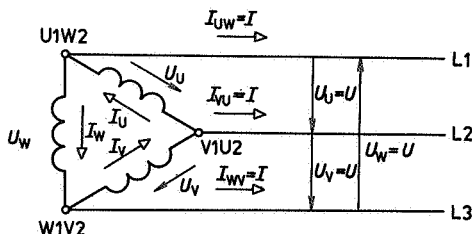


Obr. 229. Fázorový diagram pro nesouměrné zatížení trojfázové soustavy

7.21.2. Spojení trojfázového vinutí do trojúhelníku

Při spojení trojfázového vinutí *do trojúhelníku* je spojen vždy *konec jedné fáze se začátkem následující fáze*, takže vinutí generátoru (transformátoru) tvoří *uzavřený obvod* (obr. 230). Konec fáze U2 je spojen se začátkem fáze V1, podobně jsou spojeny V2 s W1 a W2 s U1. Nulovací vodič zde není, a proto je rozvodná síť třívodičová. Mezi vyvedenými fázovými vo-

diči L1, L2 a L3 je napětí jedné fáze generátoru (transformátoru), takže se síťové napětí rovná fázovému napětí, $U_s = U = U_f$. Fázemi generátoru (transformátoru) prochází při zatížení fázový proud I_U, I_V, I_W a u každé fáze je kladný směr proudu od konce fáze k jejímu začátku. Kladný směr fázového napětí U_U, U_V, U_W je od začátku ke konci každé fáze. Fázový (síťový) vodič je vždy připojen ke společné svorce dvou fází, a proto je síťový proud I proud sdružený. Jeho kladný směr je od svorky generátoru ke spotřebiči.



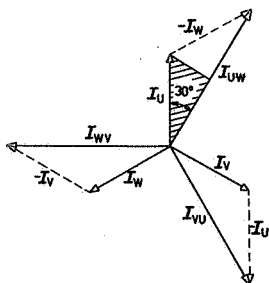
Obr. 230. Spojení fází generátoru do trojúhelníku

Velikost sdruženého proudu v síti určíme z fázorového diagramu na obr. 231. Podle prvního Kirchhoffova zákona platí

$$I_U - I_W - I_{UW} = 0$$

$$I_{UW} = I_U - I_W = I$$

Sdružený (síťový) proud je ve fázorovém diagramu dán geometrickým součtem proudů dvou fází. K fázovému proudu I_U přičteme zápornou



Obr. 231. Fázorový diagram pro spojení fází do trojúhelníku z obr. 230

hodnotu proudu I_W a výslednice je hledaný proud, $I_{UW} = I$. Z pravoúhlého trojúhelníku vyplývá

$$\frac{I_{UW}}{2} = I_U \cos 30^\circ = I_U \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$I_{UW} = I_U \sqrt{3} = I \doteq 1,73I_f$$

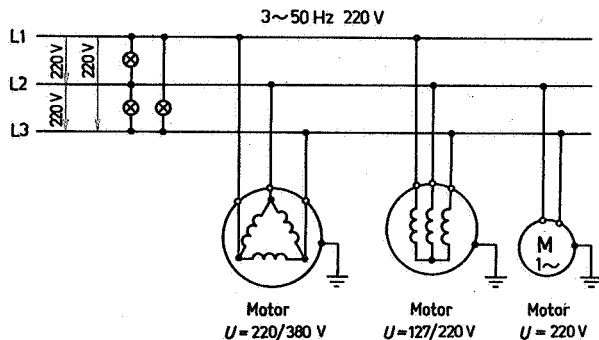
Síťový proud je při spojení vinutí generátoru do trojúhelníku $\sqrt{3}$ krát větší než fázový proud generátoru (transformátoru).

V třívodičové síti zapojujeme opět drobné spotřebiče rovnoměrně mezi tři fáze (obr. 232). Při nesouměrném zatížení jsou proudy v jednotlivých fázích různě velké a jejich fázory ve fázorovém diagramu nesvírají přesně úhel 120° . Trojfázové spotřebiče mohou mít vinutí spojené buď do hvězdy, nebo do trojúhelníku, podle toho, na jaké jmenovité napětí jsou vinutí zhotovena. Při spojení vinutí spotřebiče do hvězdy se napětí na každé fázi rovná síťovému napětí dělenému $\sqrt{3}$ a každou fází prochází sdružený neboli síťový proud. Je-li vinutí spotřebiče spojeno do trojúhelníku, je na každé fázi síťové napětí a fází spotřebiče prochází fázový proud, který se rovná síťovému proudu dělenému $\sqrt{3}$.

$$I_f = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

a z toho

$$I = \sqrt{3}I_f \doteq 1,73I_f$$



Obr. 232. Způsoby zapojení spotřebičů na síť $3 \times 220 \text{ V}$

Trojfázové spotřebiče můžeme tedy v čtyřvodičové nebo třívodičové síti spojovat jak do hvězdy, tak do trojúhelníku. Záleží pouze na tom, na jaká jmenovitá napětí jsou spotřebiče zhotoveny.

7.22. VÝKON A PRÁCE V TROJFÁZOVÉ SOUSTAVĚ

Výkon v trojfázové soustavě je dán součtem výkonů 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 φ je fázový posun mezi fázovým napětím U_f a fázovým proudem I_f .
Při *souměrném zatížení* trojfázové soustavy je tedy činný výkon

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

Zpravidla počítáme výkon v trojfázové soustavě pomocí sdružených napětí a proudů. Při spojení fází generátoru (transformátoru) do hvězdy, tj. ve čtyřvodičové síti, je fázové napětí $U_f = U/\sqrt{3}$ a fázový proud $I_f = I$, kde U a I jsou sdružené hodnoty. Potom činný výkon přenášený trojfázovou soustavou je

$$P = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I \cos \varphi = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

Při spojení fází do trojúhelníku je fázové napětí a fázový proud

$$U_f = U \quad \text{a} \quad I_f = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Činný výkon je tedy

$$P = 3U \frac{I}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

Výkon v trojfázové soustavě při *souměrném zatížení* vždy určíme ze vztahu

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

ať jsou fáze spojeny do hvězdy, nebo do trojúhelníku, dosadíme-li do něho sdružené hodnoty napětí a proudu.

Účinník při *souměrném zatížení* trojfázové soustavy je vždy *cosinus úhlu φ fázového posunu* mezi napětím a proudem. Při *nesouměrném zatížení* jsou



žalové uhly jednotlivých fází různé a nelze mluvit o cosinu φ trojfázové soustavy. Účinník je potom vyjádřen početně poměrem činného a zdánlivého výkonu

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Podobný vztah platí pro zdánlivý výkon

$$S = \sqrt{3}UI$$

a pro žalový výkon

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$$

Elektrická práce trojfázové soustavy při souměrném zatížení je

$$W = Pt = \sqrt{3}UI \cos \varphi t$$

Příklad 76: Trojfázový elektromotor s výkonem 6 kW, na jmenovité napětí $3 \times 220/380$ V, s účinností 85 % a účinníkem 0,8 je jednou připojen na síť 3×380 V a podruhé na síť 3×220 V. Pro oba případy určete proud odebíraný ze sítě, činný a žalový proud, zdánlivý a žalový příkon.

$P = 6 \text{ kW} = 6000 \text{ W}$, $U = 380 \text{ V}$, $\eta = 85 \% = 0,85$, $\cos \varphi = 0,8$, $U = 220 \text{ V}$

Příkon elektromotoru

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{6000}{0,85} \text{ W} = 7059 \text{ W}$$

Proud odebíraný při napětí 3×380 V, jsou-li fáze elektromotoru spojeny do hvězdy, je

$$I_{380} = \frac{P_1}{\sqrt{3}U \cos \varphi} = \frac{7059}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,8} \text{ A} = 13,4 \text{ A}$$

Činný proud

$$I_{380\epsilon} = I_{380} \cos \varphi = 13,4 \cdot 0,8 \text{ A} \doteq 10,7 \text{ A}$$

Z tabulek

$$\sin \varphi = 0,6$$

Žalový proud

$$I_{380j} = I_{380} \sin \varphi = 13,4 \cdot 0,6 \text{ A} \doteq 8 \text{ A}$$

Proud odebíraný při napětí $3 \times 220 \text{ V}$, jsou-li fáze elektromotoru spojeny do trojúhelníka, je

$$I_{220} = \frac{P_1}{\sqrt{3}U \cos \varphi} = \frac{7059}{1,73 \cdot 220 \cdot 0,8} \text{ A} \doteq 23,2 \text{ A}$$

Činný proud

$$I_{220c} = I_{220} \cos \varphi = 23,2 \cdot 0,8 \text{ A} \doteq 18,6 \text{ A}$$

Jalový proud

$$I_{220j} = I_{220} \sin \varphi = 23,2 \cdot 0,6 \text{ A} \doteq 13,9 \text{ A}$$

Zdánlivý příkon

$$S_1 = \sqrt{3}U_{380}I_{380} = 1,73 \cdot 380 \cdot 13,4 \text{ V} \cdot \text{A} = 8809 \text{ V} \cdot \text{A} \doteq 8,8 \text{ kV} \cdot \text{A}$$

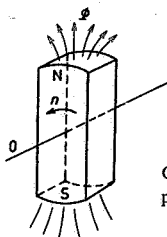
$$S_1 = \sqrt{3}U_{220}I_{220} = 1,73 \cdot 220 \cdot 23,2 \text{ V} \cdot \text{A} = 8809 \text{ V} \cdot \text{A} \doteq 8,8 \text{ kV} \cdot \text{A}$$

Jalový příkon

$$Q_{380} = Q_{220} = S_1 \sin \varphi = 8,8 \cdot 0,6 \text{ kvar} \doteq 5,3 \text{ kvar}$$

7.23. TOČIVÉ MAGNETICKÉ POLE

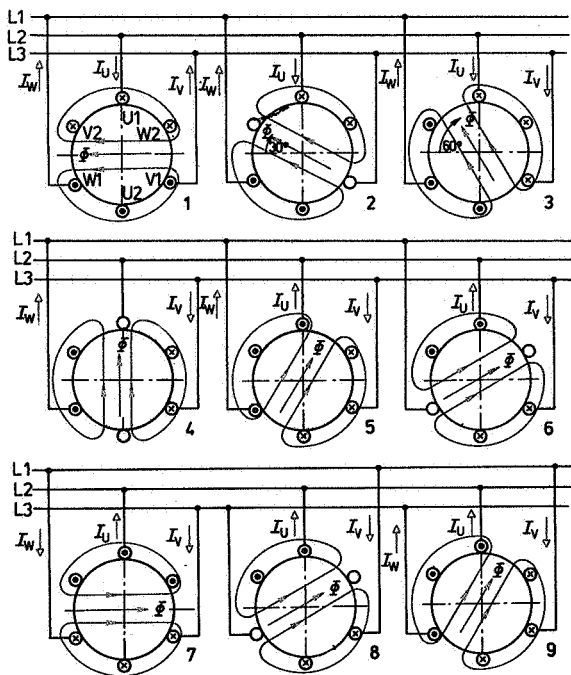
Budeme-li trvalým magnetem otáčet kolem osy (obr. 233), bude se otáčet také magnetické pole. Takovému magnetickému poli říkáme točivé magnetické pole. Je to magnetické pole, které plynule mění svůj směr, ale jeho velikost a průběh se nemění.



Obr. 233. Točivé magnetické pole stálého magnetu

Podobné točivé magnetické pole vzniká působením trojfázového proudu ve vinutí statoru za předpokladu, že cívky jednotlivých fází jsou posunuty stejně, jako jsou vzájemně posunuty časové průběhy přivedených proudů, tj. o 120° .

Vznik točivého magnetického pole vysvětlíme podle obr. 234. Na obrázku je stator synchronního stroje znázorněn zjednodušeně, neboť vinutí, které je rovnoměrně rozloženo na obvodu stroje podél vzduchové mezery, je znázorněno pouze jedním závitem. Začátky vinutí U1, V1, W1 jsou připojeny na trojfázovou síť L1, L2, L3 a jejich konce U2, V2, W2 jsou spojeny do jednoho uzlu. Vinutí je tedy spojeno do hvězdy, ale mohlo by být spojeno do trojúhelníku a v dutině statoru by také vzniklo točivé magnetické pole. Na obr. 235 je zobrazen časový průběh trojfázového proudu během jedné periody. Na tomto obrázku je čísla 1 až 13 vyznačeno třináct okamžiků a na obr. 234 jsou v jednotlivých obrázcích zakresleny směry proudů v jednotlivých fázích pro okamžiky 1 až 9. Za kladný směr proudu



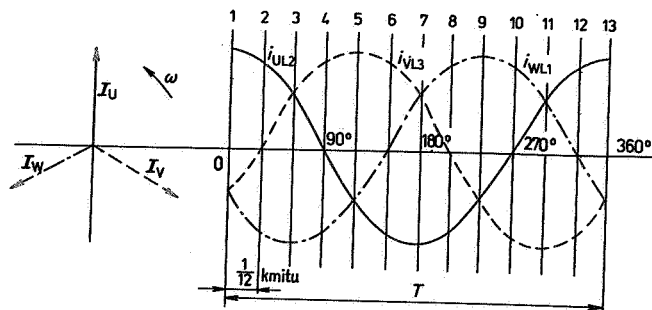
Obr. 234. Vznik točivého magnetického pole

v každé fázi volíme proud od začátku fáze ke konci fáze. Je-li směr proudu kladný, jde proud na začátku fáze za nákresnu (od nás). Má-li proud opačný směr, jde proud na začátku před nákresnu (k nám).

Podle této dohody sledujeme obr. 234/1, tj. okamžik 1. Proud ve fázi U je kladný a maximální, proudy ve fázích V a W jsou opačného směru a jejich hodnota se rovná polovině maximální hodnoty. Proudů ve všech vodičích vinutí nad vodorovnou osou jdou za nákresnu, pod vodorovnou osou jdou před nákresnu. Vinutí statoru tvoří vlastně cívku, jejíž osa je v tomto okamžiku ve vodorovné poloze. Směr výsledného toku Φ je na obr. 234/1 zakreslen a určíme jej podle Ampérova pravidla pravé ruky pro cívku.

V okamžiku 2, tj. o $1/12$ periody později, je proud ve fázi V nulový a proudy ve fázích U, W jsou stejně velké, ale opačného smyslu. Směr těchto proudů v trojfázovém vinutí je zakreslen na obr. 234/2. Výsledný magnetický tok Φ je pootočen o 30° , tj. o $1/12$ obvodu proti směru magnetického pole v okamžiku 1, a to ve směru pohybu hodinových ručiček. Při dalším sledování magnetického pole podle obr. 234/3 až 234/7 zjistíme, že výsledný magnetický tok zůstává stálý a úhel natočení se vždy zvětší o 30° . Za jednu periodu se tedy otočí magnetické pole o jednu otáčku. Při kmitočtu f se otočí za 1 sekundu n krát, tj. $n = f$.

Ve dvoupólovém generátoru se indukuje ve vinutí statoru jeden kmit napětí za jednu otáčku, tj. za dobu, kdy pod vinutím proběhne severní a jižní pól (tj. jeden pár pólů, jedna dvojice pólů). U mnohopólového stroje se indukuje na jednu otáčku rotoru napětí s p kmitů, označíme-li p počet pólových dvojic.



Obr. 235. Znázornění časového průběhu střídavého trojfázového proudu

Magnetické pole má u mnohopólového stroje otáčky $n = f/p$. Otáčky ale obvykle udáváme v jednotce min^{-1} . Protože $1 \text{ min} = 60 \text{ s}$, můžeme vztah pro otáčky upravit na

$$n = \frac{60f}{p}$$

kde f je kmitočet,

p počet pólových dvojic.

Na obr. 234/8 a 234/9 jsou přívody k fázím V a W vzájemně zaměněny a to má za následek změnu směru proudu ve vinutí statoru. Magnetické pole se potom otáčí opačně než na obr. 234/1 až 234/7.

Točivé magnetické pole vznikne ve statoru s trojfázovým vinutím ihned po připojení na trojfázovou soustavu a umožňuje jednoduchou konstrukci asynchronních motorů.

7.24. OTÁZKY A CVIČENÍ

1. Co to je trojfázová soustava?
2. Jak získáme trojfázové střídavé napětí?
3. Které trojfázové soustavy znáte a jak jsou v nich spojeny fáze generátoru (transformátoru)?
4. Která napětí naměříme v trojfázové soustavě při zapojení fází do hvězdy?
5. Která napětí naměříme v trojfázové soustavě při zapojení fází do trojúhelníku?
6. Jak se zapojují drobné spotřebiče a jak trojfázové spotřebiče do čtyřvodičové sítě?
7. Jak se zapojují drobné spotřebiče a jak trojfázové spotřebiče do třívodičové sítě?
8. Vysvětlíte, proč při souměrném zatížení trojfázové soustavy neprochází středním vodičem proud.
9. Jak velký proud prochází středním vodičem při nesouměrném zatížení trojfázové soustavy?
10. Kde naměříme fázové a sdružené napětí v trojfázové soustavě při spojení do hvězdy, tj. ve čtyřvodičové síti?
11. Proč se nulovací vodič nesmí nikde přerušit a proč do něho nesmíme zapojit pojistku?
12. Jak můžeme spojovat fáze trojfázového spotřebiče a na čem to záleží?

13. Jakým vztahem je dán zdánlivý, činný a jalový výkon v trojfázové soustavě?
14. Co udává účinník při souměrném zatížení a co při nesouměrném zatížení trojfázové soustavy?
15. Jak vzniká točivé magnetické pole?
16. Čím jsou dány otáčky točivého magnetického pole?
17. Nakreslete průběh točivého magnetického pole jako pokračování obrázku 234/7, tj. pro intervaly 8 až 13 na obr. 235.
18. Čím změníme smysl otáčení točivého magnetického pole?
19. Trojfázový elektromotor s výkonem 15 kW pracuje s účinníkem 0,8 a účinností 85 % a je připojen na síť $3 \times 220/380$ V. Vypočítejte příkon elektromotoru, proud odebíraný ze sítě, zdánlivý a jalový příkon a elektrickou práci spotřebovanou za 30 dní, pracuje-li elektromotor 8 h denně.
20. Trojfázový spotřebič připojený na síť $3 \times 220/380$ V odebírá ze sítě proud 10 A při účinníku 0,8. Vypočítejte zdánlivý, činný a jalový příkon a výkon spotřebiče, je-li jeho účinnost 90 %.

8. Výsledky cvičení

2.6

cv. 21: $6,25 \cdot 10^{18}$

3.8

cv. 6: 23Ω

cv. 7: asi 6 m

cv. 8: 5 m

cv. 9: 60Ω

cv. 10: $4,3 \cdot 10^{-1} \Omega$

cv. 11: 4krát zvětšit

cv. 12: 1 : 9

cv. 15: 31 mm od počátku

cv. 18: 5,4 S

cv. 19: 0,59 m

cv. 20: nikelin

cv. 22: na 15Ω

cv. 23: a) $3,24 \Omega$, b) $2,68 \Omega$

cv. 24: 74°C

cv. 25: asi o $1/4$

cv. 28: $4 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$

cv. 29: 5 mm^2

cv. 31: 11 h 30 min

cv. 32: $7,6 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

3.12

cv. 1: 12 V

cv. 2: 12 V

cv. 3: 40 V

cv. 4: 0,16 A

cv. 5: 35Ω

cv. 6: ano

- cv. 8: $50\ \Omega$
cv. 9: $3,9\ \text{A}$
cv. 10: ano
cv. 11: $0,8\ \text{A}$
cv. 12: $2\ \text{m}\Omega$
cv. 14: $14\ \text{V}$
cv. 15: $193\ \text{V}$

3.15

- cv. 2: $24\ \text{kJ}$
cv. 4: $0,45\ \text{A}$
cv. 5: $120\ \text{V}$
cv. 6: $6,2\ \text{A}$
cv. 7: ano
cv. 8: $6,6\ \text{MW} \cdot \text{h}$
cv. 9: $120\ \text{MW}$
cv. 10: ne
cv. 11: a) $5\ \text{V}$, b) $0,1\ \text{A}$
cv. 12: $630\ \text{K}\check{\text{c}}\text{s}$
cv. 13: $0,4$
cv. 14: $6\ \text{W}$; $0,9$
cv. 15: $190\ \text{W}$
cv. 16: $0,7$
cv. 17: a) $1300\ \text{W}$, b) $2200\ \text{W}$, c) $3500\ \text{W}$
cv. 18: a) $4,5\ \text{A}$, b) $9,1\ \text{A}$, c) $13,6\ \text{A}$
cv. 21: $163\ \Omega$
cv. 23: 8 s\u00e9riov\u011b
cv. 25: $9:1$
cv. 28: $8,4\ \text{k}\Omega$; $380\ \text{mA}$
cv. 29: $2,4\ \text{k}\Omega$
cv. 30: $6,3\ \Omega$; $3,1\ \Omega$; $7,9\ \Omega$

3.18

- cv. 2: $5,4\ \text{MJ}$
cv. 3: $10\ \text{J}$
cv. 4: $1\ \text{MW}$
cv. 5: $0,4\ \text{A}$
cv. 6: $650\ \text{K}\check{\text{c}}\text{s}$; $2,7\ \text{MJ}$

3.21

- cv. 20: $I = 2 \text{ A}$; $I_1 = 1,6 \text{ A}$; $I_2 = 0,4 \text{ A}$; $U_1 = 16 \text{ V}$; $U_2 = 8 \text{ V}$
cv. 21: $R_{1x} = 30 \Omega$; $R_{3x} = 15 \Omega$
cv. 22: $I_1 = 4 \text{ A}$; $I_2 = 2 \text{ A}$; $I_3 = 2 \text{ A}$
cv. 23: $I_1 = 6 \text{ A}$; $I_2 = 2,4 \text{ A}$; $I_3 = 3,6 \text{ A}$; $U_2 = 24 \text{ V}$
cv. 24: $I_1 = 3 \text{ A}$; $I_2 = 2,5 \text{ A}$; $I_3 = 0,5 \text{ A}$; $I_4 = 0,2 \text{ A}$; $I_5 = 0,3 \text{ A}$
cv. 25: $R = 8 \Omega$; $I = 3 \text{ A}$; $I_1 = 2 \text{ A}$; $I_2 = 1 \text{ A}$; $I_3 = 3 \text{ A}$; $I_4 = 2 \text{ A}$; $I_5 = 1 \text{ A}$
cv. 26: $R = 12 \Omega$; $I = 10 \text{ A}$; $I_1 = 5 \text{ A}$; $I_2 = 5 \text{ A}$; $I_3 = 10 \text{ A}$; $I_4 = 6 \text{ A}$; $I_5 = 1,5 \text{ A}$; $I_6 = 2,5 \text{ A}$
cv. 27: $I_1 = 2 \text{ A}$; $I_2 = 1 \text{ A}$; $I_3 = 3 \text{ A}$
cv. 28: $I_1 = 3\frac{1}{3} \text{ A}$; $I_2 = 2\frac{1}{3} \text{ A}$; $I_3 = 1 \text{ A}$
cv. 29: $I = 3 \text{ A}$; $I_1 = 1,7 \text{ A}$; $I_2 = 1,3 \text{ A}$; $I_3 = 0,3 \text{ A}$; $I_4 = 2 \text{ A}$; $I_5 = 1 \text{ A}$
cv. 30: $R = 4 \Omega$
cv. 31: $I_a = 6 \text{ A}$; $I_b = 8 \text{ A}$; $I_1 = 6 \text{ A}$; $I_2 = 1,4 \text{ A}$; $I_3 = 3,4 \text{ A}$; $I_4 = 4,6 \text{ A}$; $I_5 = 8 \text{ A}$
cv. 32: $R = 5 \Omega$
cv. 33: $R = 10 \Omega$
cv. 34: $R_2 = 30 \Omega$

3.24

- cv. 17: $U = 240 \text{ V}$; $R_i = 50 \Omega$; $I_k = 5 \text{ A}$
cv. 18: $U = 120 \text{ V}$; $R_z = 48 \Omega$; $R_i = 2 \Omega$; $I_k = 62,5 \text{ A}$
cv. 19: $U = 22,8 \text{ V}$; $R_z = 45,6 \Omega$; $R_i = 2,4 \Omega$; $I_k = 10 \text{ A}$
cv. 20: $U_2 = 62,5 \text{ V}$; $I = 50 \text{ mA}$; $P_z = 5 \text{ W}$
cv. 21: $U_1 = 100 \text{ V}$; $U_2 = 150 \text{ V}$; $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$
cv. 22: $R_1 = 20,8 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 1,2 \text{ k}\Omega$; $P_z = 2,2 \text{ W}$
cv. 23: $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$; $I = 1,2 \text{ mA}$
cv. 24: $U = 120 \text{ V}$; $P_z = 28,8 \text{ W}$
cv. 25: $U_2 = 83,3 \text{ V}$; $U_{20} = 150 \text{ V}$; $I_1 = 0,83 \text{ A}$; $I_2 = 0,28 \text{ A}$; $I_0 = 0,55 \text{ A}$; $P_z = 162 \text{ W}$; $\Delta U = 66,7 \text{ V}$
cv. 26: $U = 260 \text{ V}$; $U_{20} = 216,6 \text{ V}$; $\Delta U = 16,6 \text{ V}$; $I_1 = 60 \text{ mA}$; $I_2 = 40 \text{ mA}$; $I_0 = 20 \text{ mA}$; $P_z = 11,6 \text{ W}$

3.28

- cv. 14: $U_{20} = 100 \text{ V}$; $R_1 = 30 \text{ k}\Omega$; $U_2 = 70 \text{ V}$; $R_z = 70 \text{ k}\Omega$
cv. 15: $U_2 = 115 \text{ V}$; $R_1 = 18,3 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 22 \text{ k}\Omega$; $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_z = 23 \text{ k}\Omega$
cv. 16: $I = 3,025 \text{ A}$, $I_1 = 2,4 \text{ A}$, $I_2 = 0,625 \text{ A}$, $I_3 = 0,525 \text{ A}$, $I_z = 0,1 \text{ A}$
cv. 17: $U_{20} = 100 \text{ V}$; $R_1 = 12 \Omega$; $U_2 = 40 \text{ V}$; $I_0 = 5 \text{ A}$
cv. 18: a) $U_0 = 12,6 \text{ V}$; $U = 12,23 \text{ V}$; $I = 4,08 \text{ A}$; $I_k = 140 \text{ A}$; $P = 50 \text{ W}$
b) $U_0 = 2,1 \text{ V}$; $U = 2,1 \text{ V}$; $I = 0,7 \text{ A}$; $I_k = 840 \text{ A}$; $P = 1,5 \text{ W}$
c) $U_0 = 6,3 \text{ V}$; $U = 6,25 \text{ V}$; $I = 2,08 \text{ A}$; $I_k = 280 \text{ A}$; $P = 13 \text{ W}$
cv. 19: $m = 3$
cv. 20: $I = 100 \text{ mA}$
cv. 21: $nm = 27 \text{ článků}$
cv. 22: a) $R_1 = 3 \Omega$; $I = 2,5 \text{ A}$; $U = 7,5 \text{ V}$; $I_k = 5 \text{ A}$
b) $R_1 = 0,03 \Omega$; $I = 0,5 \text{ A}$; $U = 1,5 \text{ V}$; $I_k = 50 \text{ A}$

4.5

- cv. 4: $5 \cdot 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$
cv. 5: 27 kN
cv. 6: $7200 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$
cv. 8: asi 10 m
cv. 9: $8 \cdot 10^{-3} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$
cv. 13: 71 pF

5.5

- cv. 5: $1,42 \text{ kg}$
cv. 6: 18 A
cv. 7: 10 h
cv. 17: 1400 kg ; ano, 3,5krát
cv. 19: nelze vypočítat, chybí údaj o napětí baterie

6.6

- cv. 19: $2000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
cv. 20: 150
cv. 22: 5000 m^{-1}
cv. 25: $6,2 \text{ T}$
cv. 27: 10 mWb
cv. 28: $1,7 \text{ T}$

- cv. 29: 11 mWb
 cv. 30: 0,4 A
 cv. 31: 2,3 mWb

6.12

- cv. 5: $4 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}$
 cv. 7: nelze určit, chybí údaj o magnetickém odporu
 cv. 8: $62 \cdot 10^3 \text{ H}^{-1}$
 cv. 9: 2 mWb
 cv. 10: $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$
 cv. 11: $1,9 \cdot 10^3 \text{ A}$
 cv. 12: 9,42 μWb , 9,42 T, 3,14 T, 3,14 T
 cv. 13: 0,25 N
 cv. 15: 6,7 A při $\sin \alpha = 1$
 cv. 16: 54 mN

6.14

- cv. 2: 60 mV
 cv. 4: a) 22 mWb; b) 0 Wb
 cv. 5: 0,9 V
 cv. 6: 625 V

6.16

- cv. 14: 570 W

7.6

- cv. 26: $u_1 = 433 \text{ V}$; $u_2 = 0 \text{ V}$; $u_3 = 250 \text{ V}$
 $\alpha_1 = 15^\circ$ a 165° ; $\alpha_2 = 135^\circ$ a 45° ; $\alpha_3 = 255^\circ$ a 285°
 cv. 27: a) $T = 0,06 \text{ s}$, b) $T = 0,02 \text{ s}$, c) $T = 1 \text{ ms}$
 cv. 28: a) $f = 625 \text{ Hz}$, b) $f = 40 \text{ Hz}$, c) $f = 2 \text{ kHz}$
 cv. 29: a) $\omega = 314 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; b) $\omega = 4396 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; c) $\omega = 31\,400 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$
 cv. 30: a) $\alpha_1 = 200^\circ 38' 13''$, b) $\alpha_2 = 106^\circ 3'$, c) $\alpha_3 = 343^\circ 57'$
 cv. 31: a) $n = 750 \text{ min}^{-1}$, b) $n = 300 \text{ min}^{-1}$, c) $n = 187,5 \text{ min}^{-1}$
 cv. 32: a) 12 pólů, b) 16 pólů, c) 30 pólů
 cv. 33: a) $U_m = 34 \text{ V}$; b) $U_m = 537 \text{ V}$; c) $U_m = 31 \text{ kV}$
 cv. 34: a) $U = 42 \text{ V}$; b) $U = 500 \text{ V}$; c) $U = 110 \text{ kV}$

- cv. 35: a) $I_m = 21,2 \text{ A}$; $I_{AV} = 13,5 \text{ A}$
 cv. 36: $U = 220 \text{ V}$; $U_m = 311 \text{ V}$; $I_m = 62,2 \text{ A}$
 cv. 37: $R = 30 \Omega$; $U = 120 \text{ V}$; $I = 4 \text{ A}$

7.10

- cv. 19: $L = 0,028 \text{ H}$
 cv. 20: $M \pm 32,5 \text{ mH}$
 cv. 21: $\kappa = 0,5$
 cv. 22: $u_2 = 60 \text{ V}$
 cv. 23: a) $X_L = 4,7 \Omega$; b) $X_L = 65,9 \Omega$; c) $X_L = 216,7 \Omega$
 cv. 24: a) $L = 159 \text{ mH}$; b) $L = 8,85 \text{ mH}$; c) $L = 2,65 \text{ mH}$
 cv. 25: a) $f = 50 \text{ Hz}$; b) $f = 800 \text{ Hz}$; c) $f = 3 \text{ kHz}$
 cv. 26: $L = 0,5 \text{ H}$
 cv. 27: $f \pm 5 \text{ kHz}$
 cv. 28: $B_L \pm 0,1 \text{ S}$

7.13

- cv. 15: a) $X_C = 10 \Omega$; b) $X_C = 50 \Omega$; c) $X_C = 150 \Omega$
 cv. 16: a) $C = 212 \mu\text{F}$; b) $C = 10,61 \mu\text{F}$; c) $C = 3,18 \mu\text{F}$
 cv. 17: a) $f = 165,8 \text{ Hz}$; b) $f = 50 \text{ Hz}$; c) $f = 38,29 \text{ Hz}$
 cv. 18: $f = 995 \text{ Hz}$
 cv. 19: $B_C = 5 \cdot 10^{-3} \text{ S}$
 cv. 20: $I \pm 2,1 \text{ A}$
 cv. 21: a) $C = 15 \mu\text{F}$; b) $C = 1,62 \mu\text{F}$; c) $C = 3,6 \mu\text{F}$
 cv. 22: $C_x = 5 \mu\text{F}$
 cv. 23: $C_x = 0,1 \text{ pF}$

7.15

- cv. 11: $Z = 5 \Omega$; $I = 4,8 \text{ A}$; $\varphi = 36^\circ 50'$; $L = 9,55 \text{ mH}$; $U_R = 19,2 \text{ V}$; $U_L = 14 \text{ V}$
 cv. 12: $Z = 13 \Omega$; $I = 2 \text{ A}$; $\varphi \pm 22^\circ 37'$; $U_R = 24 \text{ V}$; $U_C = 10 \text{ V}$; $C \pm 637 \mu\text{F}$
 cv. 13: $I_R = 0,6 \text{ A}$; $I_L = 1,4 \text{ A}$; $I = 1,52 \text{ A}$; $Z = 144,7 \Omega$; $\varphi \pm 66^\circ 45'$
 cv. 14: $I_R = 4 \text{ A}$; $I_C = 5 \text{ A}$; $I = 6,4 \text{ A}$; $Z = 7,5 \Omega$; $\varphi = 51^\circ 20'$
 cv. 15: $I_L = 4,4 \text{ A}$; $I_C = 2,2 \text{ A}$; $I = 2,2 \text{ A}$; $X = 100 \Omega$; $B = 0,01 \text{ S}$
 cv. 16: $Z \pm 19 \Omega$; $I = 6,34 \text{ A}$; $U_R \pm 76 \text{ V}$; $U_L \pm 158,5 \text{ V}$; $U_C = 67,2 \text{ V}$;
 $\varphi = 50^\circ 30'$

- cv. 17: $I_R = 4 \text{ A}$; $I_L = 4 \text{ A}$; $I_C = 1 \text{ A}$; $I = 5 \text{ A}$; $Z = 20 \Omega$; $L \doteq 0,08 \text{ H}$;
 $C = 31,8 \mu\text{F}$; $\varphi = 36^\circ 50'$
- cv. 18: $Z = 60 \Omega$; $L = 179 \text{ mH}$; $\varphi \doteq 70^\circ 30'$; $U_R = 40 \text{ V}$; $U_L = 113 \text{ V}$
- cv. 19: $I_1 = 3 \text{ A}$; $I_2 = 0,5 \text{ A}$; $I = 3,33 \text{ A}$; $Z \doteq 36 \Omega$; $\varphi = 44^\circ 50'$; $U_{R1} =$
 $= 74,4 \text{ V}$; $U_L = 94,2 \text{ V}$
- cv. 20: $I_1 = 20 \text{ A}$; $I_2 = 10 \text{ A}$; $I = 22,4 \text{ A}$; $Z = 4,47 \Omega$; $U_L = -200 \text{ V}$;
 $U_C = 300 \text{ V}$; $\varphi = 63^\circ 20'$

7.20

- cv. 26: $R_n \doteq 543 \Omega$; $X_p = 173 \Omega$
- cv. 27: $R_s = 8 \Omega$; $X_s = 4 \Omega$
- cv. 28: $\text{tg } \delta = 0,0005$
- cv. 29: $Q = 78,5$; $\text{tg } \delta = 0,012$
- cv. 30: $f_r = 32,5 \text{ Hz}$; $I_r = 10 \text{ A}$; $U_L = U_C = 163 \text{ V}$
- cv. 31: $f_r = 18,6 \text{ Hz}$ (přesně), $f_r = 22,5 \text{ Hz}$ (přibližně); $Z_r = 125 \Omega$; $I_r =$
 $= 0,95 \text{ A}$; $I_{Cr} = I_{Lr} = 1,49 \text{ A}$
- cv. 32: $S_1 = 2,2 \text{ kV} \cdot \text{A}$; $P_1 = 1,76 \text{ kW}$; $Q_1 = 1,32 \text{ kvar}$
- cv. 33: $S_1 = 760,8 \text{ V} \cdot \text{A}$; $P_1 = 483,7 \text{ W}$; $Q_1 = 587,3 \text{ var}$
- cv. 34: $S_1 = 360 \text{ V} \cdot \text{A}$; $P_1 = 311,7 \text{ W}$; $Q_1 = 180 \text{ var}$; $\cos \varphi = 0,866$
- cv. 35: $\cos \varphi = 0,758$; $S_1 = 2,64 \text{ kV} \cdot \text{A}$; $Q_1 \doteq 1,72 \text{ kvar}$; $I_e = 9,1 \text{ A}$; $I_j =$
 $= 7,8 \text{ A}$

7.24

- cv. 19: $P_1 = 17,65 \text{ kW}$; $I = 33,5 \text{ A}$; $S = 22 \text{ kV} \cdot \text{A}$; $Q = 13,2 \text{ kvar}$; $W =$
 $= 423,6 \text{ kW} \cdot \text{h}$
- cv. 20: $S = 6574 \text{ V} \cdot \text{A}$; $P \doteq 5259 \text{ W}$; $Q = 3944 \text{ kvar}$; $P_2 = 4733 \text{ W}$

Literatura

Knihy

- Javorský, L. – Bobek, A. – Musil, R.: Základy elektrotechniky. Praha, SNTL 1970.
- Vlk, V.: Přehled elektrotechniky. Praha, Práce 1972.
- Novotný, J.: Elektrotechnická praxe v příkladech. Praha, SPN 1968.
- Roškota, S. a kol.: Výběr technických norem pro elektrotechniky. Praha, SNTL 1979
- Meluzin, H.: Malá rádiová příručka. Bratislava, Alfa 1979.
- Haňka, I.: Teorie elektromagnetického pole. Praha, SNTL, Bratislava, Alfa 1975.
- Náučný slovník elektrotechnický 1. Bratislava, Alfa 1977.
- Beneš, A. a kol.: Nauka o kovech. Praha, SNTL 1974.
- Mikulec, M.: Úvod do teorie obvodů I. Praha, Vydavatelství ČVUT 1974.
- Horák, Z. – Krupka, F.: Fyzika. Praha, SNTL 1976.
- Periškin, A. V.: Kurs fiziki. Moskva, Prosveščeniye 1971.
- Petržílka, V. – Šáfrata, S.: Elektřina a magnetismus. Praha, Přírodovědecké nakladatelství 1953.
- Ditrich, H. – Volz, E.: Elektro-Werkkunde. Darmstadt, Winkers Verlag 1969.
- Golbin, O.: Programmirovannoje izučeniye teoretičeskich osnov elektrotechniki. Moskva, Vyssšaja škola 1978.
- Meluzin, H.: Otázky a odpovědi z elektrotechniky. Bratislava, Alfa 1972.
- Blahovec, A. – Staňková, V.: Sbirka příkladů a úloh ze základů elektrotechniky. Praha, SNTL 1976.
- Voženílek, L.: Kurs elektrotechniky. Praha, SNTL 1976.

Československé státní normy

- ČSN 01 1300. Zákonně měřicí jednotky. 1980.
- ČSN 01 1301. Veličiny a jednotky ve vědě a technické praxi. 1973.
- ČSN 01 1302. Veličiny a jednotky v mechanice tuhých a poddajných těles. 1979.
- ČSN 01 1305. Veličiny a jednotky v elektrotechnice. 1971.
- ČSN 35 8014. Označování jmenovitých hodnot odporů a kapacit a jejich úchylek písmenovým kódem. 1978.
- ČSN 01 3343. Značky pro elektrotechnická schémata. Odpor. 1981.
- ČSN 01 3344. Značky pro elektrotechnická schémata. Kondenzátory. 1981.
- ČSN 33 0120. Jmenovitá napětí elektrických zarážek, sítí a spotřebičů všeobecného použití. 1980.
- ČSN 33 0160. Značení vodičů a svorek elektrických předmětů a zařízení. 1981.



ING. LADISLAV VOŽENÍLEK
PhDr. MILOŠ ŘEŠÁTKO

Základy elektrotechniky I

**pro 1. ročník elektrotechnických učebních
a studijních oborů středních odborných
učilišť**

DT 621.3 (075.3)

Vydalo SNTL – Nakladatelství technické literatury,
n. p., Spálená 51, 113 02 Praha 1, v roce 1986 jako
svou 9959. publikaci

Redakce elektrotechnické literatury – Odpovědný
redaktor Ing. Rostislav Zeman – Vazbu navrhl Karel
Míšek – Technická redakce Vlasta Teubnerová – Vy-
tiskla Polygrafia, n. p., Svobodova 1, Praha 2 – 304
stran, 235 obrázků, 7 tabulek – Typové číslo
L25-C1-II-86/55 751 – Vydání druhé, nezměněné –
Náklad 20 000 prodejních výtisků – 18,69 AA, 19,02 VA

05/32

Cena vázaného výtisku Kčs 20,–

506/23,856

Publikace je určena žákům 1. ročníků elektrotechnic-
kých učebních a studijních oborů středních odbor-
ných učilišť.

2918

04 – 508 – 86

Kčs 20,–

0711

Plandor v.

94/95

A

E

EZT KLiž Jaromír

91/96

E