



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**STŘEDNÍ ODBORNÁ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ,
Centrum odborné přípravy,
Hluboká nad Vltavou**



ELEKTROTECHNICKÝ ZÁKLAD

Identifikace projektu

Název a číslo globálního grantu	Zvyšování kvality ve vzdělání v Jihočeském kraji CZ.1.07/1.1.10/
Registrační číslo projektu	CZ.1.07/1.1.10/01.0015
Název projektu	Inovace a vytvoření odborných učebních textů pro rozvoj klíčových kompetencí v návaznosti na rámcové vzdělávací programy
Název příjemce podpory	Střední odborná škola elektrotechnická, Centrum odborné přípravy, Hluboká nad Vltavou

Hluboká nad Vltavou 2011



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Na zpracování učebního textu Elektrotechnický základ se podíleli učitelé SOŠE,
COP, Hluboká nad Vltavou:**

Danihelka Petr

Bodláková Radana

Donát Josef

Kocina František

Kouřilová Blanka

Luxíková Milena

Melicharová Markéta

Votýpka Stanislav

Železná Hana

Obsah

Základní pojmy	7
Fyzikální veličiny a jednotky	7
Základní a doplňkové jednotky SI.....	7
Předpony násobků a dílů jednotek SI	8
1. Vodiče a nevodiče	9
1.1 Stavba látek, elektronová teorie.....	9
1.2 Elektrický náboj Q [C]	10
1.3 Elektrické pole	11
1.4 Elektrické napětí U [V]	11
Cvičení.....	12
2. Stejnosměrný proud	14
2.1 Jednoduchý elektrický obvod	14
2.2 Elektrický proud I [A]	15
2.2.1 Měření elektrického proudu	16
2.2.2 Vztah mezi napětím a proudem	16
2.2.3 Rychlost šíření elektrického proudu vodičem	17
2.3 Proudová hustota J [$A \cdot m^{-2}$]	17
2.4 Elektrický odpor R [Ω]	18
2.5 Vodivost G [S].....	19
2.6 Konduktivita γ [$S \cdot m^{-1}$]	19
2.7 Závislost odporu vodiče na teplotě	19
2.8 Rezistory	20
2.8.1 Druhy rezistorů	20
2.8.2 Měření elektrického odporu rezistorů	20
2.9 Ohmův zákon.....	21
2.10 Úbytek napětí na vodiči (rezistoru) ΔU [V]	22
2.11 Řazení rezistorů	22
2.11.1 Sériové řazení rezistorů	22
2.11.2 Paralelní řazení rezistorů	24
2.11.3 Smíšené řazení rezistorů (kombinace sériového a paralelního řazení)	24
Cvičení.....	25
2.12 Kirchhoffovy zákony	26
2.12.1 Kirchhoffův zákon – pro uzel elektrické sítě	26
2.12.2 Kirchhoffův zákon – pro smyčku elektrické sítě.....	27
2.13 Užití rezistorů v praxi	28
2.13.1 Bočník.....	28
2.13.2 Předřadník.....	28
2.14 Elektrická práce W [J].....	29
2.15 Elektrický výkon P [W].....	30
2.16 Příkon a výkon, účinnost	31
2.17 Elektrický zdroj, jeho náhradní schéma	31
2.17.1 Druhy elektrických zdrojů	31
2.17.2 Veličiny charakterizující elektrický zdroj	31
2.17.3 Ideální zdroj proudu	33
2.18 Děliče napětí	34
2.18.1 Nezatížený dělič napětí.....	34
2.18.2 Zatížený dělič napětí.....	35
2.19 Théveninova poučka.....	36

2.20	Řazení elektrických zdrojů	37
2.20.1	Sériové řazení elektrických zdrojů doplnit	37
2.20.2	Paralelní řazení elektrických zdrojů	38
2.20.3	Kombinované řazení elektrických zdrojů	38
	Cvičení	39
3.	Elektrostatika	41
3.1	Elektrické pole	41
3.2	Coulombův zákon	42
3.3	Intenzita elektrického pole E [$V \cdot m^{-1}$]	42
3.4	Vodič v elektrickém poli	43
3.5	Dielektrikum (izolant) v elektrickém poli	43
3.6	Kondenzátory	44
3.7	Intenzita elektrického pole kondenzátoru	45
3.8	Řazení kondenzátorů	46
3.8.1	Paralelní řazení kondenzátorů	46
3.8.2	Sériové řazení kondenzátorů	46
3.9	Druhy kondenzátorů	47
	Cvičení	48
4	Elektrický proud v kapalinách, plynech, vakuu a polovodičích	50
4.1	Vedení elektrického proudu v kapalinách	50
4.1.1	Využití elektrolýzy. Koroze kovů	52
4.1.2	Faradayovy zákony elektrolýzy	53
4.1.3	Chemické zdroje napětí	54
4.2	Vedení elektrického proudu v plynech	56
4.2.1	Nesamostatný výboj	57
4.2.2	Samostatný výboj	57
4.3	Vedení elektrického proudu ve vakuu	59
4.4	Vedení elektrického proudu v polovodičích	59
4.4.1	Stavba a elektrické vlastnosti polovodičů	59
4.4.2	Vlastní vodivost polovodičů	60
4.4.3	Elektronová a děrová vodivost polovodičů	60
	Cvičení	62
5	Magnetismus a elektromagnetismus	63
5.1	Magnety	63
5.1.1	Značení magnetů	63
5.2	Magnetické vlastnosti látek	63
5.3	Teorie magnetu	64
5.4	Magnetické pole	64
5.4.1	Magnetické pole tyčového magnetu	65
5.4.2	Magnetické pole přímého vodiče	65
5.4.3	Magnetické pole cívky	66
5.5	Magnetické veličiny	66
5.5.1	Intenzita magnetického pole H [$A \cdot m^{-1}$]	66
5.5.2	Magnetická indukce B [T]	67
5.5.3	Magnetizační křivka	67
5.5.4	Hysterezní smyčka	68
5.5.5	Magnetický indukční tok Φ [Wb]	68
5.6	Magnetické obvody	69
5.7	Magnetický odpor (reluktance) R_m [H^{-1}]	69
5.8	Magnetická vodivost (permeance) G_m [H]	70

5.9	Hopkinsonův zákon:	70
5.10	Pohyb osamocené vodiče v magnetickém poli.....	70
5.11	Dynamické účinky elektrického proudu.....	71
5.12	Vzájemné působení dvou vodičů.....	72
5.13	Elektromagnetická indukce	73
5.13.1	Indukční zákon	74
5.14	Vlastní indukčnost L [H]	75
5.14.1	Výpočet vlastní indukčnosti cívky	76
5.15	Vzájemná indukčnost M [H]	76
5.16	Řazení indukčností	77
5.17	Ztráty ve feromagnetických materiálech	77
5.17.1	Hysterezní ztráty.....	77
5.17.2	Ztráty vířivými (Foucaultovy) proudy.....	77
5.17.3	Užití vířivých proudů:	78
	Cvičení.....	78
6	Střídavý proud	80
6.1	Základní pojmy.....	80
6.2	Časový průběh sinusových veličin	80
6.3	Efektivní hodnota střídavého napětí a proudu	81
6.4	Střední hodnota střídavého napětí a proudu	82
6.5	Vztah mezi efektivními a středními hodnotami	83
6.6	Získávání střídavého sinusového napětí.....	83
6.7	Znázornění sinusových veličin fázory	84
6.7.1	Zásady pro kreslení fázorových diagramů	85
6.8	Jednoduché obvody se sinusovým střídavým proudem	85
6.8.1	Ideální rezistor v obvodu střídavého proudu	85
6.8.2	Ideální cívka v obvodu střídavého proudu	86
6.8.3	Ideální kondenzátor v obvodu střídavého proudu	87
	Cvičení.....	89
6.9	Složené obvody R, L, C	89
6.9.1	Postup řešení složených obvodů R, L, C	90
6.9.2	Postup řešení při sériovém zapojení RL, RC, RLC	91
6.9.3	Postup řešení při paralelním spojení $RL, RC, a RLC$	93
6.10	Výkon střídavého proudu, práce, účinník.....	95
	Cvičení.....	98
7	Trojfázová soustava.....	99
7.1	Spojení trojfázového vinutí do hvězdy (Y)	100
7.2	Spojení trojfázového vinutí do trojúhelníku.....	101
7.3	Výkon a práce trojfázového proudu	103
7.4	Točivé magnetické pole.....	104
	Cvičení.....	104
8.	Elektromagnetické vlnění	106
8.1	Elektromagnetický oscilátor	106
8.2	Vlastní a nucené kmitání elektromagnetického oscilátoru	107
8.2.1	Vlastní kmitání	107
8.2.2	Nucené kmitání.....	107
8.3	Rezonanční obvody	108
8.3.1	Sériový rezonanční obvod	108
8.3.2	Paralelní rezonanční obvod	109
8.4	Vznik elektromagnetického vlnění.....	109

8.5 Elektromagnetická vlna	112
8.6 Přenos informací elektromagnetickým vlněním.....	113
8.6.1 Sdělovací soustava.....	113
Cvičení.....	114
Účinky elektrického proudu na živý organismus	115
První pomoc při úrazu elektrickým proudem	116
Přehled obvodů RLC	117
Vlastnosti materiálů.....	121
Permitivita některých materiálů.....	122
Odborné elektrotechnické výrazy	123
Česko – anglicky	123
Česko – německy.....	127
Česko – rusky	131
Použitá literatura.....	136

Základní pojmy

Fyzikální veličiny a jednotky

Fyzikální veličina – slouží k popisu měřitelných vlastností hmoty. Je určena číselnou hodnotou a jednotkou

Příklad: $I = 10 \text{ A}$ I – fyzikální veličina (elektrický proud)
10 – číselná hodnota
A – fyzikální jednotka (ampér)

Fyzikální jednotky jsou stanoveny Mezinárodní soustavou jednotek (zkráceně SI).

Základní a doplňkové jednotky SI

Veličina	Značka veličiny	Jednotka	Značka jednotky
Délka	l, a, \dots	metr	m
čas	t	sekunda	s
elektrický proud	I	ampér	A
termodynamická teplota	T	Kelvin	K
svítivost;	I	kandela	cd
látkové množství	n	mol	mol
rovinný úhel	$\alpha, \beta, \delta \dots$	radián	rad
prostorový úhel	ω	steradián	sr

Odvozené fyzikální jednotky jsou takové, které lze přímo utvořit z jednotek základních.

Příklad: 1 Newton [N] je jednotka síly. Nepatří však mezi základní jednotky SI, ale přesto ji lze pomocí těchto jednotek vyjádřit. Ze zákona síly $F = m \cdot a$ získáme dosazením jednotek pro hmotnost m a zrychlení a rozměr 1 N v základních jednotkách SI – $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$. Tímto způsobem lze vyjádřit většinu jednotek.

Vedlejší fyzikální jednotky nepatří do soustavy SI, pro jejich vyjádření v těchto jednotkách je nutné použít číselný přepoččet, běžně se však používají.

Příklad: $1 h = 3600 s$

$1 t = 1000 \text{ kg}$

$1 a = 100 \text{ m}^2$

Předpony násobků a dílů jednotek SI

Obecná fyzika a tedy i elektrotechnika často pracuje s veličinami, kde vyjádření jejich velikosti pomocí jednotek je číslo příliš velké nebo naopak příliš malé. Pro zpřehlednění a zjednodušení zápisu tedy často používáme předpony jednotek.

Název předpony	Značka	Mocnina	Rozměr
tera	T	10^{12}	1 000 000 000 000
giga	G	10^9	1 000 000 000
mega	M	10^6	1 000 000
kilo	K	10^3	1 000
mili	m	10^{-3}	0,001
mikro	μ	10^{-6}	0,000 001
nano	n	10^{-9}	0,000 000 001
piko	p	10^{-12}	0,000 000 000 001

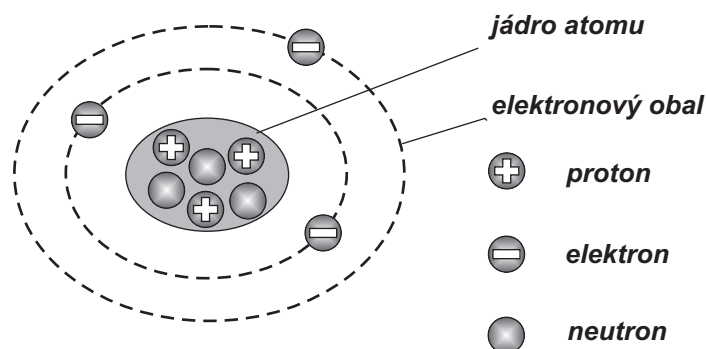
1. Vodiče a nevodiče

1.1 Stavba látek, elektronová teorie

Látky jsou složeny z molekul a molekuly jsou složeny z atomů. Atomy se dále skládají z elektronového obalu a jádra, které je složeno z kladně nabitých protonů a neutronů bez elektrického náboje.

Pro vlastnosti prvku, a to nejen elektrické, ale i chemické, mechanické atd., je důležitá především stavba jeho elektronového obalu. Ten je tvořen jednotlivými tzv. slupkami (čili orbity). V každé slupce může být jen určitý nejvyšší počet záporně nabitých elektronů (viz tabulky). Elektrony jsou v obalu vázány silami, které jsou tím větší, čím blíže k jádru se elektron nachází. Nejmenšími silami jsou tedy vázány elektrony ve vnější, tzv. valenční slupce. Síla, jakou je elektron ve valenční slupce vázán, také závisí na počtu elektronů v této slupce. Čím je jejich počet menší, tím menší vnější síla stačí k tomu, aby se elektron z valenční slupky uvolnil.

Kovy mají pouze jeden až dva valenční elektrony. Stačí tedy poměrně malá síla k tomu, aby se tyto elektrony uvolnily a začaly kovem putovat jako tzv. *volné elektrony*. Podle elektronové teorie tyto volné elektrony vedou elektrický proud kovem.



Obr. 1.01 Model atomu lithia

Celkový počet elektronů v elektronovém obalu atomu také určuje, jak se navenek bude atom elektricky chovat. Elektrony, jak víme ze základní školy, mají záporný náboj a protony v jádře atomu náboj kladný. Tyto náboje jsou stejně velké, mají pouze opačnou polaritu.

Bude-li počet protonů a elektronů v atomu stejný, bude se atom jevit jako *elektricky neutrální*.

Bude-li počet rozdílný, bude se jednat o elektricky reagující atom – iont, a to buď:

a) *kation* – atom má méně elektronů než protonů – kladný iont

b) *anion* - atom má více elektronů než protonů – záporný iont

Kationy s kladným nábojem se budou přitahovat k zápornému pólu zdroje – katodě, aniony se záporným nábojem ke kladnému pólu – anodě.

1.2 Elektrický náboj Q [C]

Víme, že látky obsahují elektricky nabitě částice – protony a elektrony. Tyto částice jsou nositeli elementárního (základního) náboje. Tento náboj je nejmenší možný náboj v přírodě, je tedy dále nedělitelný a jakýkoliv jiný náboj může být pouze jeho násobkem. Jeho velikost patří mezi jednu ze základních konstant:

$$e = \pm 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Jednotkou je 1 C – coulomb (čti „kulón“). Náboj Q je také definován vztahem

$$Q = It \quad [\text{C}; \text{A}, \text{s}]$$

proto tedy:

1 coulomb je elektrický náboj, který proteče vodičem při stálém proudu 1 ampér za 1 sekundu.

Coulomb = ampérsekunda [A·s]. Elektrický náboj nelze od částice oddělit, nedá se vytvořit ani zničit. V uzavřené soustavě platí **zákon o zachování elektrického náboje**.

Celkový počet kladně nabitých částic protonů a záporně nabitých elektronů určuje *elektrický stav tělesa*:

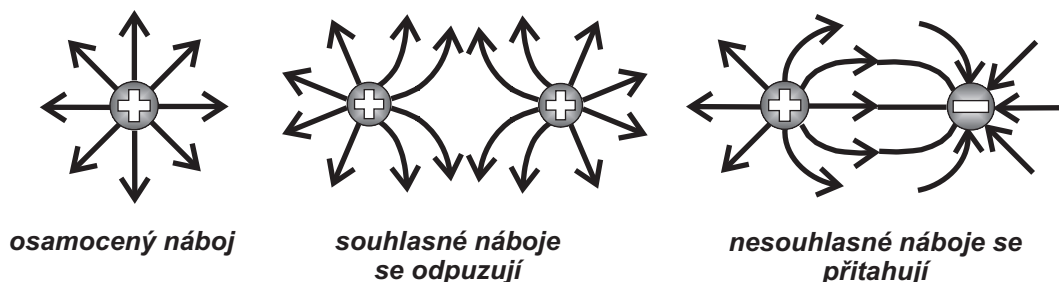
1. Je-li počet částic stejný – těleso je elektricky neutrální, protože se náboje těchto částic vzájemně vyruší.

2. Má-li těleso více protonů, je kladně nabit.

3. Má-li těleso více elektronů, je záporně nabit.

1.3 Elektrické pole

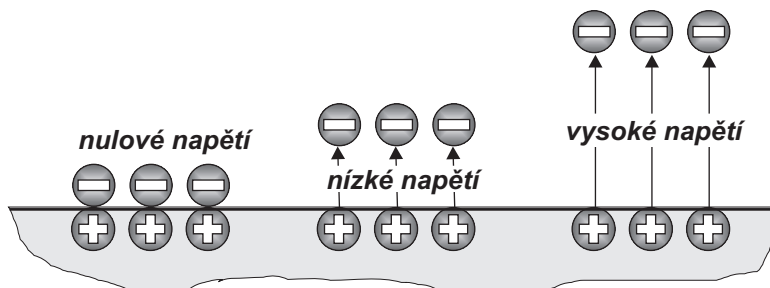
Jednou ze základních vlastností elektrických nábojů je, že na sebe vzájemně silově působí. Souhlasné náboje se navzájem odpuzují, nesouhlasné se naopak přitahují. Příčinou tohoto jevu je *elektrické pole*, které vzniká v okolí **každého** elektricky nabitého tělesa, se vzdávající vzdáleností však slábne, až zaniká. Elektrické pole nemůže existovat samostatně, je vždy vázáno na elektrický náboj. Pro jeho znázornění používáme tzv. *elektrické siločáry*.



Obr. 1.02 Znáznornění elektrického pole pomocí siločar

1.4 Elektrické napětí U [V]

Každé těleso v přírodě se snaží zaujmout takovou polohu, ve které má nejmenší energii. Kámen padá k zemi, voda stéká z vyšších poloh do nižších, elektron v atomu se snaží pohybovat co nejblíže k jádru, tedy po dráze s nejnižší energií. Dva nesouhlasné elektrické náboje se přitahují. Vůči sobě mají nejmenší energii, jestliže jsou těsně vedle sebe. Začneme-li tyto náboje od sebe oddalovat, musíme překonat jejich přitažlivé síly, musíme tedy konat práci. Při vzdalování nábojů dochází ke změně jejich polohy, tedy ke změně jejich polohové, neboli *potenciální energie*. Mezi takto vzdálenými elektrickými náboji vzniká *elektrické napětí*. Elektrické napětí můžeme vyjádřit jako rozdíl potenciálních energií, tedy *potenciálů* dvou míst elektrického pole. Místo s vyšším elektrickým potenciálem označujeme „+“, místo s nižším elektrickým potenciálem označujeme „-“.



Obr. 1.03 Vzdalováním opačných elektrických nábojů vzniká elektrické napětí

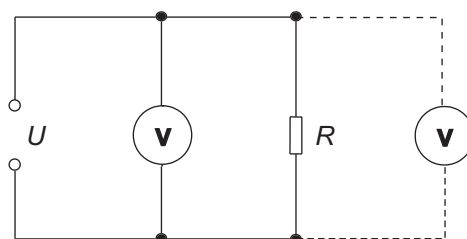
Elektrické napětí značíme U . Jednotkou je 1 volt [V]. Napětí vyjádříme poměrem práce W potřebné k přenesení určitého náboje Q , mezi dvěma místy různého potenciálu:

$$U = \frac{W}{Q} \quad [\text{V}; \text{J}, \text{C}]$$

Definice voltu pomocí práce:

1 volt V je práce W jednoho joule J, která je potřebná k přemístění náboje Q jednoho coulombu C.

Elektrické napětí měříme voltmetry. Voltmetr musí být vždy zapojen paralelně ke zdroji nebo spotřebiči elektrického proudu.



Obr. 1.04 Měření elektrického napětí

Cvičení

1. Uveďte co je fyzikální veličina a co je fyzikální jednotka.
2. Co to jsou odvozené jednotky SI? Uveďte některé, jejichž pomocí se vyjadřují elektrické veličiny.
3. Vyjádřete pomocí exponentů a pomocí předpon:

a) 4 200 000 W	d) 0,002 5 Ω
b) 280 000 V	e) 0,000 03 A
c) 560 A	f) 0,000 000 12 F
4. Vyjádřete bez předpon a s použitím exponentů:

a) 3,2 M Ω	d) 2,6 μF
b) 20 kV	e) 0,25 TW
c) 0,3 mA	f) 120 pV
5. Jaké částice tvoří atom a jaký mají náboj?
6. Kdy je atom elektricky neutrální? Co je to kation a anion?

7. Jak vysvětlujeme vedení elektrického proudu v kovech? Které kovy se jako vodiče nejčastěji používají v elektrotechnice?
8. Jaký je nejmenší možný elektrický náboj v přírodě? Co je jeho nositelem?
9. Jak na sebe vzájemně působí náboje se souhlasným a nesouhlasným nábojem? Nakreslete pomocí elektrických siločar.
10. K zamezení úniku pevných zplodin hoření (popílku) do ovzduší se v tepelných elektrárnách používají elektrostatické odlučovače. Pokuste se vysvětlit jejich princip.
11. Co je to elektrický potenciál?
12. Vysvětlete, co je to elektrické napětí.

2. Stejnoseměrný proud

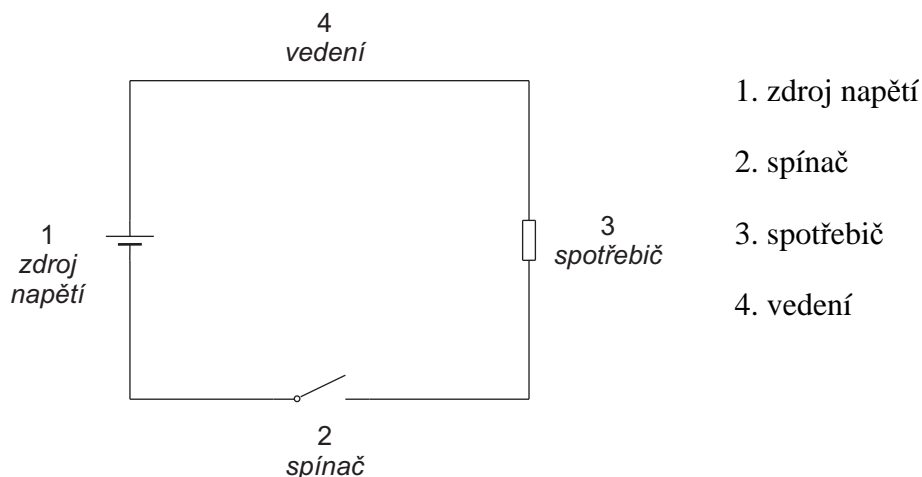
Podle směru toku dělíme elektrický proud na:

1. stejnosměrný (—) jeho směr je stále stejný (DC = direct current)
2. střídavý (\approx) směr se neustále mění (střídá) (AC = alternating current)

Dohodnutý směr stejnosměrného proudu je od kladného pólu k zápornému. Také napětí může být buď stejnosměrné, nebo střídavé. Zdroj stejnosměrného napětí má na jedné svorce trvalý přebytek elektronů – záporná svorka; na druhé svorce stálý nedostatek elektronů – kladná svorka. Mezi těmito svorkami je tedy stejnosměrné napětí.

2.1 Jednoduchý elektrický obvod

Má následující části:



Obr. 2.01 Jednoduchý elektrický obvod

spínač – slouží k připojení či odpojení spotřebiče od zdroje

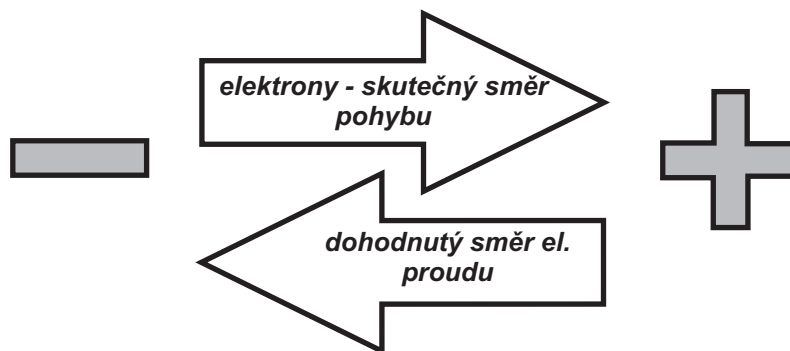
spotřebič – je takové elektrické zařízení, ve kterém se mění elektrická energie v energii jinou (i elektrickou o jiných parametrech).

- Příklad:** žárovka – světelná energie,
elektromotor – mechanická energie,
elektrické topné těleso – tepelná energie,

transformátor – elektrická energie jiného napětí potřebného pro přenos, nebo napájení spotřebičů.

vedení – je tvořeno vodiči, které můžeme dělit např. na:

- a) holé vodiče
- b) izolované vodiče různého provedení – jednožilové, několika žilové, kabely atd.
- c) plošné spoje – sloužící v elektronice



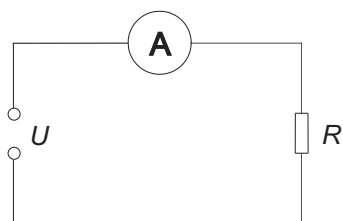
Obr. 2.02 Skutečný a dohodnutý směr elektrického proudu

Pozor: směr elektrického proudu je dohodnutý (od + k –). Ve skutečnosti v obvodu stejnosměrného proudu vystupují elektrony ze záporné svorky zdroje (kde je jich přebytek) do vodiče, vodičem procházejí do spotřebiče a odtud vodičem do kladné svorky zdroje, kde je jich nedostatek. Skutečný směr pohybu elektronů je tedy opačný, než směr dohodnutý.

2.2 Elektrický proud / [A]

Uvnitř vodiče je obrovské množství volných elektronů, které se chaoticky pohybují všemi směry. Spojíme-li tímto vodičem dva nesouhlasné póly elektrického zdroje, vytvoří se okamžitě uvnitř vodiče elektrické pole, jehož účinkem se mění chaotický pohyb elektronů tak, že se začnou pohybovat od záporného pólu ke kladnému. Tento *uspořádaný pohyb volných elektronů* se nazývá **elektrický proud**. Značíme jej I , jednotkou je 1 A (ampér).

2.2.1 Měření elektrického proudu

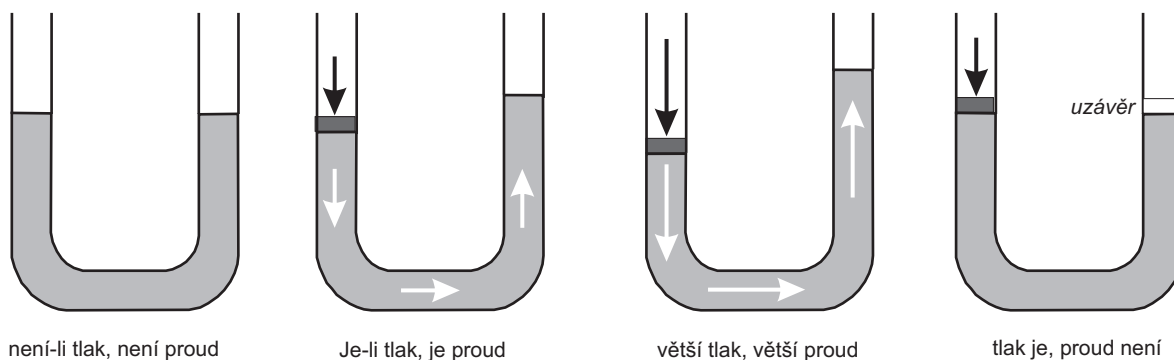


Obr. 2.03 Měření elektrického proudu

Pro měření elektrického proudu používáme ampérmetry, které jsou při měření zapojeny vždy do série se spotřebičem. U ampérmetru je důležité, aby měl co nejmenší vnitřní odpor – čím je menší, tím menší příkon spotřebuje sám ampérmetr a tím je měření přesnější.

2.2.2 Vztah mezi napětím a proudem

Tento vztah se pokusíme vysvětlit paralelou s vodou. V potrubí daného tvaru (viz obr.8) je voda.



Obr. 2.04 K vysvětlení vztahu mezi napětím a proudem, srovnání s poměry při průtoku vody potrubím

V případě, že na ni nebudeme nijak působit (tlaky v obou ramenech budou stejné), bude v klidu (obrázek a). Stejně tak se volné elektrony ve vodiči nebudou uspořádaně pohybovat, nebude-li na ně působit rozdíl potenciálů, neboli *potenciálový spád*, tedy elektrické napětí.

Na obrázku b) působíme na kapalinu v jednom z ramen potrubí větším tlakem. Tím se začne kapalina v celém potrubí najednou pohybovat – vytváří se proud. Jestliže vodič připojíme k elektrickému napětí, vytvoří se v něm okamžitě elektrické pole a elektrony se začnou pohybovat – téci ve směru potenciálového spádu, tedy od + k -. Ve vodiči vzniká elektrický proud.

Budeme-li v jednom z ramen potrubí působit větším tlakem, tak jak je naznačeno na obrázku c), bude proud kapaliny v potrubí logicky větší. Stejně tak i pohyb elektronů bude větší při větším napětí, protože i potenciálový spád je větší. Vodičem tedy poteče větší proud.

Na obrázku d) sice v jednom rameni potrubí na volný povrch kapaliny působíme tlakem, druhé rameno jsme však uzavřeli. Voda tedy nemá kam téci, proto se v potrubí nepohybuje.

K obdobnému stavu dojde, přerušíme-li obvod. Elektrony nemají kam téci, přestože napětí existuje. Zde je i odpověď na častou otázku: „Jaký proud je v zásuvce?“. Zásuvkou může pochopitelně protékat proud jen v případě, je-li do ní připojen nějaký spotřebič. Jinak je zde jen napětí.

Závěr: – *elektrický proud* prochází vodičem jen tehdy, jestliže existuje elektrické napětí, které tento proud vyvolá.– *elektrické napětí* může existovat i tehdy, jestliže vodičem elektrický proud neprochází.

2.2.3 Rychlost šíření elektrického proudu vodičem

Samotné volné elektrony se ve vodiči pohybují jen rychlostí několika milimetrů za sekundu. Elektrické pole, které pohyb volných elektronů vyvolá, se však šíří rychlostí světla. Protože jsou volné elektrony v celé délce a objemu vodiče, můžeme říci, že **elektrický proud se šíří rychlostí světla** ($300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$). Zde se opět nabízí srovnání s průtokem vody ve vodovodním potrubí. Jestliže otočíme vodovodním kohoutkem, voda začne okamžitě vytékat a její průtok odpovídá rychlosti proudění a průřezu potrubí.

2.3 Proudová hustota J [$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$]

Elektrony, které se pohybují vodičem, se musí v místě zúženého průřezu pohybovat rychleji, než v místech většího průřezu vodiče. Rychlejší pohyb elektronů v užším místě vyvolává zahřívání vodiče. Intenzitu proudu na jednotku průřezu vodiče vyjadřuje veličina proudová hustota:

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

J – proudová hustota [$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$]

I – intenzita proudu [A]

S – plocha průřezu [m^2]

Proudová hustota je důležitá veličina pro dimenzování vodičů vedení i vinutí elektrických strojů, protože její vysoké hodnoty by mohly vést k neúměrnému zvýšení teploty elektrického zařízení a k následnému požáru.

2.4 Elektrický odpor R [Ω]

Všechny kovy jsou v tuhém stavu látky krystalické. Přesněji řečeno látky polykrystalické (poly = mnoho). Jsou tvořeny velkým množstvím miniaturních krystalů. Tyto krystaly jsou složeny z mnoha atomů. Víme, že jednotlivé částice, a tedy i atomy, ze kterých se látka skládá, konají neustálý tzv. termický pohyb. Atomy, vázané v krystalové mřížce kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Jejich hmotnost je proti elektronům mnohonásobně větší. Dojde-li tedy v kovu vlivem elektrického pole k uspořádanému pohybu elektronů, dochází i ke srážkám mezi elektrony a atomy. Elektrony jsou ze své dráhy vychylovány a brzděny. Vodič klade průchodu elektronů, tedy průchodu elektrického proudu *elektrický odpor*. Ten značíme R , jednotkou je ohm [Ω] (čti óm). U stejnosměrného proudu se tento odpor nazývá *rezistance*, u proudu střídavého obvykle hovoříme o *rezistenci*.

Z výše uvedeného tedy plyne, že elektrický odpor závisí na:

1. Délce vodiče – čím je vodič delší, tím více srážek musí na své cestě vodičem elektrony překonat – s délkou se odpor vodiče zvětšuje
2. Průřezu vodiče – ve vodiči menšího průřezu má elektron menší „manévrovací možnosti“, dochází k více srážkám – odpor vodiče je tím větší, čím je menší průřez vodiče
3. Materiálu vodiče – každý materiál má jiné vlastnosti. Veličina vyjadřující „průchodnost“ elektronů daným materiálem je *rezistivita vodiče* ρ [$\Omega \cdot m$]

Rezistivita je pro různé látky rozdílná. Hodnoty pro různé materiály lze nalézt v tabulkách.

Pozor: V některých tabulkách či starších učebnicích se můžeme setkat s tím, že je zde rezistivita (dříve měrný odpor) uvedena v jednotce $\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$. Při dosazení v těchto jednotkách vychází pak průřez vodiče v mm^2 a nikoliv v m^2 , jak je tomu při dosazení v $\Omega \cdot m$.

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

Odpor vodiče je tedy přímo úměrný rezistivitě ρ materiálu, z něhož je vodič vyroben, jeho délce l a nepřímo úměrný průřezu S .

2.5 Vodivost G [S]

Vodivost je převrácená hodnota odporu. Čím lépe vede vodič elektrický proud, tím má větší vodivost a menší odpor.

$$G = \frac{1}{R} \quad [\text{S}; -, \Omega]$$

jednotkou vodivosti je Siemens [S]

Jeden Siemens je vodivost elektrického vodiče s odporem jednoho ohmu.

2.6 Konduktivita γ [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$]

Konduktivita je převrácená hodnota rezistivity.

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad [\text{S}\cdot\text{m}^{-1}, -, \Omega\cdot\text{m}]$$

2.7 Závislost odporu vodiče na teplotě

Zahřejeme-li vodič, zvětší se rozkmit atomů kolem jejich rovnovážných poloh a tím se zvětší počet srážek s jednotlivými elektrony – znesnadňuje se uspořádaný pohyb elektronů – vzrůstá elektrický odpor. Vliv teploty na odpor vodiče vyjadřuje *teplotní součinitel odporu* α [K^{-1}]. Jedná se opět o tabulkovou hodnotu.

Vztah pro závislost odporu na teplotě-

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

R_0 – odpor při počáteční (nižší) teplotě ϑ_0 [Ω]

R_{ϑ} – odpor při zvýšené teplotě ϑ [Ω]

$\Delta\vartheta$ – (čti delta, théta) – teplotní rozdíl = $\vartheta - \vartheta_0$ [K]

α – teplotní součinitel odporu [K^{-1}]

Teplotní součinitel odporu je u většiny kovů kladný a konstantní – odpor se s teplotou zvětšuje lineárně (podle přímky). U některých látek se jejich odpor se vzrůstající teplotou zmenšuje (uhlík, elektrolyty, izolanty, polovodiče). Teplotní součinitel odporu α těchto látek je pak záporný.

2.8 Rezistory

Rezistory jsou součástky vyrobené tak, aby měly co nejpřesněji stanovený elektrický odpor. Jsou to nejvíce rozšířené součástky v elektrotechnice.

2.8.1 Druhy rezistorů

1. *vrstvé rezistory* – vznikají tak, že se na keramické tělíčko nanese některou z mnoha technologií vrstva odporového materiálu (vysokoohmické rezistory)

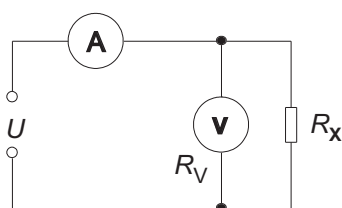
2. *drátové rezistory* – na keramické tělíčko je navinut rezistorový vodič (nízkoohmové rezistory)

3. *potenciometry* – jsou rezistory s proměnnou ohmickou hodnotou. Skládají se z rezistorové dráhy a sběracího ústrojí, které se po této dráze pohybuje, tím mění délku rezistorového materiálu, a tím i výsledný rezistor

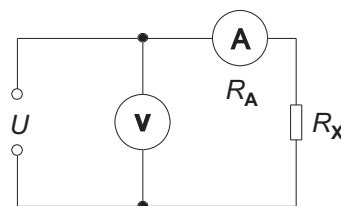
2.8.2 Měření elektrického odporu rezistorů

1. *metodou přímou* – pomocí ohmmetrů
2. *metodou nepřímou* (např. Ohmovou) – v obvodu je zapojen ampérmetr a voltmetr, z naměřených hodnot se pomocí Ohmova zákona vypočítá rezistor.

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

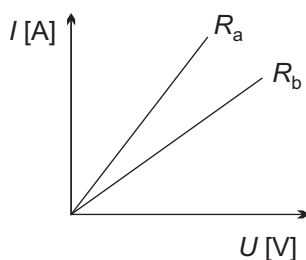


Obr. 2.05 a) Zapojení pro měření elektrických odporů malých proti odporu voltmetru



Obr. 2.05 b) Zapojení pro měření elektrických odporů mnohonásobně větších než odpor ampérmetru

Zapojení na obrázku se liší vlivem vlastní spotřeby měřících přístrojů.



Obr. 2.06 Lineárně závislý rezistor

2.9 Ohmův zákon

Ohmův zákon vyjadřuje vztah mezi napětím a proudem při konstantním (stálém) odporu vodiče. Napětí U mezi konci vodiče s konstantním odporem R je přímo úměrné proudu I , který vodičem prochází.

$$U = RI \quad [\text{V}; \Omega, \text{A}]$$

Vztah platí pouze pro obvody s lineárně závislým rezistorem.

Jeden ohm $[\Omega]$ (čti óm) je odpor vodiče, v němž stálé napětí jednoho voltu vyvolá proud jednoho ampéru.

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

Známe-li napětí na daném rezistoru, pak proud, procházející rezistorem je dán vztahem

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

Proud je přímo závislý na napětí a nepřímo závislý na odporu.

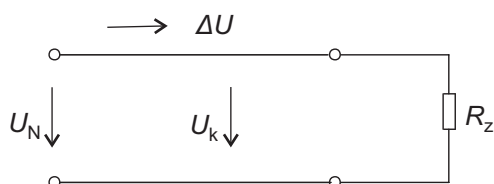
2.10 Úbytek napětí na vodiči (rezistoru) ΔU [V]

Víme, že elektrický proud je tok elektronů, které jsou do pohybu uváděny elektrickým napětím. Protéká-li elektrický proud rezistorem, můžeme zjednodušeně říci, že část energie, tedy elektrického napětí, se spotřebovává k „protlačení“ elektronů tímto rezistorem. Na rezistoru tedy dochází k úbytku napětí ΔU , které se projeví zvýšením teploty. Stejně tak i vodič je rezistorem a ze stejných důvodů na něm dochází k úbytku napětí.

$$\Delta U = U_N - U_K$$

ΔU úbytek napětí

U_N – jmenovité napětí



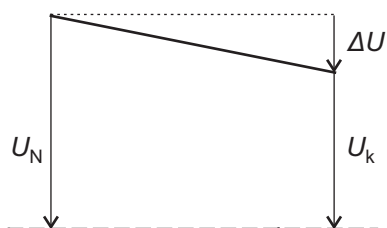
U_K – napětí na konci vedení

Dále lze úbytek napětí určit z Ohmova zákona

$$\Delta U = RI \quad [\text{V}; \Omega, \text{A}]$$

Úbytek napětí udávaný ve V se nazývá absolutní. Pro vodiče používáme v elektrotechnice název *vedení*, potom tedy mluvíme o úbytku napětí na vedení.

Relativní úbytek napětí Δu je poměr absolutního úbytku napětí ΔU ke jmenovitému napětí U_N .



Obr. 2.07 Úbytek napětí na vodiči

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_N} \cdot 100 \quad [\%]$$

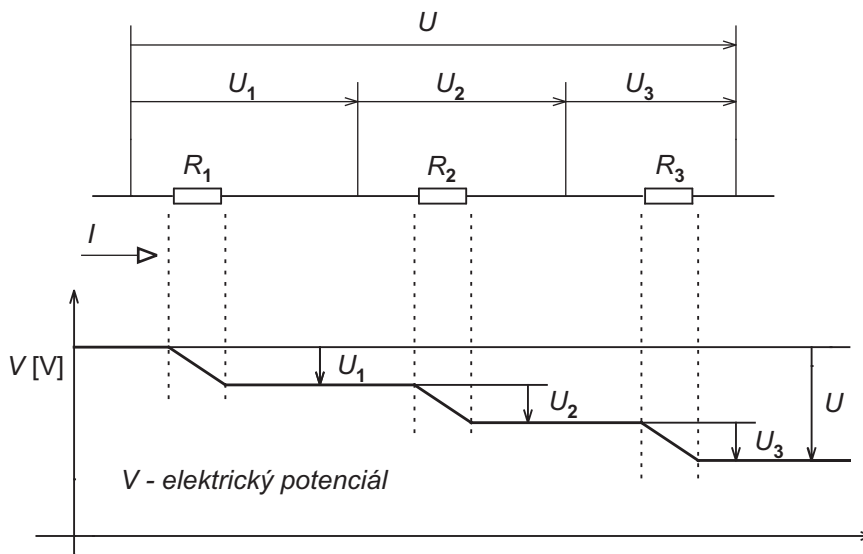
Norma povoluje maximální úbytek napětí na vedení 10 %.

2.11 Řazení rezistorů

2.11.1 Sériové řazení rezistorů

Všemi zapojenými rezistory prochází stejný proud I , protože vodivostní elektrony v obvodu nevznikají ani nezanikají. Na jednotlivých rezistorech však dochází k poklesu po-

tenciálu. Celkové napětí obvodu je rovno součtu jednotlivých napětí na jednotlivých rezistorech.



Obr. 2.08 Průběh elektrického potenciálu při sériovém řazení rezistorů

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Podle Ohmova zákona platí:

$$U = R_1 I + R_2 I + R_3 I = (R_1 + R_2 + R_3) I = R I$$

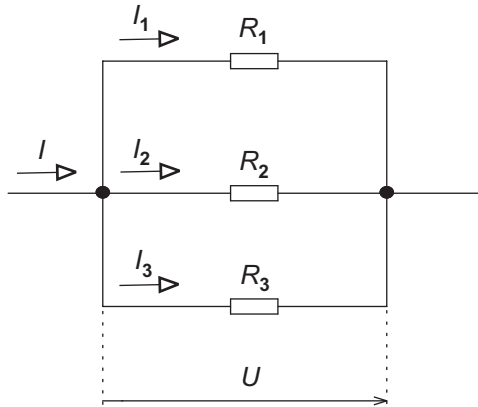
Celkový odpor R je odpor jediného rezistoru, který by obvod nahradil. Je roven součtu jednotlivých odporů.

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

Vztah platí pro libovolný počet sériově zapojených rezistorů.

2.11.2 Paralelní řazení rezistorů

Napětí na všech rezistorech je stejné – U . Celkový proud je roven součtu proudů procházejících jednotlivými rezistory, protože každý z vodivostních elektronů může projít jen jedním z rezistorů.



$$I = I_1 + I_2 + I_3,$$

Podle Ohmova zákona platí:

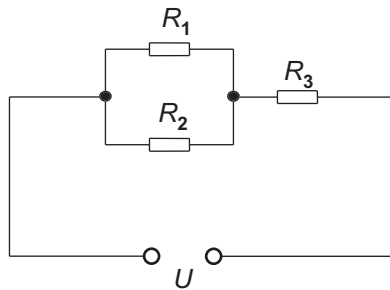
$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = U \frac{1}{R}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

Obr. 2.09 Paralelní řazení rezistorů

Vztah opět platí pro libovolný počet paralelně řazených rezistorů.

2.11.3 Smíšené řazení rezistorů (kombinace sériového a paralelního řazení)



Obr. 2.10

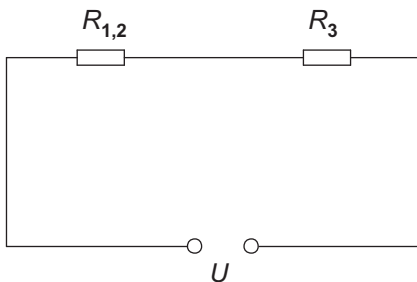
Řešíme-li obvody se smíšeně řazenými rezistory, snažíme se převést obvod pouze na sériové, případně paralelní řazení.

Příklad:

Nejprve sečteme paralelně řazené rezistory R_1 a R_2

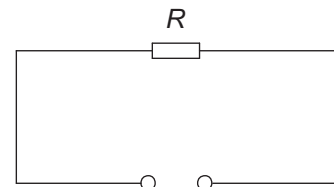
$$\frac{1}{R_{1,2}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}, \quad R_{1,2} = \frac{R_1 R_2}{R_2 + R_1}.$$

Tím jsme obvod zjednodušili na následující, kde jsme rezistory R_1 a R_2 nahradili vypočteným $R_{1,2}$. Výsledné sériové řazení řešíme:



Obr. 2.11

$$R = R_{1,2} + R_3$$



Obr. 2.12

Obdobně postupným zjednodušováním řešíme i složitější obvody.

Cvičení

1. Z jakých částí se skládá jednoduchý elektrický obvod a jaké jsou funkce těchto částí v obvodu?
2. Jaký je dohodnutý a skutečný směr elektrického proudu ve vodiči?
3. K jakým energetickým změnám dochází ve spotřebiči?
4. Vysvětlete, co je to elektrický proud.
5. Jak vysvětlujeme elektrický odpor?
6. Na čem elektrický odpor závisí?
7. Jaká je délka měděného vodiče, je-li jeho odpor 5Ω a průřez $2,5 \text{ mm}^2$? ($l = 702,24 \text{ m}$)
8. Vodič má tvar trubky o vnitřním průměru 4 cm a vnějším průměru 6 cm . Při délce 10 m je jeho elektrický odpor $1,8 \cdot 10^{-4} \Omega$. Vypočítejte rezistivitu vodiče a v tabulkách vyhledejte materiál, kterému tato rezistivita odpovídá. ($\rho = 0,0285 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)
9. Vysvětlete, jaká je závislost elektrického odporu na teplotě a proč k tomuto jevu dochází.
10. Hliníkové vedení má při teplotě -10° C odpor $7,6 \Omega$. Jaký bude jeho odpor při teplotě $+50^\circ \text{ C}$? ($R_0 = 9,42 \Omega$)
11. Vypočítejte průřez měděného vodiče při teplotě 20° C , má-li délku 850 m a při teplotě 25° C odpor $9,8 \Omega$. ($S = 1,54 \text{ mm}^2$)
12. Popište druhy rezistorů podle konstrukce.
13. Rychlovarnou konvicí prochází při 230 V proud 8 A . Určete odpor její topné spirály. ($R = 28,75 \Omega$)
14. Dvouvodičové hliníkové vedení je dlouhé 650 m a má průřez 16 mm^2 . Na jeho konci je připojen spotřebič, kterým prochází proud 20 A . Určete absolutní úbytek napětí, napětí na konci vedení a relativní úbytek napětí, je-li jmenovité napětí 230 V . Ze získaných hodnot posuďte, odpovídá-li toto vedení normě. ($\Delta U = 46 \text{ V}$, $U_k = 184 \text{ V}$, $\Delta u = 20\%$)
15. V obvodu jsou zapojeny rezistory $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ a $R_3 = 5 \text{ k}\Omega$. Nakreslete zapojení a vypočítejte jejich celkový odpor a proud tekoucí jednotlivými větvemi obvodu, jsou-li zapojeny: a/ sériově, b/ paralelně a obvod je připojen na napětí 400 V . (a/ $R = 30 \text{ k}\Omega$, $I = 13 \text{ mA}$; b/ $R = 2,72 \text{ k}\Omega$, $I = 148 \text{ mA}$)
16. Jak můžeme změřit napětí okolo 800 V , máme-li k dispozici pouze dva voltmetry, jejichž napěťový rozsah je 600 V ? Nakreslete.
17. Jak lze změřit proud o velikosti okolo 8 A , jsou-li k dispozici pouze dva ampérmetry o proudovém rozsahu 6 A ? Nakreslete.

2.12 Kirchhoffovy zákony

Kirchhoffovy zákony patří společně s Ohmovým zákonem k nejdůležitějším zákonitostem, používaných při řešení složitých elektrických obvodů.

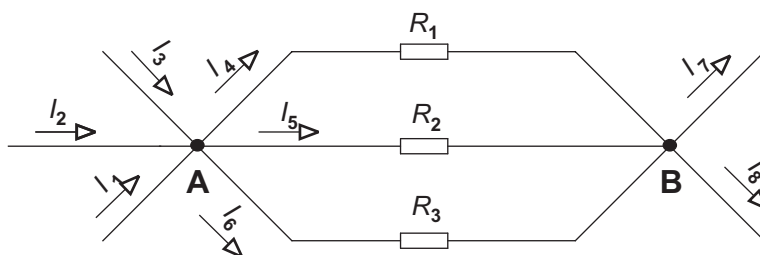
2.12.1 Kirchhoffův zákon – pro uzel elektrické sítě

Uzel sítě – místo, kde se vodivě stýkají nejméně tři vodiče

Větev – vodivé spojení sousedních uzlů

Elektrický náboj se nemůže ztratit ani samovolně vzniknout (zákon zachování elektrického náboje). Proto musí elektrony, které vstupují do uzlu, z něj opět vystoupit.

Součet proudů do uzlu přitékajících je roven součtu proudů z uzlu vytékajících.



Obr. 2.13 I. Kirchhoffův zákon

Pro uzel A tedy platí:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5 + I_6.$$

Pro uzel B platí:

$$I_4 + I_5 + I_6 = I_7 + I_8.$$

Obě rovnice můžeme psát ve tvaru:

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 - I_6 = 0 \text{ A},$$

$$I_4 + I_5 + I_6 - I_7 - I_8 = 0 \text{ A}.$$

Proudy do uzlu přitékající mají kladnou hodnotu, proudy vytékající zápornou – tedy:

$$\sum I = 0 \text{ A}.$$

Algebraický součet proudů v uzlu se rovná nule

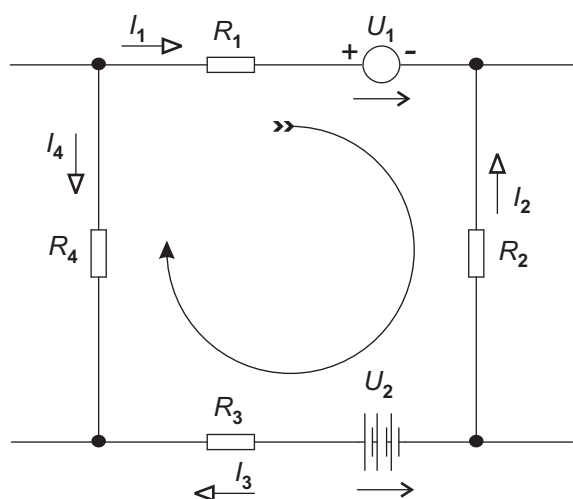
2.12.2 Kirchhoffův zákon – pro smyčku elektrické sítě

Smyčka – uzavřená dráha v části obvodu, která je tvořena větvemi.

Napětí na každém spotřebiči elektrického obvodu je dáno prací potřebnou k přemístění elektrického náboje mezi svorkami spotřebiče. Tuto práci vykonávají zdroje napětí. Projde-li náboj po uzavřené dráze, musí být příslušná práce nulová, protože se náboj vrátil na místo téhož potenciálu.

Algebraický součet všech svorkových napětí zdrojů a všech úbytků napětí na spotřebičích se v uzavřené smyčce rovná nule.

$$\sum U = 0 \text{ [V]}$$



Obr. 2.14 II. Kirchhoffův zákon

Podle 2. Kirchhoffova zákona sestojíme rovnice následujícím postupem:

a) V jednotlivých větvích označíme smysl proudu na spotřebičích. Tento smysl může být libovolný. Vyjde-li při konečném řešení některá hodnota proudu záporná, bude mít v této části obvodu proud opačný smysl.

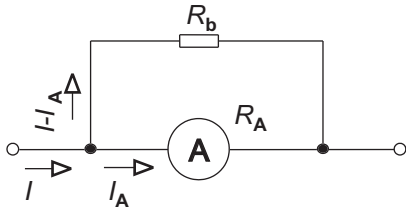
b) Zvolíme uzel, od kterého postupujeme stále stejným směrem po obvodu smyčky. Tento směr označíme šipkou. Hodnoty úbytků napětí ($R \cdot I$) budou mít kladnou hodnotu v případě, že

smysl proudu v daném spotřebiči bude stejný, jako zvolený směr postupu řešení ve smyčce. V opačném případě bude hodnota záporná. Na zdrojích volíme smysl úbytků napětí od kladného k zápornému pólu. Pro výše uvedený obrázek bude zápis rovnice následující:

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

2.13 Užití rezistorů v praxi

2.13.1 Bočník se používá k zvětšení proudového rozsahu ampérmetru. Je to rezistor paralelně připojený k ampérmetru.



Obr. 2.15 Bočník

Z druhého Kirchhoffova zákona platí:

$$R_A I_A = R_b (I - I_A), \quad \text{z toho}$$

$$R_b = \frac{R_A I_A}{I - I_A},$$

$$R_b = \frac{R_A}{\frac{I}{I_A} - 1},$$

$$R_b = \frac{R_A}{n - 1}.$$

R_b – odpor bočníku [Ω]

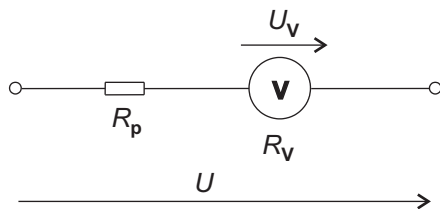
R_A – vnitřní odpor měřicího přístroje [Ω]

n – udává, kolikrát se zvětší rozsah ampérmetru $n = \frac{I}{I_A}$

I_A – proudový rozsah ampérmetru při jeho maximální výchylce [A]

I – proudový rozsah ampérmetru s bočníkem při maximální výchylce [A]

2.13.2 Předřadník – rezistor zapojený do série s voltmetrem sloužící ke zvýšení jeho měřicího rozsahu



Obr. 2.16 Předřadník

Protože úbytky napětí jsou v přímém poměru k odporům, platí:

$$\frac{U - U_v}{U_v} = \frac{R_p}{R_v},$$

$$R_v U - R_v U_v = R_p U_v,$$

$$R_v U = U_v (R_p + R_v),$$

$$n = \frac{U}{U_V} = \frac{R_P + R_V}{R_V}.$$

Číslo n vyjadřuje zvětšení napěťového rozsahu.

$$n = \frac{R_P + R_V}{R_V}$$

$$n R_V = R_P + R_V$$

$$R_P = R_V (n - 1)$$

R_P – odpor předřadníku [Ω]

R_V – vnitřní odpor voltmetru [Ω]

U_V – rozsah voltmetru při maximální výchylce [V]

U – rozsah voltmetru s předřadníkem při maximální výchylce [V]

2.14 Elektrická práce W [J]

Elektrická práce se vykoná, přesune-li se náboj Q mezi dvěma místy s rozdílným potenciálem, mezi nimiž je tedy napětí U .

$$W = QU \quad [J; C, V]$$

Jednotkou elektrické práce je joule [J] (čti džoul)

Pokud je elektrický proud v obvodu konstantní (stálý) platí: $Q = It$, $W = UIt$.

Má-li vnější část obvodu rezistanci R , pak z Ohmova zákona

$$W = RI^2t = \frac{U^2}{R}t.$$

Průchodem elektrického proudu vodičem se vodič zahřívá a vzniklé teplo se šíří do okolí vodiče. Takto vzniklé teplo se nazývá *Joul-Lencovo* teplo. Nedochozí-li současně k přeměnám elektrické energie v jiný druh energie (např. v mechanickou, chemickou...), je toto teplo rovno elektrické práci

$$Q_j = UIt = RI^2t = \frac{U^2}{R}t = W. \quad [J]$$

2.15 Elektrický výkon P [W]

Elektrický výkon je přímo úměrný práci W a nepřímo úměrný době t , po kterou se práce koná.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UIt}{t} = UI \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}]$$

Jednotkou výkonu je watt [W]

Jeden watt je výkon, při němž se rovnoměrně vykoná práce jednoho joulu za jednu sekundu.

Dosazením z Ohmova zákona za $U=R \cdot I$ dostaneme:

$$P = UI = RII = RI^2, \quad [\text{W}; \Omega, \text{A}]$$

dosadíme-li za $I = \frac{U}{R}$, pak:

$$P = UI = U \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}, \quad [\text{W}; \text{V}, \Omega]$$

lze tedy psát:

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad [\text{W}; \text{A}, \Omega, \text{V}, \Omega]$$

Definice jednoho voltu pomocí wattu:

Jeden volt je napětí mezi konci vodiče, do něhož stálý proud jednoho ampéru dodává výkon jednoho wattu.

Určení elektrické práce z elektrického výkonu:

$$W = UIt = Pt.$$

Dosazením jednotek dostáváme: $J = W \cdot s$

Jednotka joule je tedy wattsekunda. V praxi se však častěji používá kilowatthodina [kW·h], pro kterou platí:

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

2.16 Příkon a výkon, účinnost

Při činnosti elektrických strojů a přístrojů dochází ke ztrátám, a to jak elektrickým, tak mechanickým. Proto jim musíme vždy dodat více energie, než kolik pak samy vyprodukují. Dodanou energii vyjádříme *příkonem* P_1 , energii, kterou spotřebič vyprodukuje *výkonem* P_2 . Logicky plyne, že $P_1 > P_2$. Poměr mezi výkonem a příkonem je účinnost η [éta].

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad \text{nebo}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100. \quad [\%]$$

Rozdíl mezi příkonem a výkonem jsou tzv. ztráty spotřebiče.

2.17 Elektrický zdroj, jeho náhradní schéma

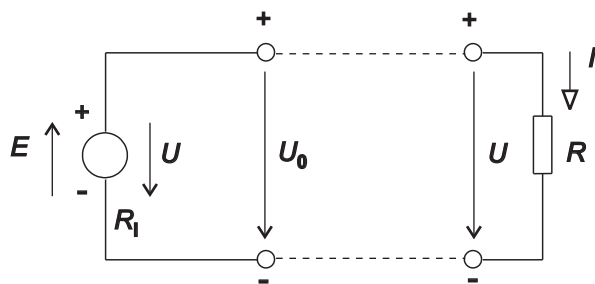
2.17.1 Druhy elektrických zdrojů

1. *Zdroje napětí* – při proměnném zatížení udržuje na výstupních svorkách téměř stálé napětí (dynamy, alternátory, stabilizátory napětí, Zenerova dioda atd.)

2. *Zdroje proudu* – při proměnlivé zátěži dodávají do obvodu přibližně stálý proud (svářečky na obloukové svařování, výstupní obvody pentody, tranzistoru atd.)

2.17.2 Veličiny charakterizující elektrický zdroj

Napětí naprázdno U_0 [V] – napětí naměřené na zdroji, který není zatížen spotřebičem ($I = 0$). Je stálé, se zatížením se nemění.



Obr. 2.17 Skutečný zdroj napětí

Elektromotorické napětí E [V] – veličina vyjadřující schopnost zdroje elektrického proudu přenášet uzavřeným obvodem elektrický náboj. Náboj přenáší uvnitř zdroje z místa s nižším potenciálem (–) k místu s vyšším potenciálem (+). Vzniká chemickými pochody

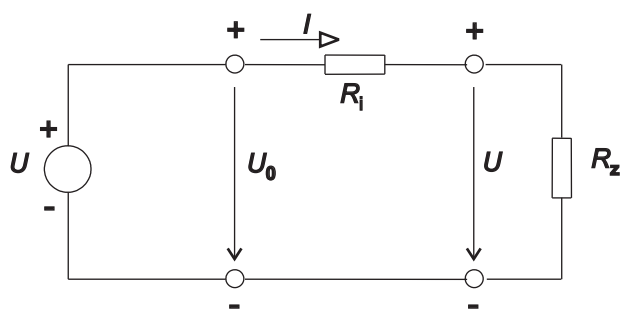
v galvanických člancích a akumulátorech, elektromagnetickou indukci atd. U nezátíženého zdroje se elektromotorické napětí až na znaménko rovná napětí na svorkách

$$E = -U$$

Napětí při zatížení U (svorkové napětí) [V] – napětí při připojení vnějšího obvodu. Každý elektrický zdroj má tzv. vnitřní odpor R_i , [Ω] na kterém vzniká průchodem proudu úbytek napětí $\Delta U = IR_i$. Čím je vyšší procházející proud, tím větší je úbytek napětí a tím je i větší pokles svorkového napětí.

Proud nakrátko I_k [A] – proud procházející zdrojem, jestliže spojíme jeho svorky vodičem zanedbatelného odporu. Pak se úbytek napětí vlivem vnitřního odporu rovná napětí naprázdno

$$U_0 \text{ a proud nakrátko } I_k = \frac{U_0}{R_i}$$



Obr. 2.18 Náhradní zdroj napětí

Jmenovitý proud I_n [A] – největší proud, na který je zdroj konstruován a který neovlivní funkci ani životnost zdroje

Po připojení vnějšího obvodu s odporem R_z začne obvodem procházet proud I a svorkové napětí U_0 poklesne na U .

$$U = U_0 - IR_i$$

Skutečný zdroj lze v praxi nahradit ideálním zdrojem.

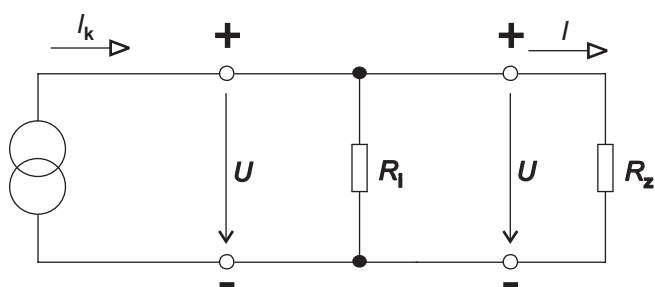
Ideální zdroj napětí má nulový vnitřní odpor a jeho svorkové napětí U_0 je stálé, protože nezávisí na odebraném proudu.

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

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

protože $IR_z = U$, platí $U_0 - U = IR_i$.

2.17.3 Ideální zdroj proudu



Obr. 2.19 Náhradní zdroj proudu

Ideální zdroj proudu dodává do obvodu stálý proud, protože jeho vnitřní elektrická vodivost je nulová. Paralelně je k němu připojen rezistor představující vnitřní odpor skutečného zdroje. Svorkové napětí ideálního zdroje proudu bude:

$$U_0 = I_k \cdot R_1.$$

Stálý proud:

$$I_k = \frac{U_0}{R_1}.$$

Svorkové napětí při zatížení:

$$U = I_1 R_1 = (I_k - I) R_1,$$

$$U = I_k R_1 - I R_1.$$

Protože

$$I_k R_1 = U_0, \text{ bude platit:}$$

$$U_0 - U = I R_1.$$

Z výše uvedeného schéma plyne:

$$U = I R_2, \quad U_0 = I (R_1 + R_2)$$

$$U_0 = \frac{U}{R_2} (R_1 + R_2).$$

Po úpravě:

$$U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_0.$$

Bude-li vnitřní odpor R_1 vzhledem k zatěžovacímu R_2 značně malý, můžeme ho zanedbat a pak platí $U = U_0$.

Svorkové napětí bude u ideálního zdroje při zatížení:

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

$$IR_z = I_k R_i - IR_i,$$

po úpravě

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

Bude-li vnitřní odpor R_i mnohem větší než zatěžovací odpor R_z , lze R_z zanedbat a proud odebíraný ze zdroje bude $I = I_k$.

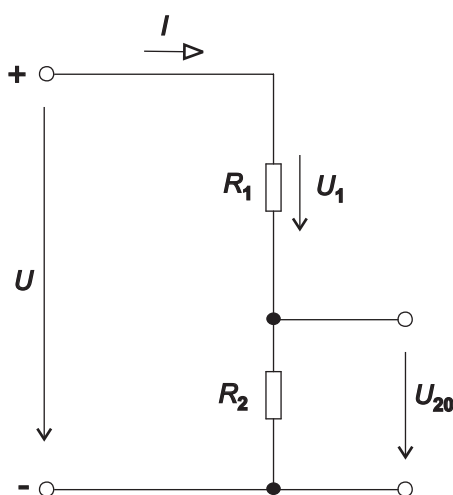
Oba výše uvedené náhradní zdroje jsou ekvivalentní, tedy rovnocenné.

2.18 Děliče napětí

Dělič napětí používáme tam, kde chceme odebírat nižší napětí než je svorkové napětí zdroje. Je tvořen dvěma rezistory zapojenými do série na plné napětí zdroje. Ze středu (odbočky) pak odebíráme snížené napětí. Podle toho, zda odebíráme z odbočky proud, můžeme děliče dělit na:

- a) nezatížený dělič
- b) zatížený dělič

2.18.1 Nezatížený dělič napětí



Obr. 2.20 Nezatížený dělič napětí

Z odbočky neodebíráme proud.

Zdroj do děliče dodává proud

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

Protože $U_{20} = R_2 I$ můžeme psát, že

$$I = \frac{U_{20}}{R_2}.$$

Dosazením obou vztahů pro I dostaneme

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

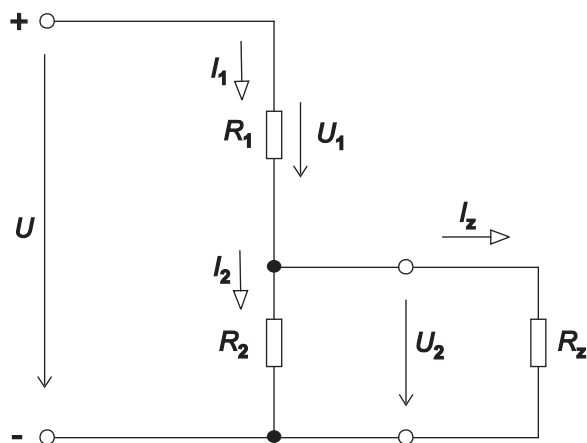
po úpravě pak

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

Pro poměr velikosti napětí a rezistorů platí:

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

2.18.2 Zatížený dělič napětí



Obr. 2.21 Zatížený dělič napětí

Odebíraný proud musí být mnohem menší než proud procházející děličem, aby napětí na výstupních svorkách příliš nekleslo.

Proud odebíraný ze zdroje děličem

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

kde ve jmenovateli je vyjádřen celkový odpor zařízení.

Proud I_z dodávaný děličem do zátěže R_z je podle prvního Kirchhoffova zákona: $I_z = I_1 - I_2$.

Z Ohmova zákona je:

$$U = \left(R_1 + \frac{R_2 R_z}{R_2 + R_z} \right) I_1.$$

Protože $I_1 = I_2 + I_z$ dostáváme:

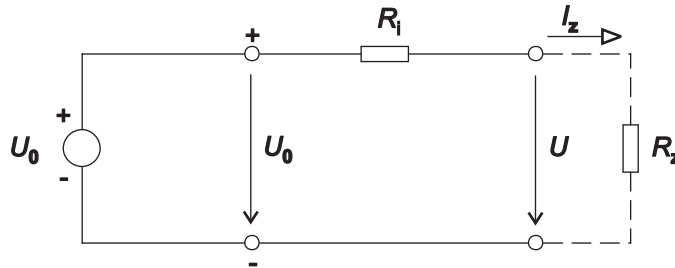
$$U_2 = \frac{R_2 R_z}{R_2 + R_z} I_1.$$

Vyjádríme-li z obou rovnic I_1 a položíme-li dané vztahy do rovnosti, dostáváme po úpravě pro svorkové napětí mezi výstupními svorkami při zatížení:

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

2.19 Théveninova poučka

Používá se pro řešení obvodů tvořených pouze lineárními součástkami (rezistor, cívka bez jádra, kondenzátor). Často se pomocí této poučky řeší výpočty zatíženého děliče napětí.



Obr. 2.22 Náhradní schéma k Théveninově poučce

Matematicky lze odvodit že:

„Libovolný obvod složený z lineárních součástek, který má dvě výstupní svorky a je zatížený zatěžovacím rezistorem R_z , můžeme nahradit obvodem ideálního zdroje napětí U_0 spojeným do série s rezistorem představujícím vnitřní odpor R_i .

Svorkové napětí ideálního zdroje U_0 se rovná napětí na výstupních svorkách U daného obvodu při odpojené zátěži R_z a při spojení všech zdrojů napětí nakrátko a vyřazení zdrojů proudových“.

Základní vztahy pro použití Théveninovy poučky, upravené pro řešení zatíženého děliče napětí

Jestliže je dán proud I zátěže, pak bude napětí U na zatěžovacím rezistoru

$$U = U_0 - R_i I_z, \quad R_i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad U_0 = \frac{U R_2}{R_1 + R_2}.$$

Jestliže bude dán odpor zatěžovacího rezistoru R_z , bude na něm napětí

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

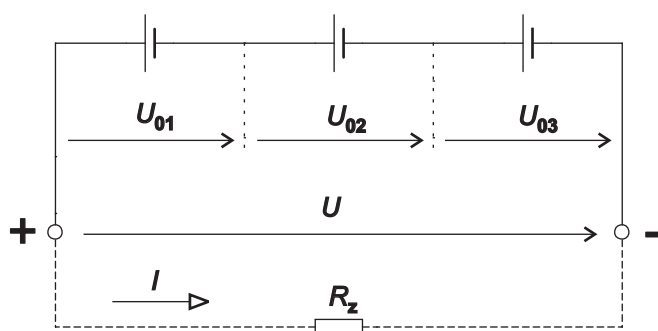
2.20 Řazení elektrických zdrojů

Elektrické zdroje můžeme spojovat (řadit) stejně jako rezistory. Spojením několika zdrojů (článků) vznikne baterie článků, tedy nový zdroj s vlastnostmi odlišnými než zdroje (články) původní.

Poznámka: V následujících úvahách budeme veličiny charakterizující článek značit malými písmeny a veličiny charakterizující baterii písmeny velkými.

2.20.1 Sériové řazení elektrických zdrojů

Kladná svorka jednoho zdroje je vždy spojena se zápornou svorkou zdroje následujícího. Z



Obr. 2.23 Sériové řazení elektrických zdrojů

náčrtu plyne: Napětí naprázdno U_0 baterie bude součtem napětí naprázdno u_0 jednotlivých článků:

$$U_0 = \sum u_0 .$$

Napětí zatížené baterie:

$$U = \sum u .$$

Vnitřní odpor baterie:

$$R_i = \sum r_i . \quad (r_i \text{ jsou řazeny do série})$$

Proud nakrátko:

$$I_k = \frac{U_0}{R_i} = \frac{\sum u_0}{\sum r_i} .$$

Proud I odebíraný z baterie při zátěži R_z :

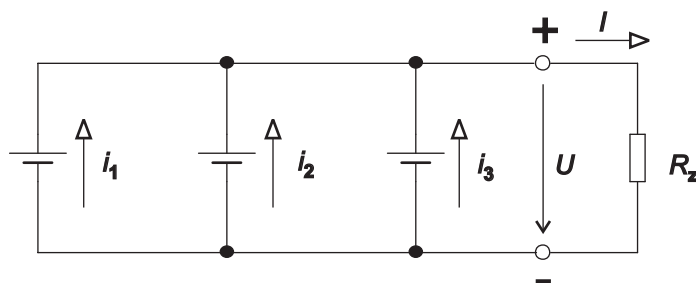
$$I = \frac{U}{R_z + R_i} .$$

Jmenovitý proud I_n , bude dán článkem s nejmenším i_n , (viz definice I_n , kap. Veličiny charakterizující elektrický zdroj).

Sériové spojení zdrojů je tzv. spojení *na napětí*, protože jeho pomocí můžeme pouze zvýšit napětí.

2.20.2 Paralelní řazení elektrických zdrojů

Při tomto řazení jsou vzájemně spojeny všechny kladné a všechny záporné svorky. Zdroje musí mít stejné napětí naprázdno u_0 , aby mezi články nevznikaly vyrovnávací proudy a tedy



Obr. 2.24 Paralelní řazení elektrických zdrojů

ztráty

(r_i a i_n mohou být rozdílné).

V praxi se vyžaduje, aby všechny články měly shodné parametry.

$$U_0 = u_0$$

Vnitřní odpor baterie R_i bude

menší než nejmenší r_i článků $\left(\frac{1}{R_i} = \frac{1}{r_{i1}} + \frac{1}{r_{i2}} + \dots + \frac{1}{r_{in}} \right)$. Jmenovitý proud baterie I_n bude součtem všech jmenovitých proudů i_n jednotlivých článků.

$$I_n = \sum i_n$$

Proud nakrátko:

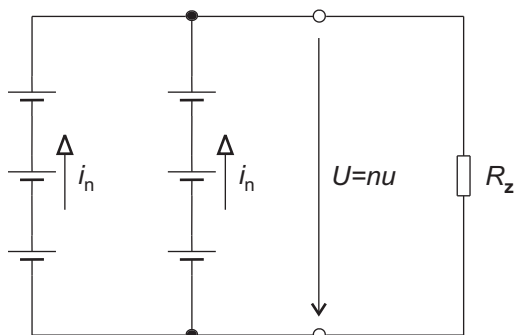
$$I_k = \frac{U_0}{R_i}$$

Proud odebíraný při zátěži R_z :

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

Paralelní spojení je spojení *na proud*. Používáme jej tam, kde je třeba větší proud než může trvale poskytnout jeden zdroj.

2.20.3 Kombinované řazení elektrických zdrojů



Obr. 2.25 Kombinované řazení elektrických zdrojů

Sérioparalelní řazení zdrojů použijeme tam, kde potřebujeme zvýšit napětí i proud. Platí zde zásady předchozích spojení. Pro jednotlivé větve platí zásady sériového spojení. Paralelně můžeme propojovat jen větve se stejným výsledným napětím. Bude-li počet článků spojených do série v jedné baterii n a počet těchto baterií spojených paralelně m , pak bude platit:

a) Napětí naprázdno U_0 se bude rovnat u_0 jedné větve. $U_0 = nu_0$

b) Svorkové napětí zatížené baterie $U = nu$

c) Vnitřní odpor baterie R_i bude paralelním součtem R_i jednotlivých větví $R_i = \frac{nr_i}{m}$

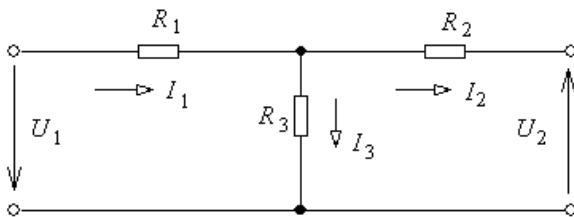
d) Jmenovitý proud I_n bude součtem i_n jednotlivých větví $I_n = mi_n$

e) Celkový počet článků je $n.m$

Cvičení

1. Definuj první a druhý Kirchhoffův zákon.

2. Podle obrázku řešte proudy I_1, I_2, I_3 , jsou-li $R_1 = 3 \Omega, R_2 = 6 \Omega, R_3 = 2 \Omega, U_1 = U_2 = 12 \text{ V}$ (opačná polarita!) ($I_1 = 3,33 \text{ A}, I_2 = 2,33 \text{ A}, I_3 = 1 \text{ A}$)



3. Ampérmetr s měřicím rozsahem 6 mA a vnitřním odporem 6 Ω má být použit pro rozsah 120 mA. Navrhněte bočník pro tento rozsah. ($R_b = 0,32 \Omega$)

4. Navrhněte předřadník pro voltmetr s měřicím rozsahem 12 V a vnitřním odporem 200 Ω , abychom mohli měřit napětí až do 60 V. ($R_p = 800 \Omega$)

5. Definujte elektrickou práci. Uveďte jednotky, které se v elektrotechnice používají pro vyjádření její velikosti. Jaký je vztah mezi těmito jednotkami a jednotkou používanou pro vyjádření mechanické práce v obecné fyzice?

6. Určete výkon a práci elektrického proudu 6 A, které vykoná průchodem vodiče o odporu 10 Ω za 5 hodin. Práci vyjádřete ve Wh i J. ($P = 360 \text{ W}, W = 6,48 \text{ MJ} = 1,8 \text{ kWh}$)

7. Jaká napětí můžeme měřit na svorkách elektrického zdroje? Jaký je mezi nimi rozdíl?

8. Co je to elektromotorické napětí a čemu se rovná?

9. Stejnoseměrný zdroj má napětí naprázdno 24 V, vnitřní odpor 0,12 Ω . Je k němu připojen odpor 5,88 Ω . Vypočítejte svorkové napětí zdroje, úbytek napětí způsobený vnitřním odporem zdroje a proud nakrátko. ($I = 4 \text{ A}; U = 23,52 \text{ V}; I_k = 200 \text{ A}; \Delta u = 0,48 \text{ V}$)

10. K čemu slouží dělič napětí? Nakreslete jej.

11. Jaké je napětí na odbočce nezatíženého děliče, který je sestaven z rezistorů $R_1 = 50 \Omega$ a $R_2 = 100 \Omega$. Napětí zdroje je 120 V. ($U_2 = 80 \text{ V}$)

12. Nakreslete schéma vyjadřující Théveninovu poučku a slovně ji definujte.

13. 10 článků s napětím naprázdno 1,5 V a vnitřním odporem 0,1 Ω je spojeno a/ sériově, b/ paralelně. K takto vzniklé baterii je připojen rezistor o odporu 2,5 Ω . V obou případech vypočítejte vnitřní odpor, napětí naprázdno, proud a svorkové napětí.

(a/ $R_i = 1 \Omega$, $U_0 = 15 \text{ V}$, $I = 4,29 \text{ A}$, $U = 10,71 \text{ V}$; b/ $R_i = 0,01 \Omega$, $U_0 = 1,5 \text{ V}$, $I = 0,6 \text{ A}$, $U = 1,49 \text{ V}$)

14. Akumulátorové olověné články s napětím naprázdno 2,1 V, vnitřním odporem 0,015 Ω a se jmenovitým proudem 5 A máme sestavit v baterii se svorkovým napětím při zatížení 24 V a vybíjecím proudem 20 A. Určete počet článků, způsob jejich zapojení a proud nakrátko baterie. (48 článků, $I_k = 560 \text{ A}$)

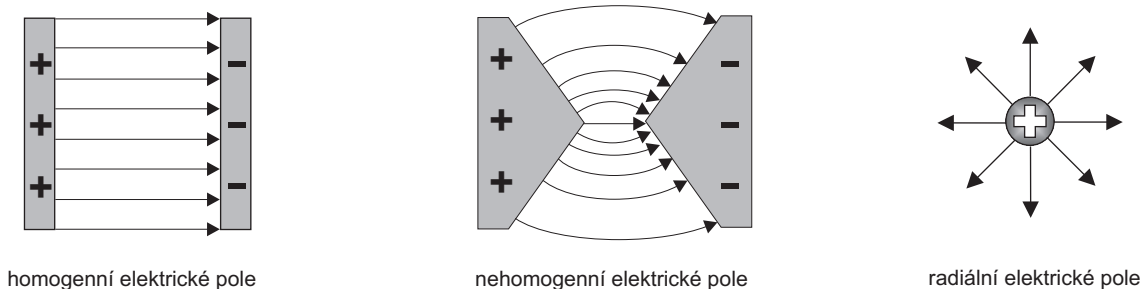
3. Elektrostatika

Elektrostatika se zabývá elektrickými náboji v klidu. Jejím opakem je elektrodynamika, která se zabývá pohybem elektricky nabitých částic, tedy elektrickým proudem.

Elektrický náboj získá těleso, které je zelektrizováno, tedy takové u kterého dojde k nerovnováze mezi počtem elektronů a protonů (např. třením). Zelektrizováním vznikají vždy stejně velké elektrické náboje s opačnou polaritou. Nikdy nemůže existovat jen kladný či jen záporný náboj. Pro zachování rovnováhy v přírodě vždy vznikne náboj opačný a stejně velký.

3.1 Elektrické pole

Elektricky nabitá tělesa na sebe vzájemně silově působí, a to tak, že tělesa s nesouhlasnými póly se přitahují a tělesa s póly souhlasnými se odpuzují. Prostor působení těchto sil je elektrické pole. Znázorňujeme je pomocí siločar, což jsou myšlené dráhy, po kterých by se pohyboval bodový náboj. Směr siločar byl konvenčně (dohodou) stanoven od kladného k zápornému náboji.



Obr. 3.01 Druhy elektrických polí podle průběhu siločar

Vlastnosti siločar:

1. Vystupují kolmo z těles a nikde se neprotínají
2. V homogenním elektrickém poli jsou rovnoběžné
3. Na hranách a hrotech jsou blíže u sebe

3.2 Coulombův zákon

Vyjadřuje velikost síly působící mezi dvěma bodovými náboji.

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 vzdáleností r .

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad [\text{N}; \text{m} \cdot \text{F}^{-1}, \text{C}, \text{C}, \text{m}]$$

Kde k vyjadřuje vliv prostředí, ve kterém na sebe náboje působí.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

ϵ [epsilon], permitivita prostředí [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$], je tabulková hodnota.

Permitivita vakua (vzduchu) $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

k pro vakuum (vzduch)

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cong 9 \cdot 10^9 [\text{m} \cdot \text{F}^{-1}]$$

Elektrické pole je látkami různě zeslabováno. Toto zeslabení vyjadřuje tzv. relativní permitivita ϵ_r , která je podílem permitivity daného prostředí a vakua.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Dosadíme-li z tohoto vztahu $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ do Coulombova zákona, dostaneme:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

3.3 Intenzita elektrického pole E [$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$]

Vyjadřuje změnu hustoty siločar se vzdáleností od bodového náboje. Je podílem síly F a velikosti náboje Q .

$$E = \frac{F}{Q} \quad [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}; \text{N}, \text{C}]$$

Dosadíme-li za F vztah z Coulombova zákona, pak po úpravě

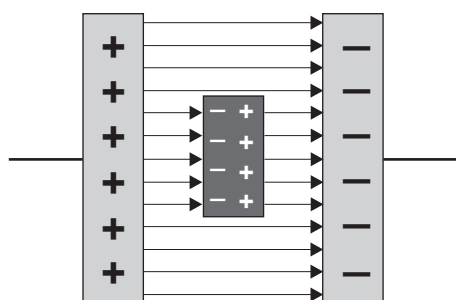
$$E = k \cdot \frac{Q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad [\text{V}\cdot\text{m}^{-1}]$$

Ze vztahu je vidět, že intenzita klesá s kvadrátem (druhou mocninou) vzdálenosti.

Pozn.: Všimněme si podobnosti s gravitačním zákonem a se vztahem pro intenzitu gravitačního pole.

3.4 Vodič v elektrickém poli

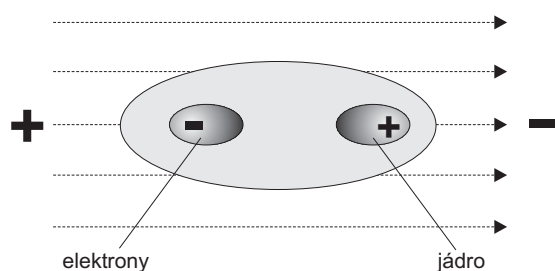
Umístíme-li vodič do elektrického pole tak, aby vodič propojil oba náboje, vznikne kolem vodiče okamžitě elektrické pole, které uvede do pohybu volné elektrony. Vodičem bude procházet elektrický proud. Umístíme-li vodič do tohoto pole tak, aby oba náboje nespojoval,



Obr. 3.02 Vodič v elektrickém poli

dojde k tzv. *elektrické indukci*. Ve vodiči se náboje vlivem vnějšího elektrického pole přeskupí tak, že tam, kde do něho vstupují siločáry, se nahromadí volné elektrony (jsou přitahovány kladným nábojem) a tato strana se nabije záporně. Opačná strana, tam, kde siločáry vystupují, tím získá náboj kladný (viz. Obr.).

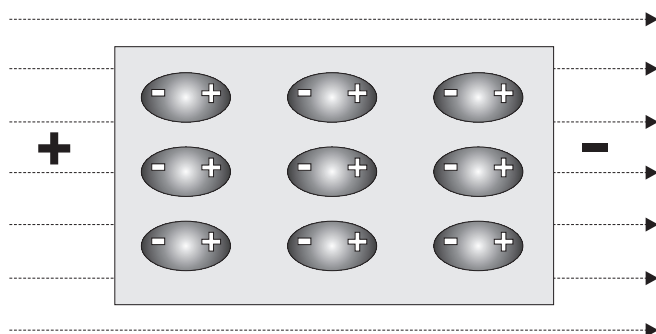
3.5 Dielektrikum (izolant) v elektrickém poli



Obr. 3.03 Polarizovaný atom

Přestože v dielektriku nejsou volné elektrony, vnější elektrické pole na něj působí. Toto pole totiž působí na elektricky nabitě částice v jeho atomech. Podle směru elektrického pole se elektrony a protony (vázané v jádře) přemístí na opačné strany atomu, dojde k *polarizaci atomu*, čímž se

z jednotlivých atomů (případně molekul) stávají tzv. *dipóly*.



Obr. 3.04 Model polarizovaného dielektrika

Vlivem polarizace povrchových atomů se těleso z dielektrika jeví jako elektricky nabitě, protože jedna jeho vrstva (strana) má převládající kladný a druhá záporný náboj.

Uspořádáním dipólů v dielektriku vždy vzniká vnitřní elektrické pole,

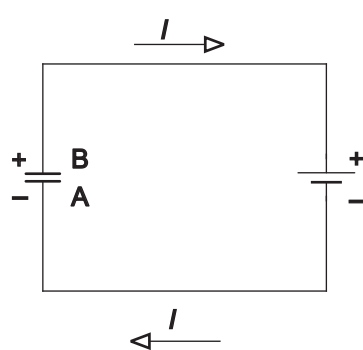
které na principu zákona zachování energie působí proti poli vnějšímu, které tím zmenšuje. Proto je relativní permitivita látek vždy větší než vakua (ϵ_r vakua = 1, ϵ_r látek > 1).

Průraz dielektrika – vzniká v případě, že se intenzita vnějšího elektrického pole zvýší nad určitou mez. Dojde totiž k vytržení některých elektronů z elektronových obalů. Ty pak začnou lavinovitě strhávat další elektrony a dielektrikem začne procházet proud.

Elektrická pevnost – vyjadřuje odolnost dielektrika vůči průrazu [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]. Závisí na chemické čistotě, povrchové čistotě, teplotě, tlaku, vlhkosti prostředí, mechanickém namáhání atd.

3.6 Kondenzátory

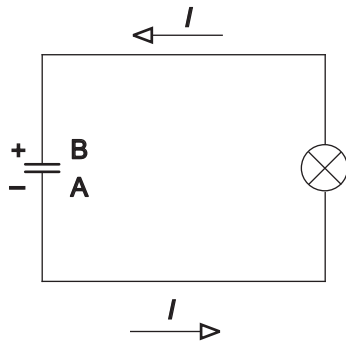
Kondenzátory jsou zařízení, která umožňují hromadit elektrický náboj. Nejjednodušším je deskový kondenzátor, který je tvořen dvěma vodivými deskami, které jsou odděleny dielektrikem.



Obr. 3.05 Nabíjení kondenzátoru

Připojíme-li tyto desky (na obr. 3.05 označeny **A** a **B**), které jsou bez náboje na zdroj napětí, musí dojít k vyrovnání potenciálů mezi těmito deskami a póly zdroje. Ze záporného pólu začnou proudit elektrony na desku **A**, vznikne na ní záporný pól kondenzátoru (je zde naznačen skutečný pohyb elektronů). Kladný pól zdroje odčerpává přebytečné elektrony z desky **B**, vznikne zde kladný pól kondenzátoru. Celý děj probíhá do vyrovnání potenciálů na jednotlivých pólech a deskách.

Proud, který přitom mezi deskami a póly protéká, se nazývá *nabíjecí proud*. Odpojíme-li zdroj, náboje zůstanou na deskách kondenzátoru. Jestliže nyní místo zdroje připojíme spotřebič, například žárovku, obvod bude uzavřen a elektrony začnou z desky **A** proudit přes žárovku tam, kde je jich nyní nedostatek, tedy na desku **B**. Žárovka bude svítit, a to až do té doby, než se potenciály desek vyrovnají. Proud se nazývá *vybíjecí*



Obr. 3.06 Vybíjení kondenzátoru

Napětí mezi deskami kondenzátoru

proud. Každé těleso je schopné pojmout jen náboj určité velikosti. Říkáme, že má kapacitu C . Její jednotkou je farad [F]. Kapacita kondenzátoru je přímo úměrná obsahu S účinné plochy desek (ve které se desky překrývají), permitivitě dielektrika ε a nepřímo úměrná vzdálenosti desek d .

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad [\text{F}; \text{F} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}^2, \text{m}]$$

$$U = \frac{Q}{C} \quad [\text{V}; \text{C}, \text{F}]$$

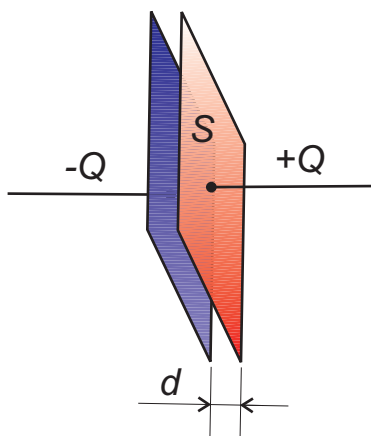
Protože $C = \frac{Q}{U}$, tak *definice faradu* zní:

Jeden farad je kapacita elektrického kondenzátoru, který při napětí jednoho voltu pojme náboj jednoho coulombu.

3.7 Intenzita elektrického pole kondenzátoru

U deskového kondenzátoru je mezi jeho deskami homogenní elektrické pole s intenzitou

$$E = \frac{U}{d} \quad [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}; \text{V}, \text{m}],$$

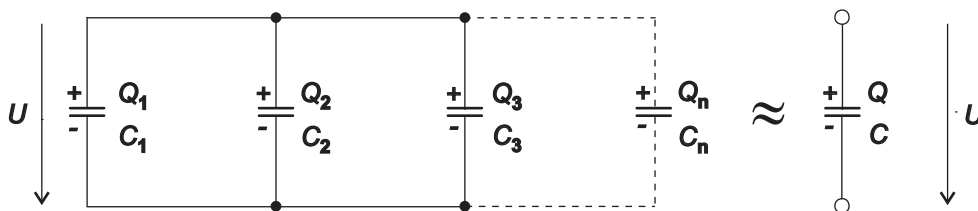


kde d je vzdálenost desek kondenzátoru a U je rozdíl potenciálů těchto desek.

Obr. 3.07 Deskový kondenzátor

3.8 Řazení kondenzátorů

3.8.1 Paralelní řazení kondenzátorů



Obr. 3.08 Paralelní řazení kondenzátorů

Na všech kondenzátorech je stejné napětí U . Při rozdílných kapacitách C mají však rozdílné náboje Q :

$$Q_1 = C_1 U, \quad Q_2 = C_2 U, \text{ atd.}$$

Spojení lze nahradit jediným kondenzátorem s celkovým nábojem $Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$, takže

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

dělením U pak

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n. \quad [\text{F}]$$

Při paralelním spojení kondenzátorů je výsledná kapacita rovna součtu kapacit jednotlivých kondenzátorů.

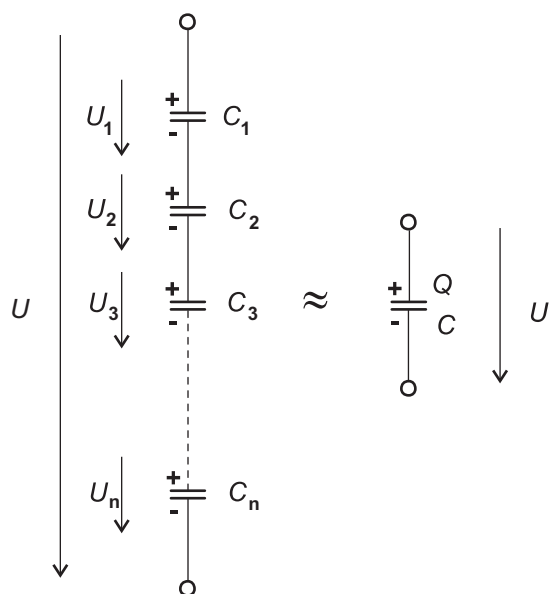
Paralelním spojením kondenzátorů se zvětší kapacita při stejném provozním napětí.

3.8.2 Sériové řazení kondenzátorů

Kondenzátory se nabíjejí elektrickou statickou indukcí tak, že náboj $+Q$ přivedený na desku prvního kondenzátoru váže na druhé desce náboj $-Q$, čímž se stejně velký náboj $+Q$ uvolňuje na desku druhého kondenzátoru. Ten opět váže náboj $-Q$... atd.

Všechny kondenzátory tedy budou mít stejně velký náboj Q .

Celkové napětí na kondenzátorech



Obr. 3.09 Sériové řazení kondenzátorů

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

napětí na jednotlivých kondenzátorech

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{Q}{C_2} \text{ atd.}$$

Dosažením do vztahu pro napětí

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

dělením nábojem Q

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

Výsledná kapacita kondenzátorů spojených do série je tedy menší než kapacita kondenzátoru s nejmenší kapacitou, lze je však připojit na vyšší provozní napětí.

Při sériovém spojení se převrácená hodnota výsledné kapacity rovná součtu převrácených hodnot jednotlivých kapacit.

3.9 Druhy kondenzátorů

1. *Svitkové kondenzátory* – lze podle použitého dielektrika dělit na:

- *Kondenzátory s papírovým dielektrikem* – místo desek mají proužky kovové fólie, mezi něž je jako dielektrikum vložen speciální tenký papír. Vše je svinuto do válečku a ten je zpevněn povlakem z termoplastu, či kovu.
- *Kondenzátory z metalizovaného papíru* – (MP kondenzátory) mají metalizovanou (pokovenou) vrstvu nanesenou na papír. Jsou lehčí a menší než s papírovým dielektrikem. Při průrazu dielektrika u nich nedochází k trvalému zkratu, ale regenerují se a slouží dále.

- *Plastové kondenzátory* – dielektrikum tvoří fólie z plastu. Polepy jsou z hliníkové fólie (K kondenzátory), nebo jsou na plastovou fólii tvořící dielektrikum napařeny kovové vrstvy (MK kondenzátory).

2. Keramické kondenzátory

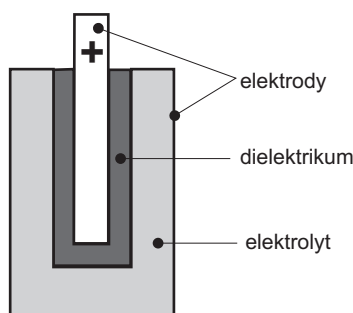
Dielektrikum je keramický materiál. Na povrch tenkostěnného keramického tělíska jsou oboustranně napařeny elektrody z ušlechtilého kovu. Tyto kondenzátory se vyznačují zvláště malými rozměry, což je předurčuje pro použití na deskách s plošnými spoji.

4. Kondenzátory slídové

Dielektrikum je ze slídy. Používají se pro obvody s vysokou frekvencí. Zvukově nejlepší kondenzátory pro korekce, filtry, atd.

3. Elektrolytické kondenzátory

Mají hliníkové (Al) elektrody obklopené kapalným nebo tuhým elektrolytem. Z kondenzátorů mají největší kapacitu (až mF). Je u nich nutno dodržet polaritu, jinak dojde ke zničení.



Obr. 3.10 Elektrolytický kondenzátor

4. Kondenzátory s proměnnou kapacitou

Kapacita se mění tak, že se mezi sebe zasouvají elektrody ve tvaru desek. Tím se mění jejich účinná plocha S

a současně i kapacita C kondenzátoru. Dielektrikum je převážně vzduch, případně polystyren, olej nebo jiné látky.

Cvičení

1. Kde se vyskytuje elektrické pole?
2. Jakým způsobem znázorňujeme elektrické pole a jeho intenzitu? Nakreslete.
3. Co je to elektrické pole homogenní a nehomogenní?
4. Jaké vlastnosti mají elektrické siločáry?
5. Jakou silou na sebe vzájemně působí dva bodové náboje $+10 \mu\text{C}$ a $-30 \mu\text{C}$ ve vzduchu, jsou-li od sebe vzdáleny 2 cm? Odpuzují se či přitahují? ($F = 6750 \text{ N}$)
6. V jaké vzdálenosti vyvolá bodový náboj $20 \mu\text{C}$ umístěný ve vzduchu intenzitu elektrického pole $2,25 \cdot 10^7 \text{ Vm}^{-1}$? ($r = 0,089 \text{ m}$)
7. Jak se chovají volné elektrony ve vodiči, který je umístěn v elektrickém poli? Nakreslete.

8. Co to je polarizace atomu a jak k ní dochází?
9. Jakým způsobem může dojít k průrazu dielektrika?
10. K zapálení plynu v plynovém zapalovači se většinou využívá tzv. piezoelektrického jevu. Zjistěte, jak tento jev vzniká (slovník, internet atd.).
11. Popište deskový kondenzátor a vysvětlete, k čemu kondenzátory slouží.
12. Vypočítejte kapacitu deskového kondenzátoru, který má tloušťku dielektrika 0,1 mm. Dielektrikem je kondenzátorový papír s relativní permitivitou 3. Elektrody mají účinnou plochu 0,3 m². (C = 79,6 nF)
13. Uveďte druhy kondenzátorů podle způsobu konstrukce.

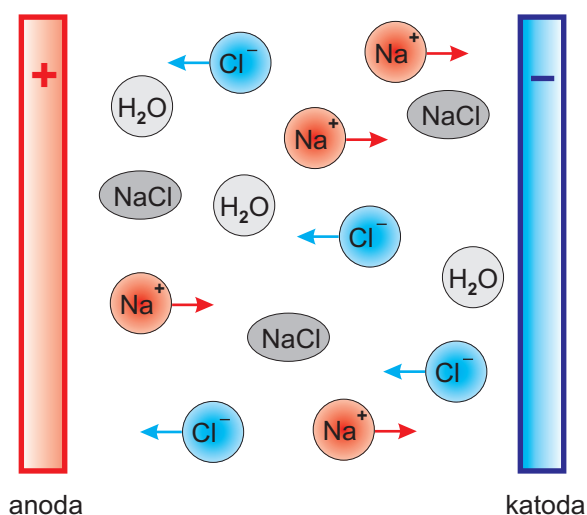
4 Elektrický proud v kapalinách, plynech, vakuu a polovodičích

Aby látkou mohl procházet elektrický proud, musí být splněny dvě podmínky. Látka musí obsahovat volně pohyblivé nosiče proudu a musí existovat elektrické pole v látce. V kapalinách a plynech se jako nosiče elektrického proudu uplatňují ionty. Ionty jsou částice s kladným nábojem, tzv. **kationty** (atomu schází v elektrickém obalu elektrony) nebo částice se záporným nábojem, tzv. **anionty** (atom s více elektrony než má neutrální atom).

4.1 Vedení elektrického proudu v kapalinách

Provedeme pokus: Do čisté skleněné nádoby nalijeme destilovanou vodu a do ní vložíme dvě vodivé desky, tzv. elektrody. Tyto elektrody připojíme ke zdroji napětí a ampérmetrem měříme proud v obvodu. Zjistíme, že obvodem neprochází žádný, nebo jen velmi nepatrný proud. Destilovaná voda nevede elektrický proud, je izolant. Jestliže do vody přidáme malé množství chloridu sodného NaCl (kuchyňská sůl), začne obvodem procházet proud.

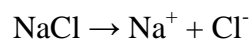
Pokus svědčí o tom, že po přidání soli, kyseliny nebo zásady se roztok těchto látek stává elektricky vodivý. Vznikly v něm ionty a tím byla splněna první podmínka pro vedení proudu v kapalinách. Kapalina, která obsahuje ionty, se nazývá **elektrolyt**.

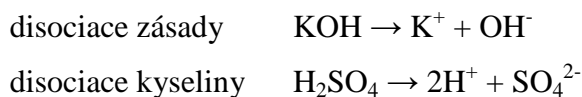


Obr. 4.01 Vedení proudu v kapalinách

Příkladem elektrolytu je roztok chloridu sodného. Kuchyňská sůl se rozštěpí na záporné ionty chlóru Cl⁻ a kladné ionty sodíku Na⁺. Tím vznikne roztok, který obsahuje volné ionty. Tento děj se nazývá **elektrolytická disociace**.

Příklady disociace: disociace soli

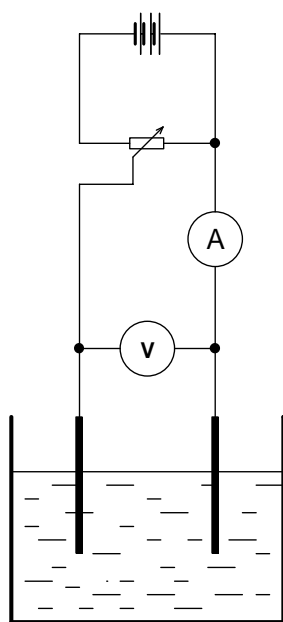




Aby vznikl elektrický proud, musíme v elektrolytu vytvořit elektrické pole. To vznikne připojením elektrod na zdroj napětí. Elektroda spojená s **kladným polem** zdroje se nazývá **anoda**, elektroda spojená se **záporným polem** zdroje se nazývá **katoda**.

Po připojení elektrod ke zdroji napětí se původně chaotický pohyb iontů změní v pohyb uspořádaný. Kladně nabitě kationty Na^+ se začnou pohybovat k záporně nabitě elektrodě – katodě a záporně nabitě anionty Cl^- ke kladné elektrodě - anodě. Při dotyku kationtů sodíku s katodou se z katody doplní sodíku chybějící elektrony a atom se stává elektricky neutrální. Odčerpané elektrony na katodě se doplňují vodičem ze zdroje. Anionty Cl^- odevzdávají při styku s anodou přebytečné elektrony, ty pak z anody odcházejí vodičem do zdroje. Ionty se mění v neutrální atomy či skupiny atomů a přitom se vylučují nebo reagují s materiálem elektrody. Tento děj se nazývá **elektrolýza**.

Kovy a vodík vytváří kationty a při průchodu proudem se vylučují na katodě. Plyny (kromě vodíku) tvoří anionty a vylučují se na anodě.



Obr. 4.02 Schema měření voltampérové charakteristiky elektrolytického vodiče

Pokus: Do nádoby s roztokem CuSO_4 vložíme dvě měděné elektrody a sestavíme obvod. Pomocí potenciometru zvyšujeme napětí přivedené na elektrody a měříme proud procházející elektrolytem (viz obr. 4.02).

Měřením se přesvědčíme, že proud je přímo úměrný napětí (viz obr. 4.03). Při malém proudu platí tedy Ohmův zákon: $I = \frac{U}{R}$. Při velkém proudu se vedení proudu účastní všechny volné ionty, velikost procházejícího proudu už dál neroste ani při zvyšování napětí. Ohmův zákon už neplatí.

Použijeme-li uhlíkové nebo platinové elektrody, naměříme jinou závislost proudu na napětí. Pokud nastavíme malé napětí, vznikne nepatrný proud, který opět zanikne. Proud s napětím začne růst lineárně až po překročení

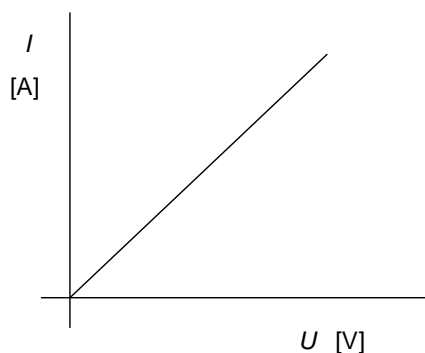
tzv. rozkladného napětí U_r (viz obr. 4.04). Závislost proudu na napětí je dána vztahem:

$$I = \frac{U - U_r}{R}.$$

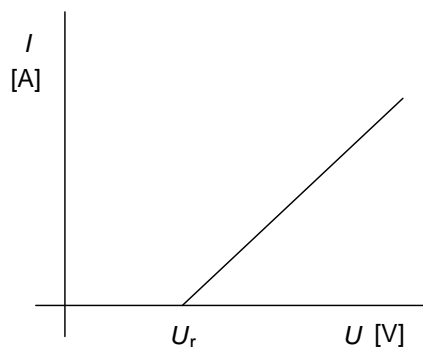
Pokud od sebe elektrody oddálíme nebo snížíme hladinu elektrolytu, proud se zmenší.

Odpor elektrolytického vodiče se mění v závislosti na délce vodiče l a jeho průřezu S

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



Obr. 4.03 Měření voltampérové charakteristiky elektrolytického vodiče



Obr. 4.04 Měření voltampérové charakteristiky elektrolytického vodiče po překročení rozkladného napětí

Měrný elektrický odpor elektrolytu ρ závisí na jeho teplotě, s rostoucí teplotou klesá.

4.1.1 Využití elektrolýzy. Koroze kovů

Chemické změny, které probíhají na elektrodách při elektrolýze, mají praktické využití zejména proto, že se na katodě vylučuje čistý kov.

Elektrometalurgie – elektrolytická výroba velmi čistých kovů (např. čistá tzv. elektrolytická měď, čisté železo, hliník).

Elektrolytické pokovování (galvanostegie) – elektrolytické nanášení vrstvy kovu na povrch výrobků zhotovených z materiálů podléhajících korozi na jejich ochranu nebo ke zlepšení vzhledu výrobku (např. galvanické pokovování mědi, chromem či niklem).

Galvanoplastika – elektrolytické vytváření odlitků. Voskový otisk se potáhne tenkou vodivou grafitovou vrstvou, tím vytvoří katodu. Vrstva kovu se galvanicky usadí na voskovém otisku a postupně vytvoří formu.

ELOX = elektrolytické oxidování hliníku – hliníkový předmět (např. antény) se při eloxování upevní jako anoda na kladný pól zdroje proudu, oxidací se na něm vytvoří kompaktní vrstva Al_2O_3 . Eloxované povrchy jsou tvrdé, lze je barvit a vytvářejí izolační vrstvu.

Elektrolytický kondenzátor – elektrody tvoří dvě svinuté hliníkové folie, které jsou od sebe oddělené vrstvou papíru napuštěného elektrolytem. Výhodou tohoto kondenzátoru je velká kapacita při malých rozměrech.

Elektrolytická koroze – narušování látky elektrochemickými ději. Vzniká tak, že na povrchu kovů ulpívají nečistoty a vytvářejí ve vlhkém prostředí galvanické články. Kov se pak vlivem elektrolýzy mění na látky, které mají mnohem menší soudržnost (např. elektrolytická koroze železa a oceli, projevuje se rezavěním).

4.1.2 Faradayovy zákony elektrolýzy

Během elektrolýzy probíhají v elektrolytu látkové změny. Při průtoku elektrického proudu elektrolytem končí usměrněný pohyb iontů na elektrodách, kde ionty odevzdávají svůj náboj a vylučují se na povrchu elektrod jako atomy nebo molekuly, anebo chemicky reagují s materiálem elektrody nebo s elektrolytem. Tyto děje kvantitativně popisují Faradayovy zákony.

1. Faradayův zákon elektrolýzy

Hmotnost látky vyloučené při elektrolýze je přímo úměrná součinu stálého proudu I a doby t , po kterou proud procházel

$$m = AIt$$

Konstanta úměrnosti A určuje hmotnost dané látky vyloučené proudem 1 A za dobu 1 s, tzn. nábojem 1 C. Tato konstanta se nazývá elektrochemický ekvivalent, udává se v jednotkách $\text{kg}\cdot\text{C}^{-1}$.

2. Faradayův zákon elektrolýzy

Látková množství různých látek vyloučených stejným nábojem z různých elektrolytů jsou chemicky ekvivalentní.

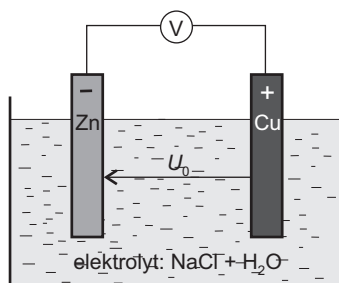
$$A = \frac{1}{F} \frac{M_m}{\nu}$$

kde **Faradayova konstanta** $F = 9,650 \cdot 10^4 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$, ν – oxidační číslo, M_m – molární hmotnost.

4.1.3 Chemické zdroje napětí

Chemické zdroje napětí jsou zdroje, ve kterých napětí vzniká při chemických reakcích.

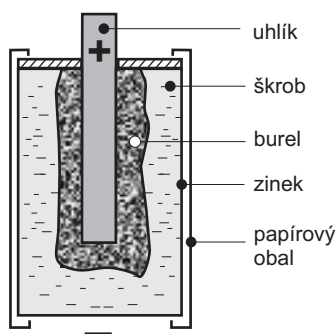
1. Galvanické články - jsou nejstarší použitelné zdroje napětí. Dochází u nich k přeměně chemické energie na elektrickou při oxidačně redukční reakci.



Obr. 4.05 Voltův galvanický článek

a) *Voltův článek* - Ionty přecházejí z elektrolytu na elektrody – tím se mezi elektrodami (deskami článků) vytváří napětí, protože kladné ionty trvale odčerpávají elektrony za záporné elektrody článku. Záporné ionty zase odevzdávají elektrony kladné elektrodě článku.

Kladnou elektrodou je uhlíkový váleček, který je obklopen směsí koksu a burelu (dvojjchroman draselný). Proud, procházející článkem vytváří kolem uhlíkové elektrody bubliny vodíku, ten se oxidací burelem mění na vodu. Na elektrodě tedy nemůže vznikat povlak plynu, který by zabránil průchodu proudu. Kromě toho se do elektrolytu vrací voda. Zápornou elektrodou je zinkový kalíšek tvořící obal článku. Napětí na článku je asi 1,5 V, časem však klesá na 0,9 až 0,6 V, kdy končí životnost článku buď proděravěním zinkového obalu, nebo vyschnutím elektrolytu.



Obr. 4.06 Suchý článek

b) *Suchý článek* - elektrolyt je rosolovitý, vzniká zahuštěním salmiaku (chlorid sodný) škrobem nebo moukou.

c) *Danielův galvanický článek* - je složen ze dvou elektrolytů, které jsou odděleny pórovitou překážkou. Užívají se v kapesních svítilnách, hodinkách, kalkulátorech.

2. Akumulátory jsou vícenásobně použitelné zdroje elektrického napětí. Aby se staly zdrojem napětí, musí se nejprve nabít.

a) *Olověné akumulátory* - Elektrody jsou ze slitiny olova Pb a antimonu Sb, mají tvar mřížce, do které je u kladné elektrody elektricky natlačeno minium (oxid olovnato-olovičitý Pb_3O_4) a u záporné oxid olovnatý (PbO). Elektrody jsou ponořeny do 30% vodného roztoku kyseliny sírové (H_2SO_4). Elektrody se při ponoření do elektrolytu pokryjí síranem olovnatým ($PbSO_4$). Při nabíjení se na katodě vylučuje olovo Pb^{2+} a na anodě kysličník olivičitý PbO_2 a uvolňuje se výbušný vodík. Chemickou reakcí tedy lze na elektrodách vytvořit elektrický náboj a tak

akumulátor nabít. Při vybíjení akumulátoru probíhá opačný děj. Olověný akumulátor se nesmí zcela vybit, napětí na každém článku nesmí klesnout pod 1,8 V, jinak by došlo k nevratnému poškození akumulátoru.

b) Oceloniklové akumulátory - Akumulátory NiFe mají elektrody z niklu a železa, elektrolytem je zde hydroxid draselný (KOH). Nesmíme do nich nikdy nalít kyselinu – KOH je zásaditý a došlo by k bouřlivé reakci. Nevytvářejí výbušný plyn, lze je tedy použít i ve výbušném prostředí. Nevýhodou je velký vnitřní odpor. Výhodou je, že můžeme akumulátor zcela vybit, aniž by se poškodil.

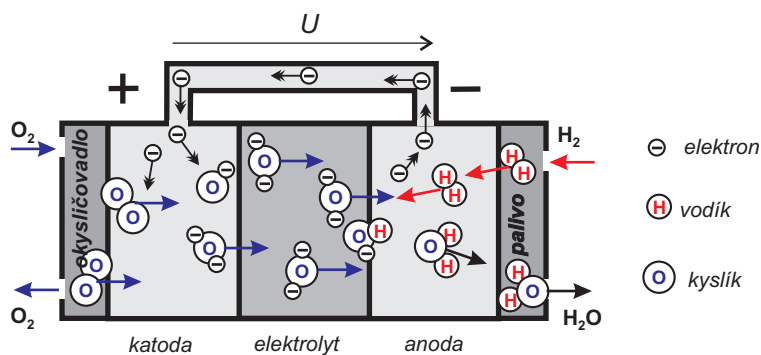
c) Niklkadmiové akumulátory NiCd - monočlánky, tužkové monočlánky, knoflíkové – napětí 1,3 V.

d) Niklmetalhydridový akumulátor - Akumulátory NiMH jsou obdobou niklkadmiových akumulátorů. Elektrody jsou z niklu a hydridu směsi kovů (jeho složení si každý výrobce chrání), elektrolytem je hydroxid draselný. Jejich kapacita je zhruba o 40% vyšší oproti akumulátorům NiCd při stejné velikosti. Uplatnění těchto akumulátorů je hlavně u mobilních telefonů a přenosných počítačů. Nevýhodou je pravidelná údržba. Akumulátor je nutné několikrát do roka nabít a vybit, jinak dochází vlivem chemických reakcí ke znehodnocení elektrod a ke ztrátě kapacity.

e) Lithium-iontový akumulátor – Li-Ion akumulátory se používají ve spotřebitelské elektronice, hlavně v digitálních fotoaparátech, mobilních telefonech a přenosných počítačích. Anoda je vyrobena z uhlíku, katoda je oxid kovu a elektrolytem je lithiová sůl. Uvnitř každé baterie je čip, který kontroluje stav a průběh nabíjení. Výhodou Li-Ion akumulátorů je vysoká kapacita při malém objemu a hmotnosti. Li-Ion akumulátory nemají tzv. paměťový efekt, není třeba je formovat, jejich životnost je 500 – 2000 nabíjecích cyklů. Nevýhodou těchto akumulátorů je, že ztrácí maximální kapacitu bez ohledu na to, jestli jsou nebo nejsou používány. Rychlost stárnutí se zvyšuje s vyšší teplotou, vyšším stavem nabití a vyšším zatížením. Tomuto akumulátoru vadí úplné vybití, dostane-li se pod napětí 2,8 V, je velmi těžké ho znovu „oživit“. Je-li akumulátor ponechán dlouhou dobu vybitý, může se samo vybit pod přípustnou hodnotu a již ho nelze znovu „oživit“.

3 Palivové články

V palivovém článku se přeměňuje chemická energie paliva na elektrickou energii, podobně jako je tomu například v baterii. Tato přímá přeměna energie umožňuje dosažení vyšší elektrické účinnosti (až přes 60%). Palivový článek se skládá z porézních elektrod, oddělených elektrolytem. Na katodu se přivádí okysličovadlo (vzduch, kyslík), na anodu palivo (vodík). Proces, ke kterému dochází a který je patrný z obrázku, je vlastně opakem elektrolýzy. Palivo je přiváděno do palivového článku plynule, takže nemůže dojít k jeho „vybití“. Přestože se jedná o velmi účinné získávání elektrické energie při minimálním zatížení životního prostředí, brání masovému využití palivových článků jejich vysoká výrobní cena a poměrně nízká životnost.



Obr. 4.07 Palivový článek

4.2 Vedení elektrického proudu v plynech

Plyny jsou při normální teplotě a tlaku dobrými izolanty. Aby v plynu vznikl elektrický proud musí obsahovat volné nosiče proudu a musí být v elektrickém poli. Změnou podmínek plynného prostředí, např. zahříváním nebo intenzivním ultrafialovým, rentgenovým, radioaktivním či jiným zářením se elektrická vodivost plynů zvětšuje. Děj, při kterém vznikají v plynu nabitě částice, nazýváme **ionizace plynu**. Zařízení, které způsobuje ionizaci, nazýváme **ionizátor**. Plyn, který se stal vodivým, nazýváme **ionizovaný**.

Při ionizaci plynu se z molekul plynu uvolňují elektrony a zbytky molekul tvoří kladný iont. Některé elektrony se mohou zachytit na neutrálních molekulách a vznikají tak záporné ionty. Nosiči proudu v plynu jsou kladné a záporné ionty a elektrony.

Během ionizace na sebe kladné a záporné ionty narážejí a mohou se znovu spojit v elektricky neutrální částice. Tento děj se nazývá **rekombinace iontů**. Jestliže přestanou na

plyn působit vnější vlivy, které způsobují ionizaci, nosiče náboje zanikají a plyn se stává opět nevodivým. Jestliže ionizace plynu trvá, nastává rovnovážný stav mezi ionizací a rekombinací. Počet nosičů proudu je pak stálý a odpovídá mu určitá elektrická vodivost proudu. Průchod proudu plynem nazýváme **výboj**.

4.2.1 Nesamostatný výboj

Jestliže elektrický proud prochází plynem jen **za přítomnosti ionizátoru** (např. plamen), jde o **nesamostatný výboj**. Při působení stálého ionizátoru se proud trvale nezvyšuje, protože zároveň probíhá opačný děj – rekombinace iontů. Nakonec se vytvoří rovnováha mezi oběma ději a v plynu vede proud stále stejný počet částic. Při malém proudu platí pro nesamostatný výboj Ohmův zákon. Při velkém proudu se vedení proudu účastní všechny volné ionty a elektrony, velikost procházejícího proudu už dál neroste ani při zvyšování napětí. Jedná se o nasycený proud. Pro nasycený proud už Ohmův zákon neplatí.

4.2.2 Samostatný výboj

V každém plynu je nepatrný počet volných iontů. Jestliže napětí dosáhne určité hodnoty, kterou nazýváme **zápalné napětí**, způsobí tyto ionty lavinovou ionizaci a vzniká **samostatný výboj**.

1. Samostatné výboje za nízkého tlaku

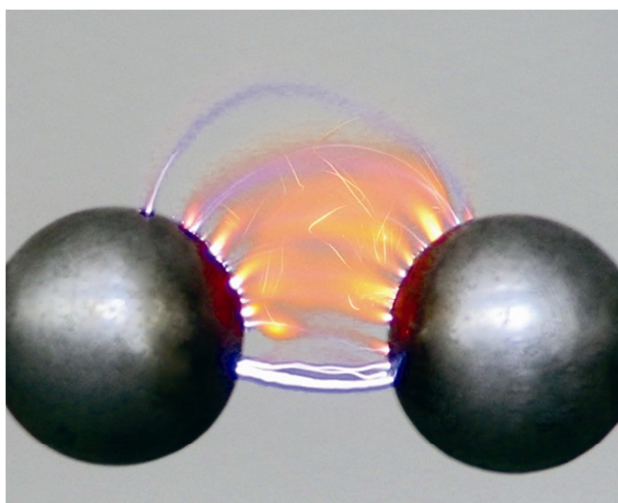
Doutnavý výboj – probíhá v málo zředěných plynech. Katoda je při tomto výboji obklopena zářící vrstvou plynu. To se využívá při konstrukci doutnavek a zářivek. Snižujeme-li dál tlak plynu, objeví se kolem anody růžové světlo, tzv. anodové světlo.

Anodové světlo sleduje tvar trubice, to se využívá v reklamních trubicích. Různá barva reklamních trubic je dána odlišným chemickým složením plynů v trubici.

Doutnavky jsou baňky plněné neonem a používají se jako indikátory napětí v některých zařízeních nebo jako kontrolní světla s nízkou spotřebou energie.

Zářivky jsou trubice plněné plynem, např. argonem. Světlo nevzniká při samotném výboji, ale jeho zdrojem je luminiscenční vrstva na vnitřním povrchu trubice. Světlo zářivek se svou barvou blíží dennímu světlu.

2. Samostatné výboje za atmosférického tlaku



Obr. 4.08 Výboj v plynu

Obloukový výboj – probíhá při velkých proudech (až několik set ampérů) a při relativně nízkém napětí. Dá se realizovat poměrně jednoduchým způsobem. Obloukový výboj vznikne, jestliže k sobě krátce přitiskneme elektrody a pak je oddálíme. Konce elektrod se během dotyku rozžhaví a po oddálení způsobí ionizaci molekul vzduchu ve svém okolí (viz obr. 4.08).

Obloukový výboj je nejdůležitější samostatný výboj za atmosférického tlaku využívaný v technické praxi.

Obloukové pece – tavení kovů, výboj vzniká mezi elektrodou a kovem, který se taví vlivem vysoké teploty.

Obloukové svařování – jeden vodič spojuje zdroj napětí s elektrodou a druhý vodič svařovaný předmět se zdrojem napětí. Mezi elektrodou a svařovaným předmětem se udržuje obloukový výboj. Elektroda se vlivem vysoké teploty odtavuje a vyplňuje spáru v kovu, který je také rozžhaven.

Výbojky – osvětlení veřejných prostranství (sodíkové výbojky), zdroj ultrafialového záření (rtuťové výbojky).

Jiskrový výboj – je podobný obloukovému výboji, ale trvá pouze zlomek sekundy. Vzniká tehdy, jestliže zdroj napětí nemůže udržet trvalý proud. Pozorujeme ho například při vybíjení kondenzátorů nebo při tření tkanin, papíru, vlasů apod. Vzniká také při čerpání některých tekutin např. benzínu. Ve výbušném prostředí jsou tyto výboje nebezpečné.

Nejmohutnějším jiskrovým výbojem v přírodě je **blesk**. Blesk probíhá mezi mraky nebo mezi mrakem a vyvýšeným místem Země, např. ocelovou nebo betonovou konstrukcí, stromem atd. Může zasáhnout i člověka, jestliže je nejvyšším místem v okolí. Z bezpečnostních důvodů se proto během bouřky nezdržujeme na střeších, štítech hor, pod vysokými osamě-

lymi stromy nebo v blízkosti kovových konstrukcí. Proti nepříznivým účinkům blesků chráníme budovy pomocí **hromosvodů**.

4.3 Vedení elektrického proudu ve vakuu

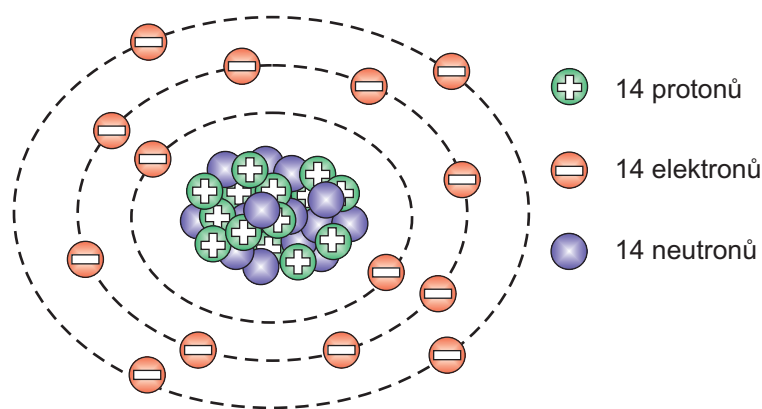
Ve vakuu neexistují částice, které by byly nosiči elektrického proudu, proto je vakuum velmi dobrým izolantem. K vedení proudu ve vakuu může dojít pouze tehdy, jestliže v tomto prostoru jsou pevné látky, ze kterých se mohou uvolňovat elektrony. K uvolnění elektronů dochází zahříváním na velmi vysokou teplotu. Tento jev nazýváme **termoemise**.

Tento jev využívají vakuové elektronky – elektronková dioda trioda, rentgenka, obrazovka.

4.4 Vedení elektrického proudu v polovodičích

4.4.1 Stavba a elektrické vlastnosti polovodičů

Polovodiči nazýváme látky, jejichž rezistivita leží mezi vodiči (kovy) a izolanty. Proti ostatním podobným látkám mají ještě tu vlastnost, že se jejich rezistivita se vzrůstající teplotou zmenšuje. (Víme, že u kovů je tomu naopak.) Mezi polovodiče řadíme bór, uhlík, cín, arzén, fosfor, antimon, síru, některé chemické sloučeniny atd. V polovodičové technice se však téměř výhradně používá křemík Si a germanium Ge, přičemž více než 90 % polovodičových sou-

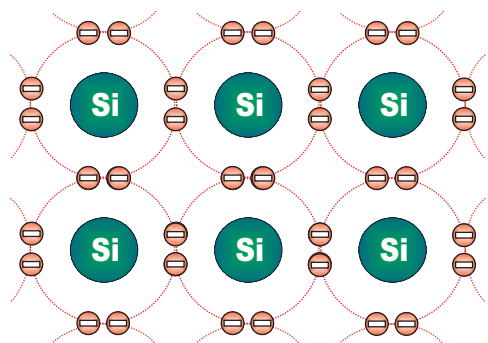


Obr. 4.09 Stavba atomu křemíku

částek pracuje na bázi křemíku, jehož vlastnosti jsou pro toto použití nejvhodnější (vysoká provozní teplota – až 150 °C, dobře technologicky zvládnutelné získávání čistého křemíku).

Vodivost polovodičových materiálů je silně ovlivněna příměsemi, proto je nutno je vyrábět ve velmi vysoké čistotě, a to až takové, kdy na 10^{10} atomů polovodiče připadá jeden atom příměsi. To znamená, že jestliže by měl jeden atom průměr 1 mm (ve skutečnosti je to cca 10^{-10} m) a naskládali bychom je těsně vedle sebe na rovník Země, byly by mezi všemi těmito atomy polovodiče jen čtyři atomy příměsi.

Křemík je čtyřmocný prvek. To znamená, že atom má ve valenční vrstvě čtyři elektrony.



Obr. 4.10 Kovalentní (chemické) vazby mezi atomy křemíku

Tyto elektrony tvoří s elektrony sousedních atomů elektronové páry – atomy jsou spojeny kovalentní (chemickou) vazbou, jejich elektronové obaly se prolínají a atomy tvoří krystalickou mřížku.

4.4.2 Vlastní vodivost polovodičů

V krystalické struktuře polovodiče jsou elektrony vázány poměrně slabě. Při velmi nízkých teplotách se tato vlastnost neprojevuje a všechny elektrony jsou vázány na svých místech v krystalu látky. Zvýšíme-li však teplotu, zintenzivní se je-

jich rozkmit kolem rovnovážných poloh v mřížce, elektrony mohou překonat vazebné síly a svou pozici opustit. Stávají se z nich vodivostní elektrony a stejně tak, jako u kovů se volně pohybují krystalem polovodiče a jsou nositeli záporného náboje. Elektrony se mohou takto uvolnit i v případě, že jim energii dodáme jiným způsobem, například osvětlením.

Tím, že elektron opustí svou pozici v krystalu, zůstává po něm prázdné místo – tzv. *díra*, která má vlastnost nositele kladného náboje. Jestliže se v místě díry zachytí jiný elektron, díra zaniká – *rekombinuje* se. Po takovémto elektronu však v krystalu vzniká nová díra v místě, kde se tento elektron uvolnil – nastala zde *generace páru elektron – díra*.

V polovodičovém krystalu proces generace – rekombinace probíhá neustále. Celkový počet nosičů záporného náboje – elektronů a kladného náboje – děr závisí na teplotě. S rostoucí teplotou se zvyšuje. S teplotou se tedy zvětšuje vodivost a zmenšuje rezistivita polovodiče.

Připojíme – li k polovodičovému krystalu elektrické napětí, vytvoří se uvnitř něj elektrické pole, vlivem kterého se začnou záporné vodivostní elektrony pohybovat ke kladnému pólu a kladné díry k zápornému pólu zdroje. Dochází k usměrněnému pohybu elektrických nábojů – polovodičem teče elektrický proud.

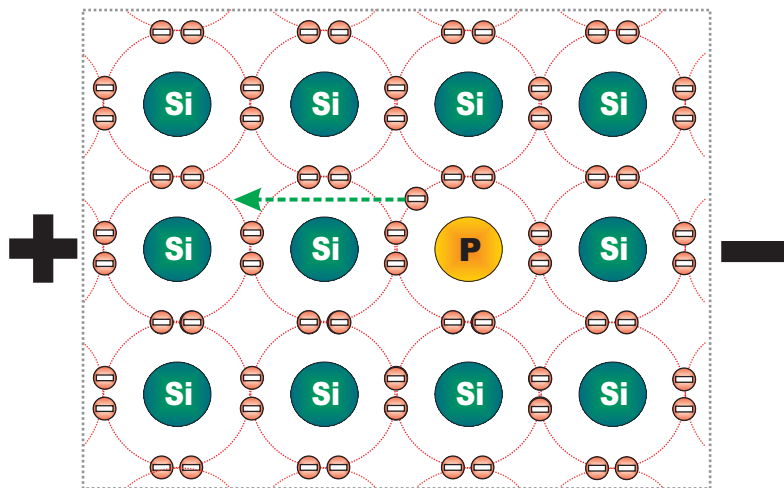
4.4.3 Elektronová a děrová vodivost polovodičů

Celková koncentrace (počet) nosičů nábojů, tedy elektronů a děr, je u vlastní vodivosti pro technickou praxi nedostačující. Přidáme-li však při výrobě do taveniny čistého křemíku nepatrné množství cizích atomů (na 100 000 atomů Si jeden atom příměsi), výrazně se sníží energie potřebná k uvolnění elektronů z krystalové vazby a tím se vodivost zvýší až tisíckrát. Toto

přidání cizích atomů do čistého polovodivého materiálu se nazývá *dotování*. Vzniká při něm *vodivost příměsová*, kterou podle typu atomu dělíme na *vodivost elektronovou* (typu N) a *vodivost děrovou* (typu P).

a) *Vodivost elektronová*

U elektronové vodivosti se jako příměsi používají atomy pětímocných prvků, např. fosfor (P), arsen (As), antimon (Sb). Z chemie víme, že mocnost prvků vlastně vyjadřuje počet jejich



Obr. 4.11 Polovodič typu N - křemík dotovaný pětímocným fosforem

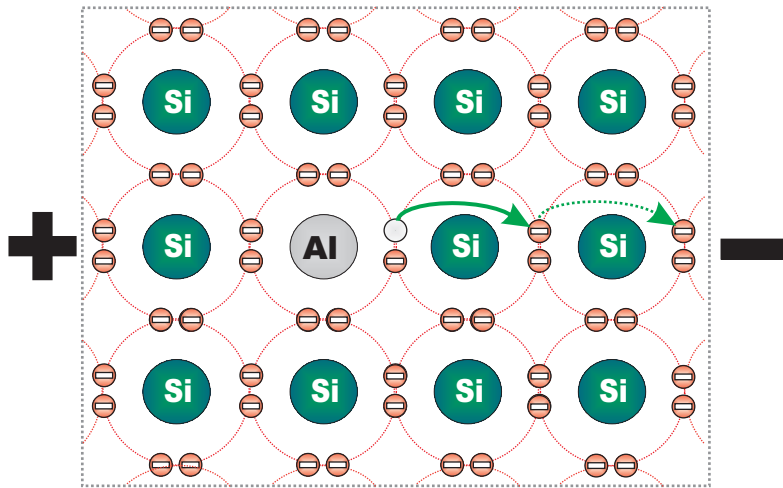
valenčních elektronů. Fosfor má tedy pět valenčních elektronů. V krystalu křemíku se čtyři z nich využijí k chemickým (kovalentním) vazbám. Pátý elektron zůstává velmi slabě vázán k jádru. Stačí jen mírné zvýšení teploty, aby se uvolnil. Při běžných teplotách se pak všechny takovéto elektrony

v krystalu chovají jako volné vodivostní elektrony. V tomto krystalu jako nosiče náboje tedy převládají elektrony.

Pětímocné příměsi, nosiče nábojů – elektronů, nazýváme dárci – *donory*. Polovodiče, u nichž příměsovou vodivost způsobují záporné elektrony, nazýváme *polovodiče typu N* (negativní).

b) *Vodivost děrová*

Při děrové vodivosti jsou příměsemi atomy trojmocných prvků, např. bór (B), indium (I), hliník (Al), galium (Ga). V krystalové mřížce polovodiče se váží všechny tři valenční elektrony. Jedna vazba však zůstává neobsazena jako díra. Stačí malá energie k tomu, aby do takovéto díry přeskočil některý ze sousedních elektronů. Po takovémto elektronu vznikne opět díra, která je zaplněna dalším elektronem atd. Jako nosiče náboje zde převažují díry.



Obr. 4.12 Polovodič typu P - křemík dotovaný třímocným hliníkem

Třímocné příměsi nazýváme přijemci – *akceptory*. Polovodiče, u kterých je příměsová vodivost způsobena kladně nabitými děrami, jsou *polovodiče typu P* (pozitivní).

Cvičení

1. Které částice vedou proud v kapalinách?
2. Která kapalina je elektrolytem?
3. Co je elektrolýza?
4. Které galvanické články znáte, popište, co tvoří elektrody a elektrolyt.
5. Co jsou akumulátory a které druhy akumulátorů znáte?
6. Které částice vedou proud v plynech?
7. Jak vzniká samostatný a nesamostatný výboj?
8. Jak vzniká blesk a jak se chráníme před jeho účinky?
9. Čím se liší obloukový a jiskrový výboj?
10. Kde se využívá obloukový výboj?

5 Magnetismus a elektromagnetismus

5.1 Magnety

Magnety jsou tělesa, která kolem sebe vytvářejí magnetické pole. Nejvýraznějším vnějším projevem tohoto pole je přitahování těles obsahujících železo, nikl, kobalt a jiné kovy, či jejich slitiny.

1. *Trvalé (permanentní) magnety* – jsou buď z přírodního materiálu – magnetovce nebo vyrobené uměle zmagnetováním, převážně ocelí. Mohou mít různé tvary.

2. *Dočasné magnety* – vyrobené z magneticky měkké oceli (nízký podíl uhlíku). Jejich účinky se projevují jen, jsou-li umístěny ve vnějším magnetickém poli.

3. *Elektromagnety* – využívají magnetické účinky elektrického proudu.

5.1.1 Značení magnetů



Obr. 5.01 Značení magnetů

Každý magnet má vždy dva póly, které můžeme označovat několika způsoby:

5.2 Magnetické vlastnosti látek

Podle působení magnetického pole můžeme látky dělit na:

a) *diamagnetické* – z magnetického pole jsou slabě vypuzovány (Bi, Au, Ag, Hg, Cu, Pb, H₂O)

b) *paramagnetické* – do magnetického pole jsou slabě vtahovány (Pt, Al, vzduch). Působení magnetického pole na dia a paramagnetické látky je poměrně slabé, lze je tedy obecně považovat za látky nemagnetické.

c) *feromagnetické* – do magnetického pole jsou silně vtahovány. Jestliže na ně působí magnetické pole, dochází u nich k zmagnetování – z feromagnetických látek vznikají magnety.

Feromagnetické materiály – Fe, Co, Ni, i uhlíkové speciální oceli (vyšší obsah C). Jako magnetické se chovají některé slitiny železa, mědi, niklu (Cunife), železa, niklu, hliníku (Al-nife), dále sloučeniny kyslíčnicku železa s kyslíčnickými jiných kovů – např. manganu, mědi, zinku – ferity. Způsob výroby feritů se podobá výrobě keramických látek.

5.3 Teorie magnetu

Příčinou magnetického pole magnetů je pohyb elektronů. Elektrony nejenže obíhají kolem jádra, ale také rotují kolem své osy – tzv. *spin elektronu*.

U diamagnetických a paramagnetických látek se účinky magnetického pole vyvolaného elektrony téměř vyruší a navenek působí minimálně.

U feromagnetických materiálů dochází k vytváření tzv. *domén*. To jsou oblasti v krystalové mřížce, které se chovají jako malé magnety. Nepůsobí-li na látku vnější magnetické pole, jsou domény neuspořádané. Těleso se jeví jako nemagnetické. Vložíme-li však látku do magnetického pole, domény se v něm uspořádají a z feromagnetického tělesa se stává magnet.

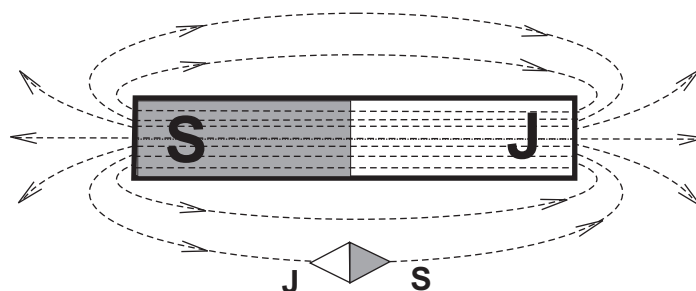


Obr. 5.02 Magnetické domény

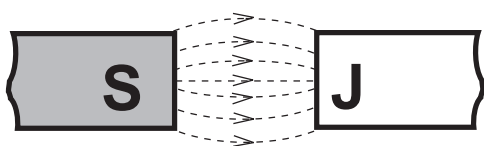
5.4 Magnetické pole

Zobrazuje se pomocí magnetických indukčních čar, což jsou myšlené čáry, které mimo magnet procházejí od severního k jižnímu pólu. Oproti siločarám elektrického pole jsou vždy uzavřené, procházejí tedy i magnetem, kde mají logicky směr od pólu jižního k severnímu.

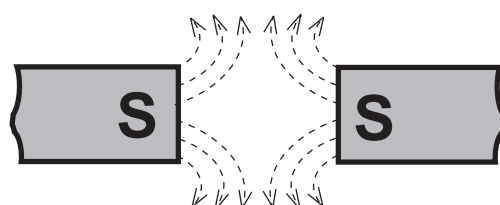
5.4.1 Magnetické pole tyčového magnetu



Obr. 5.03 Magnetické pole tyčového magnetu



Obr. 5.04 Magnetické pole mezi nesouhlasnými póly - nesouhlasné póly se přitahují

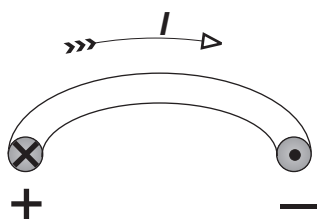


Obr. 5.05 Magnetické pole mezi souhlasnými póly -souhlasné póly se odpuzují

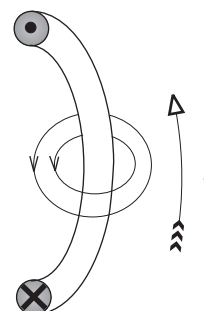
5.4.2 Magnetické pole přímého vodiče

Průchodem elektrického proudu se kolem vodiče vytváří magnetické pole. Směr magnetických indukčních čar určíme podle pravidla pravé ruky:

Uchopíme-li vodič pravou rukou tak, že palec ukazuje směr proudu, ukazují prsty směr indukčních čar.



Obr. 5.06 Orientace proudu ve vodiči



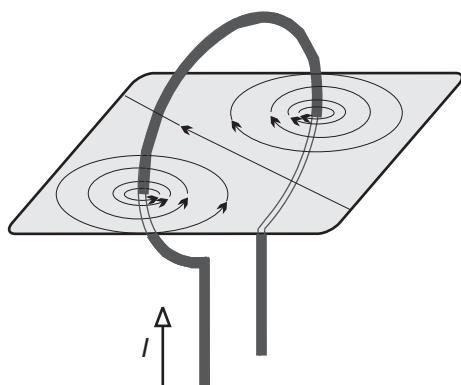
Obr. 5.07 Určení směru siločar

5.4.3 Magnetické pole cívky

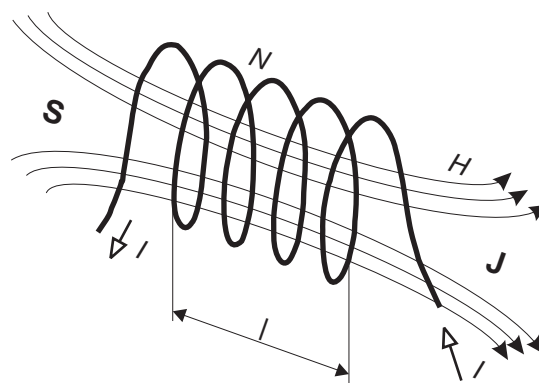
Válcovou cívku nazýváme *solenoid*. Má jednu řadu závitů stejného průměru, navzájem stejně vzdálených.

Severní pól cívky určíme podle Ampérova pravidla:

Uchopíme-li cívku do pravé ruky tak, aby prsty směřovaly po proudu, odkloněný palec ukáže severní pól cívky.



Obr. 5.08 Magnetické pole závitů



Obr. 5.09 Magnetické pole cívky

5.5 Magnetické veličiny

5.5.1 Intenzita magnetického pole H [$A \cdot m^{-1}$]

Intenzita magnetického pole udává velikost magnetického napětí U_m připadajícího na jednotku délky indukční čáry procházející solenoidem (platí i pro normální cívku).

Protože $U_m = IN$, pak

$$H = \frac{IN}{l}, \quad [A \cdot m^{-1}]$$

I – proud procházející obvodem [A]

N – počet závitů cívky

l – délka indukční čáry cívky [m]

Intenzita magnetického pole je vektorová veličina – má velikost a směr – viz obr. 5.09

5.5.2 Magnetická indukce B [T]

Magnetická indukce je vektorová veličina, která vyjadřuje mechanickou sílu vznikající v magnetickém poli v závislosti na vlivu prostředí.

$$B = \mu H \quad [\text{T}]$$

jednotka je tesla [T]

H – intenzita magnetického pole [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]

μ – permeabilita magnetického pole [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$] (s jednotkou H-henry, se seznámíme později)

Permeabilita μ (čti mý) – vyjadřuje, jak různé látky ovlivňují magnetické pole. Je to látková konstanta – viz tabulky.

permeabilita vakua

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [\text{H} \cdot \text{m}^{-1}]$$

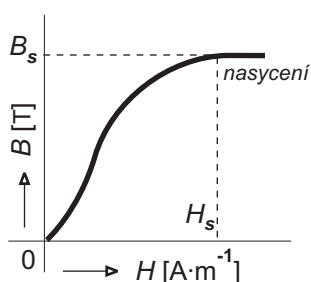
relativní permeabilita

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

udává, kolikrát je menší či větší permeabilita látky μ než vakua μ_0 .

5.5.3 Magnetizační křivka

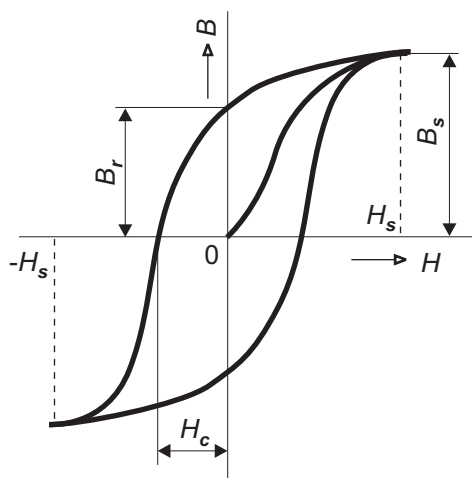
Zobrazuje vlastnosti feromagnetického materiálu. Křivka je závislostí magnetické indukce



Obr. 5.10 Magnetizační křivka

B [T] na intenzitě magnetického pole H [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]. Magnetizační křivka začíná mírným ohybem, který přechází do strmé (téměř přímkové) části. Při větší intenzitě magnetického pole dochází k tzv. nasyčování železa (koleno křivky). Po nasyčení přechází magnetizační křivka v přímku. Magnetizační křivka se také nazývá „křivka prvotní magnetizace“.

5.5.4 Hysterezní smyčka



Obr. 5.11 Hysterezní smyčka

Hysterezní smyčka je uzavřenou křivkou magnetování při plynulé změně intenzity magnetického pole od $+H_s$ do $-H_s$, kde intenzita magnetického pole H_s odpovídá bodu nasycení D . Úsek křivky B_r se nazývá *remanence* a označuje magnetickou indukci, která v materiálu zůstane po skončení magnetování. K potlačení remanence musíme materiál magnetovat v opačném smyslu intenzitou H_c , která se nazývá *koercitivita*.

Na tvar hysterezní smyčky má vliv především chemické složení a struktura krystalové mřížky.

Celková plocha, kterou křivka vymezuje, vyjadřuje energii, která je potřeba k jednomu cyklu zmagnetování.

Podle tvaru hysterezní křivky dělíme materiály na:

- a) *magneticky tvrdé materiály* – remanence a koercivita nabývá vyšších hodnot, křivka je „tlustší“, vymezuje větší plochu, energie potřebná k magnetování je větší.
- b) *magneticky měkké materiály* – remanence a koercivita nabývají nižších hodnot, křivka je „tenčí“, vymezuje menší plochu, energie potřebná k zmagnetování je menší.

5.5.5 Magnetický indukční tok Φ [Wb]

$$\Phi = B S \cos \alpha \quad [\text{Wb}]$$

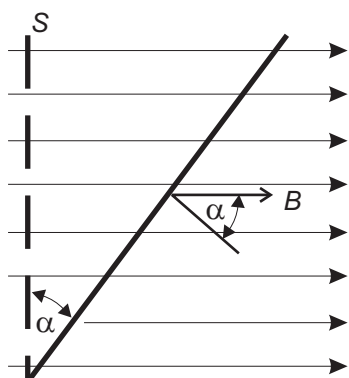
Φ – čti fí

Jednotkou je weber [Wb]

B – magnetická indukce [T]

S – plošný obsah [m^2]

α – úhel vektoru magnetického pole a roviny, v níž leží sledovaná plocha.



Obr. 5.12 Magnetický indukční tok

Jestliže bude magnetická indukce B kolmá ke sledované ploše, pak $\cos \alpha = 1$ a platí:

$$\Phi = BS.$$

5.6 Magnetické obvody

Magnetický indukční tok je vždy uzavřený, stejně tak i magnetický obvod. V technické praxi však magnetické obvody dělíme na:

1. *Otevřené magnetické obvody* – velká část magnetického indukčního toku prochází mimo feromagnetickou látku (jádro) převážně vzduchem. Magnetický indukční tok se tím rozptyluje a silně zeslabuje.

2. *Uzavřené magnetické obvody* – jsou sestaveny z feromagnetického materiálu, který není přerušen nebo je v něm jen malá mezera vyplněná vzduchem či látkou s relativní permeabilitou blízkou jedné – dochází k minimálnímu rozptylu indukčního toku.

5.7 Magnetický odpor (reluktance) R_m [H^{-1}]

Reluktance (magnetický odpor) je odpor, který magnetický obvod klade magnetickému indukčnímu toku.

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad [H^{-1}]$$

H^{-1} – reciproký henry

μ – permeabilita prostředí [$H \cdot m^{-1}$] $\mu = \mu_0 \mu_r$

l – střední délka magnetického obvodu [m]

S – průřez magnetického obvodu [m^2]

5.8 Magnetická vodivost (permeance) G_m [H]

$$G_m = \frac{1}{R_m} \quad [\text{H}]$$

Je vidět, že veličiny magnetických obvodů jsou obdobou veličin obvodů elektrických.

magnetický odpor R_m	elektrický odpor R
magnetický tok Φ	elektrický proud I
magnetické napětí U_m	elektrické napětí U
permeabilita μ (mý)	permitivita ε (epsilon)
atd.	

Stejně tak jako v elektrickém obvodu platí Ohmův zákon, platí v magnetických obvodech

5.9 Hopkinsonův zákon:

$$\Phi = \frac{U_m}{R_m} \quad [\text{Wb}; \text{A}, \text{H}^{-1}]$$

Jako elektrické obvody můžeme řadit i magnetické obvody paralelně, sériově nebo kombinovaně. Platí zde tedy obdoba I. Kirchhoffova zákona – $\Sigma \Phi = 0$ pro magnetický indukční tok a II. Kirchhoffův zákon pro magnetické napětí – $\Sigma U_m = 0$.

5.10 Pohyb osamocené vodiče v magnetickém poli

Magnetické pole magnetu a vodiče na sebe vzájemně působí. Tam, kde je směr jejich magnetických indukčních čar souhlasný, dochází k zesílení výsledného pole. Směřují-li indukční čáry proti sobě, pole se zeslabuje. Tím dochází k vytlačování vodiče z tohoto prostoru silou:

$$F = B I l \sin \alpha$$

F – síla [N]

B – magnetická indukce [T]

I – proud procházející vodičem [A]

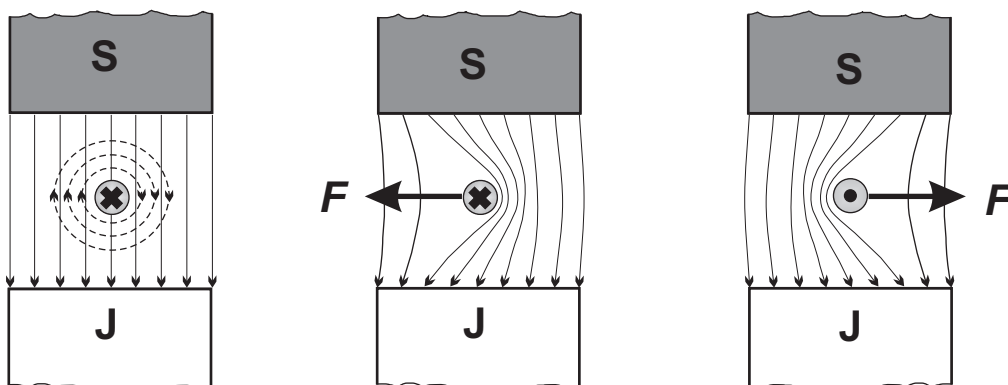
α – úhel, který svírá vodič s indukčními čarami

Jsou-li indukční čáry na vodič kolmé, pak

$$F = BIl \quad [\text{N}; \text{T}, \text{m}, \text{A}]$$

Směr síly působící na vodič můžeme také určit pomocí *Flemingova pravidla levé ruky*:

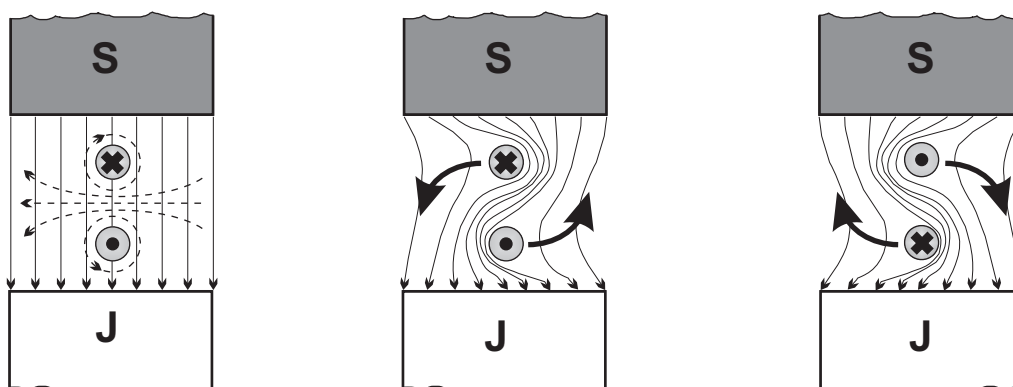
Položíme-li levou ruku pod vodič tak, aby indukční čáry vstupovaly do dlaně, prsty ukazovaly směr proudu, pak palec ukazuje směr síly.



Obr. 5.13 Vzájemné působení magnetického pole magnetu a vodiče protékaného elektrickým proudem způsobuje vychylování vodiče.

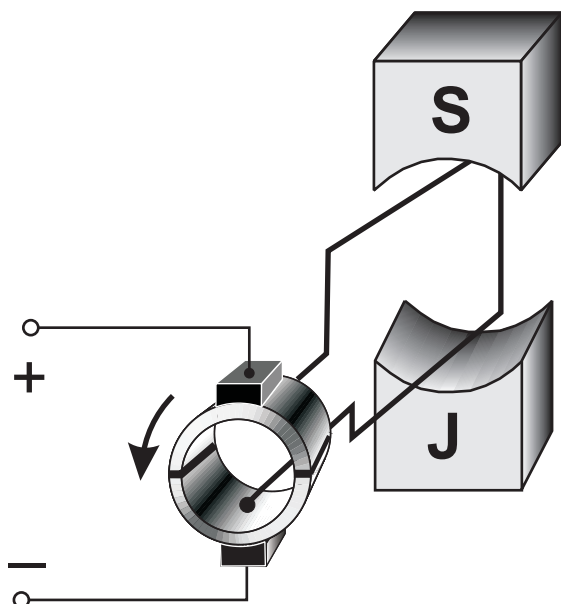
5.11 Dynamické účinky elektrického proudu

Jestliže vložíme vodič ve tvaru závitů, nebo cívku do homogenního magnetického pole a necháme jím protékat elektrický proud, vytvoří se kolem něj magnetické pole, které společně s magnetickým polem magnetu vyvolá u rotačně uloženého závitu otáčivý efekt.



Obr. 5.14 Cívka v magnetickém poli.

Síly vyvolávající tento efekt se u cívky násobí počtem jejích závitů. Natočí-li se však závit či cívka tak, že jejich magnetické pole bude mít stejný směr jako magnetické pole magnetu, síla přestane působit. Jestliže chceme, aby se cívka otáčela stále v původním směru, musíme v ní vždy ve vhodném okamžiku změnit smysl proudu. K tomuto účelu slouží měnič směru



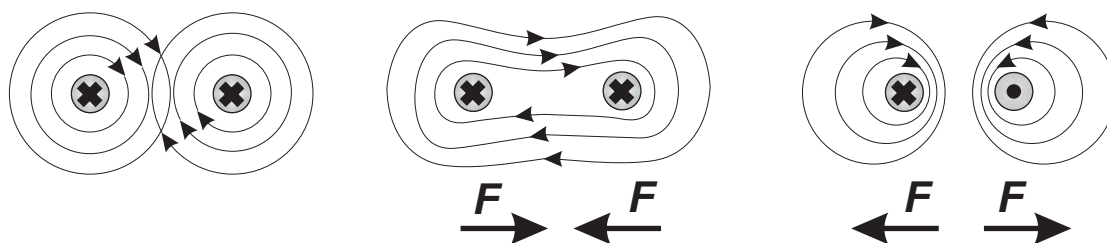
proudu, tzv. *komutátor*. Nejjednodušší komutátor je tvořen dvěma měděnými lamelami, které jsou vzájemně odizolovány. Na lamely jsou vyvedeny konce vinutí cívky a ta se společně s nimi otáčí. Do cívky je proud dodáván pomocí tzv. kartáčů, což jsou špalíky z uhlíku, které dosedají na otáčející se lamely.

Toto je princip činnosti některých elektromotorů a jevu se využívá i u některých měřicích přístrojů, stykačů či relé.

Obr. 5.15 Komutátor

5.12 Vzájemné působení dvou vodičů

Magnetická pole, která vznikají kolem dvou rovnoběžných vodičů, na sebe vzájemně působí. Jak je vidět na obrázku, tak v případě, že ve vodičích protéká proud souhlasným směrem, vodiče se díky výslednému magnetickému poli přitahují. V případě, že má proud ve vo-



Obr. 5.16 Vzájemné působení dvou vodičů

dičích obrácený smysl, jsou vodiče odpuzovány. Velikost těchto sil je:

$$F = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 l}{d} \quad [\text{N}]$$

F – síla [N]

I_1, I_2 – proudy protékající vodiči [A]

l – délka vzájemného působení vodičů [m]

d – vzdálenost vodičů [m]

μ – permeabilita prostředí [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$]

Poznámka: V tabulkách se udává relativní permeabilita μ_r . Je-li prostředí jiné než vakuum, pak $\mu = \mu_0 \mu_r$.

Lze lehce odvodit, že síla působící mezi vodiči je v běžných podmínkách poměrně malá. V případě zkratových proudů, které mohou být až v řádech vyšší než provozní, však může tato síla růst k nebezpečným hodnotám.

Na základě účinků stejnosměrného proudu byla definována jednotka proudu:

Definice proudu 1 A: Stejnosměrný proud 1 A je takový proud, který při průchodu dvěma rovnoběžnými, nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného průřezu umístěnými ve vakuu a vzdálenými od sebe jeden metr, vyvolá mezi nimi stálou sílu $2 \cdot 10^{-7}$ newtonu na 1 metr délky.

Dosadíme-li hodnoty do základního vztahu, pak:

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{1 \cdot 1 \cdot 1}{1} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

5.13 Elektromagnetická indukce

Elektromagnetická indukce je fyzikální jev, při kterém vzniká elektrické napětí a v případě, že je uzavřen elektrický obvod, může následně obvodem procházet i elektrický proud. K tomuto ději může dojít dvěma způsoby:

1. Časovou změnou magnetického toku

Pokusy se zjistilo (Faraday 1831), že elektrické napětí a jím vyvolaný elektrický proud se ve vodiči indukuje v případě, mění-li se magnetický tok, tedy počet indukčních čar procházejících vodičem. Vzniká tedy s *časovými změnami* magnetického pole, které mohou být způsobeny buď jeho vznikem nebo zánikem, zesílením či zeslabením.

5.13.1 Indukční zákon

$$u_i = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad [\text{V}]$$

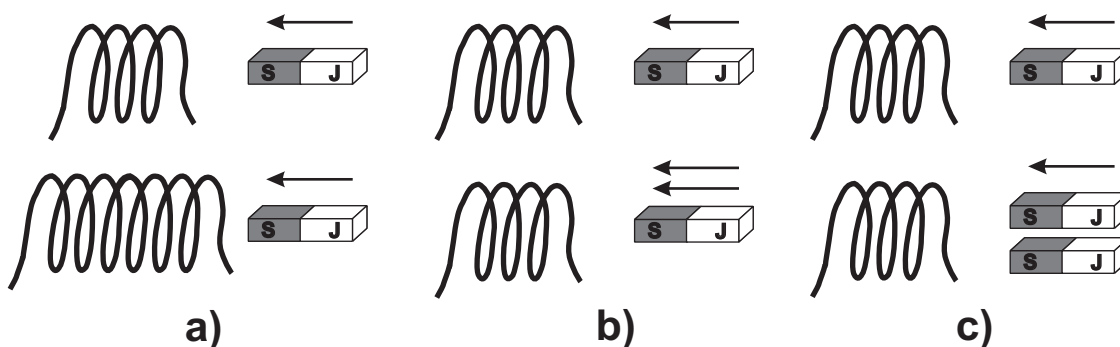
u_i – indukované napětí [V]

N – počet závitů

$\Delta\Phi$ – změna magnetického toku [Wb] ($\Phi_2 - \Phi_1$)

Δt – změna času ($t_2 - t_1$) [s]

Ze vztahu plyne, že velikost indukovaného napětí lze zvětšit třemi způsoby – viz obrázek.



Obr. 5.17 Ovlivňování velikosti indukovaného

a) zvětšením počtu závitů

b) zvětšením rychlosti pohybu

c) zvětšením magnetického pole

2. Pohybem vodiče v magnetickém poli

Jestliže jsou vůči sobě vodič a magnetické pole vzájemně v pohybu tak, že indukční čáry vodič protínají, dochází k časové změně magnetického toku Φ a ve vodiči se indukuje napětí, pro které lze odvodit následující vztah:

$$u_i = Blv \quad [\text{V}]$$

u_i – indukované napětí [V]

B – magnetická indukce [T]

l – aktivní délka vodiče [m] (ta část, na kterou působí magnetické pole)

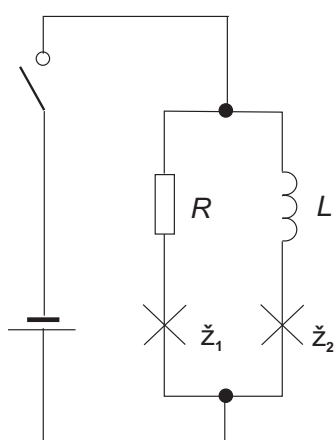
v – rychlost pohybu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Aby byl naplněn princip zachování energie, musí při magnetické indukci platit:

Lenzův zákon: Smysl indukovaného napětí ve smyčce je takový, aby jím vyvolaný indukovaný proud působil svým magnetickým polem proti změně magnetického pole, jež ho vyvolala.

5.14 Vlastní indukčnost L [H]

Sestrojíme-li obvod podle vloženého obrázku, začne po sepnutí spínače svítit žárovka \check{Z}_1



Obr. 5.18 Vlastní indukčnost

ve větvi s rezistorem R okamžitě, žárovka \check{Z}_2 ve větvi s cívkou L až po chvíli. Příčinou je vznikající pole. Nestacionární (časově proměnné) magnetické pole je příčinou vzniku indukovaného elektrického pole v cívce, které podle Lenzova zákona působí proti změně, která ho vyvolala. Na koncích cívky vzniká napětí opačné polarity, než má zdroj. Proud tedy narůstá postupně až k hodnotě dané odporem cívky a pak už se nemění, takže indukované pole zaniká. Bylo vysvětlováno, že změnou magnetického toku, spřaženého se závitů cívky, se v cívce indukuje napětí. Mírou těchto vlastností cívky je její *indukčnost*. Ta se dělí na vlastní a

vzájemnou.

Indukované elektrické pole vzniká ve vodiči i při změnách magnetického pole, které vytváří proud procházející vlastním vodičem. Jev se nazývá *vlastní indukčnost L* .

Vlastní magnetické pole vytváří v cívce magnetický indukční tok Φ , který je přímo úměrný proudu v cívce:

$$\Phi = LI \quad [\text{Wb}; \text{H}, \text{A}],$$

protože indukované napětí

$$u = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta i}{\Delta t},$$

můžeme pro indukčnost psát

$$L = \frac{u\Delta t}{\Delta i} \quad [\text{H}; \text{V}, \text{s}, \text{A}].$$

Cívka má indukčnost jeden *henry* H, indukuje-li se v ní napětí jednoho voltu rovnoměrnou změnou proudu o jeden ampér A za jednu sekundu s.

Indukčnost cívky závisí na druhé mocnině počtu závitů a magnetické vodivosti obvodu, kterým se uzavírá magnetický tok. Indukčnost cívky při nezměněném počtu závitů zvýšíme vložením jádra z feromagnetického materiálu.

5.14.1 Výpočet vlastní indukčnosti cívky

$$L = N^2 G_m = \frac{N^2}{R_m}$$

kde G_m [H] je magnetická vodivost, pro kterou platí:

$$G_m = \mu_0 \mu_r \frac{S}{l}$$

μ_0 – permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H·m⁻¹)

μ_r – poměrná permeabilita cívky

S – průřez jádra cívky [m²]

R_m – magnetický odpor [H⁻¹]

l – střední délka magnetického obvodu [m]

5.15 Vzájemná indukčnost M [H]

Jestliže přiblížíme cívku připojenou na střídavé napětí k cívce druhé tak, aby její magnetický tok zasahoval do této druhé pasivní cívky, bude se v druhé cívce indukovat napětí. Obě cívky mají tzv. *vzájemnou indukčnost* M . Ta závisí na indukčnosti jednotlivých cívek L_1 a L_2 a na činiteli vazby k , který je dán vzdáleností cívek, jejich tvarem a prostředím, ve kterém se nacházejí. Činitel vazby může nabývat hodnot 0 pro vazbu volnou (cívky se vzájemně neovlivňují) až 1 pro vazbu těsnou (nedochází k žádné ztrátě magnetického toku).

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad [\text{H}; -, \text{H}, \text{H}]$$

5.16 Řazení indukčností

Indukčnosti (cívky) řadíme obdobně jako rezistory. Je třeba zde ale brát na zřetel vlastní indukčnost, což někdy výpočty komplikuje. Orientačně lze říci, že zde platí stejné zásady jako při řazení rezistorů.

1. Sériové řazení indukčností

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

2. Paralelní řazení indukčností

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

5.17 Ztráty ve feromagnetických materiálech

5.17.1 Hysterezní ztráty

Vznikají při přemagnetovávání feromagnetických materiálů. Magnetické domény v materiálu mění svou polohu, což se projeví spotřebou určité části energie, která bude úměrná velikosti plochy hysterezní smyčky. Ta vyjadřuje závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H . Je rozdílná pro různé materiály. Dochází-li k cyklickému přemagnetovávání, pak odpovídají celkové ztráty ploše jedné smyčky a počtu smyček vytvořených za sekundu. Tyto ztráty se mění v teplo.

5.17.2 Ztráty vířivými (Foucaultovy) proudy

Vznikají při magnetování feromagnetických materiálů časově proměnným magnetickým polem. Magnetické obvody jsou vyrobeny z elektricky vodivých materiálů a tak u nich každá změna magnetického pole indukuje elektrické proudy. Podle tvaru jejich drah se nazývají vířivé proudy. Jejich působením dochází k tepelným ztrátám, které jsou značně závislé na frekvenci.

Ztráty vířivými proudy lze omezit:

- a) rozdělením jádra použitím vzájemně izolovaných plechů (omezí se tím možné dráhy vířivých proudů).
- b) použitím materiálu s velkým elektrickým odporem (přidáním Si do oceli).

Pro vysokofrekvenční obvody se jádra cívek lisují ze směsi práškového železa a pryskyřice, popř. vyrábí z magneticky měkkých feritů.

5.17.3 Užití vířivých proudů:

- indukční ohřev
- tavba v indukčních pecích
- indukční brzdy elektroměrů, ukazatelů měřících přístrojů atd.

Cvičení

1. Jak označujeme jednotlivé póly magnetu?
2. Země má severní a jižní zeměpisný pól. Protože Země má magnetické pole, má také severní a jižní magnetický pól. Kde tyto póly leží?
3. Proč se pouzdra kompasů nezhotovují z oceli?
4. Existuje na zemi místo, kde by střelka kompasu ukazovala oběma svými konci na sever?
5. Jak dělíme látky podle jejich magnetických vlastností?
6. Uveďte některé feromagnetické materiály.
7. Co jsou to magnetické domény?
8. Pomocí magnetických indukčních čar nakreslete magnetické pole mezi dvěma souhlasnými a dvěma nesouhlasnými póly.
9. Pro určení směru magnetických indukčních čar ve vodiči použijte pravidlo pravé ruky.
10. Uvnitř válcové cívky, kterou prochází proud 150 mA je intenzita magnetického pole $100 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$. Vypočítejte počet závitů, je-li délka cívky 12 cm. ($N = 80$)
11. Cívka se vzduchovým jádrem má 250 závitů, délku 30 mm a průřez 12 cm^2 . Určete magnetický indukční tok v této cívce, prochází-li jí proud 10 A. ($\Phi = 12 \text{ mWb}$)
12. Vypočítejte magnetickou vodivost ocelového uzavřeného jádra délky 250 mm a průřezu 12 cm^2 , je-li jeho relativní permeabilita 400. ($G_m = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ H}$)
13. Jak určíme podle pravidla pravé ruky směr síly působící na vodič v magnetickém poli?
14. V homogenním magnetickém poli s indukcí 800 mT je umístěn vodič, jehož aktivní délka je 20 cm. Vodič je vychylován silou 0,5 N. Vypočítejte proud protékající vodičem, který tuto sílu vyvolal. ($I = 3,125 \text{ A}$)
15. Pomocí magnetických indukčních čar nakreslete, jak na sebe vzájemně působí dva vodiče, kterými protéká proud souhlasným a nesouhlasným směrem.
16. Dvěma rovnoběžnými vodiči umístěnými ve vzduchu a vzdálenými od sebe 300 mm prochází proud 3 kA. Jakou silou na sebe působí, je-li jejich aktivní délka 6 m? ($F = 36 \text{ N}$)
17. Jakými způsoby může dojít k elektromagnetické indukci?
18. Definujte indukční zákon.
19. Vypočítejte napětí, které se indukuje v cívce se 120 závitů, dojde-li za dobu 20 μs ke změně magnetického toku z $5 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}$ na $8 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}$. ($u = 180 \text{ V}$)

20. Ve vodiči aktivní délky 40 mm, který se pohybuje v magnetickém poli s indukcí 0,6 T se indukuje napětí 0,5 V. Vypočítejte rychlost pohybu tohoto vodiče. ($v = 20,8 \text{ ms}^{-1}$)
21. Definujte Lenzův zákon.
22. Vysvětlete pojem vlastní indukčnost.
23. Vypočítejte napětí, které se bude indukovat v cívce dlouhé 12 cm, která má 400 závitů navinutých na jádře s poměrnou permeabilitou $\mu_r = 1$, s průměrem 2,4 cm, jestliže za 0,3 s vzroste proud z hodnoty 0,5 A na hodnotu 0,7 A. ($u_i = 5,05 \cdot 10^{-4} \text{ V}$)
24. Jaké ztráty vznikají ve feromagnetických materiálech?
25. Z jakého důvodu vznikají hysterezní ztráty?
26. Jak vznikají vířivé proudy a jak je lze omezit?
27. Samostatně nastudujte princip indukčního ohřevu používaného pro tavbu v indukčních pecích a vysvětlete (slovníky, učebnice, internet).
28. Na jakém principu pracují digitální rychloměry na jízdních kolech?

6 Střídavý proud

6.1 Základní pojmy

V předchozí kapitole jsme vysvětlili vznik střídavých elektrických veličin. Víme tedy, že velikost a smysl těchto veličin se ve stejných časových úsecích periodicky mění, a že pro vyjádření jejich časového průběhu používáme křivku, která je matematickým vyjádřením funkce sinus (či kosinus) a kterou nazýváme sinusovka.

Perioda T [s] – je čas, za který se průběh střídavé veličiny opakuje

$$T = \frac{1}{f} \quad [\text{s}; \text{Hz}]$$

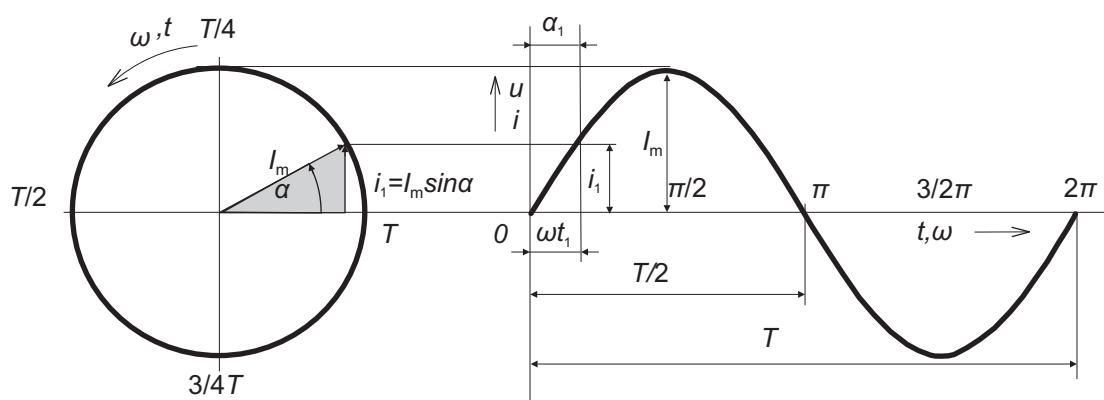
Frekvence f [Hz] – je počet opakování period za časovou jednotku [s]

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}; \text{s}]$$

Jednotkou je Hz – hertz což je, jak plyne z předchozích vztahů, $[\text{s}^{-1}]$

Průmyslová frekvence pro rozvod střídavého proudu je ve světě převážně 50 Hz. V USA, Kanadě a Japonsku se ale používá 60Hz.

6.2 Časový průběh sinusových veličin



Obr. 6.01 Časový průběh sinusových veličin

$$i = I_m \sin \alpha \quad (1)$$

Hodnota střídavé veličiny měnící se spojitě v čase je tzv. *okamžitá hodnota* – označuje se malým písmenem např. i , u , ...

Největší okamžitá hodnota se označuje – např. U_{\max} , I_{\max} , případně U_m , I_m

- úhel α je přímo úměrný času t
- jedna perioda T odpovídá úhlu $2\pi \text{ rad}$.
- radián – úhel, jehož ramena vytínají na jednotkové kružnici opsané z vrcholu úhlu oblouk rovnající se jedné (1)
- jednotka času odpovídá úhlu $\frac{2\pi}{T}$
- času odpovídá úhel $\alpha = \frac{2\pi}{T}t = 2\pi ft = \omega t$ ω úhlová frekvence [rad s^{-1}]

Rovnici (1) lze upravit:

$$i = I_{\max} \sin \omega t. \quad \omega t - \text{úhel v radiánech}$$

Tímto vztahem jsme stanovili okamžitou hodnotu proudu i pro libovolný čas. Obdobně platí pro okamžitou hodnotu napětí

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

Pro výpočet je nutno převést úhel α z radiánů na stupně a naopak.

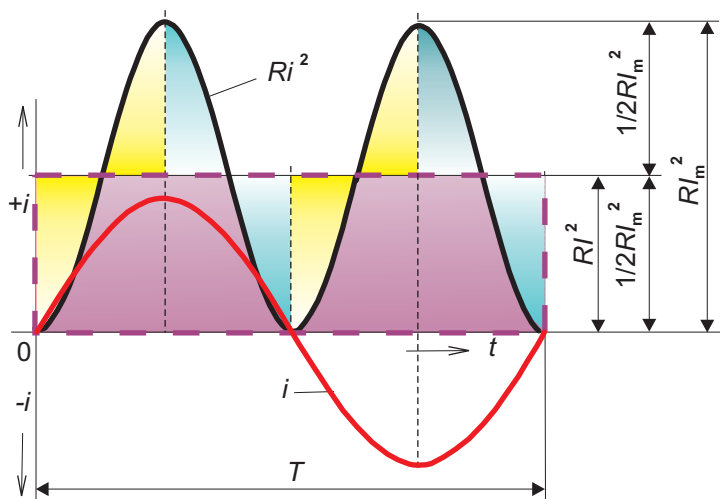
Převodní vztah:

$$\alpha_r = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \alpha_s \quad [\text{rad}; ^\circ]$$

$$\alpha_s = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \alpha_r \quad [^\circ, \text{rad}]$$

6.3 Efektivní hodnota střídavého napětí a proudu

Střídavé elektrické veličiny mají v každém okamžiku jinou okamžitou hodnotu. V praxi je však nutné určovat celkové účinky těchto veličin. Nejčastěji se srovnávají účinky střídavého napětí a proudu s odpovídajícími účinky stejnosměrného proudu za stejnou dobu. Efektivní hodnoty jsou pro praxi nejdůležitější. Jsou to takové hodnoty střídavého proudu, který v obvodu s rezistorem vyvolá stejné tepelné účinky jako odpovídající proud stejnosměrný.



Obr. 6.02 Efektivní hodnota střídavého napětí a proudu

Protože $P = UI$ a $U = RI$, můžeme po úpravě psát, že okamžitý výkon elektrického proudu je $p = Ri^2$.

Z obrázku je vidět, že průběh výkonu je sinusový s dvojnásobným kmitočtem, a protože druhé mocniny záporných čísel (i^2) jsou kladné, leží i celá křivka v kladné rovině.

Plocha mezi křivkou Ri^2 a časovou osou udává práci střídavého proudu za dobu T . Jestliže tuto plochu převedeme na obdélník s délkou odpovídající T , bude jeho výška odpovídat velikosti stejnosměrného proudu, který by za čas T vykonal stejnou práci.

$$RI^2T = R \frac{I_m^2 T}{2}$$

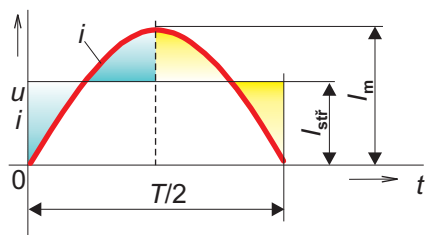
$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cong 0,707 I_m$$

Obdobná úvaha platí i pro střídavé napětí, takže

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cong 0,707 U_m$$

6.4 Střední hodnota střídavého napětí a proudu

Tyto hodnoty mají význam jen pro usměrněný střídavý proud a napětí. Střední hodnota dané veličiny se rovná aritmetickému průměru všech okamžitých hodnot během poloviny periody,



Obr. 6.03 Střední hodnota střídavého napětí a proudu

tedy za dobu $T/2$. Porovnává adekvátní (odpovídající) chemické účinky střídavého a stejnosměrného proudu.

$$I_{\text{stř}} = \frac{2}{\pi} I_m$$

$$U_{\text{stř}} = \frac{2}{\pi} U_m$$

6.5 Vztah mezi efektivními a středními hodnotami

efektivní hodnota

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

střední hodnota

$$I_{\text{stř}} = \frac{2}{\pi} I_m$$

vyjádřením I_m ze vztahů dostaneme:

$$I\sqrt{2} = \frac{\pi}{2} I_{\text{stř}} ;$$

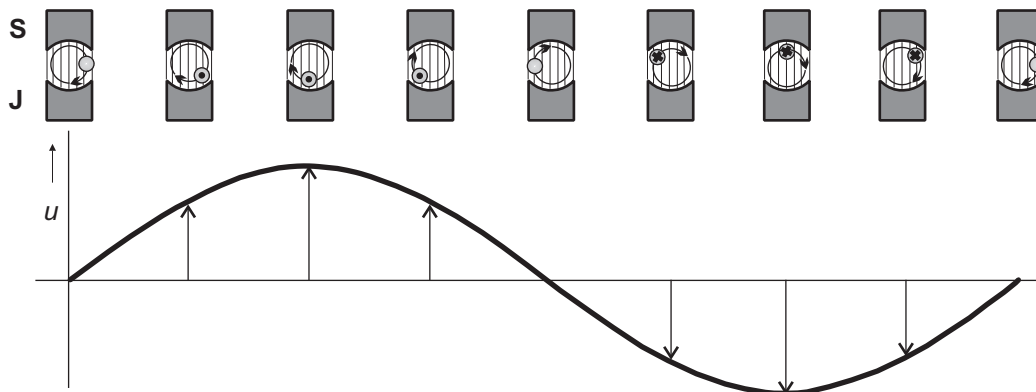
po úpravě:

$$I = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_{\text{stř}} ;$$

obdobně:

$$U = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{\text{stř}} .$$

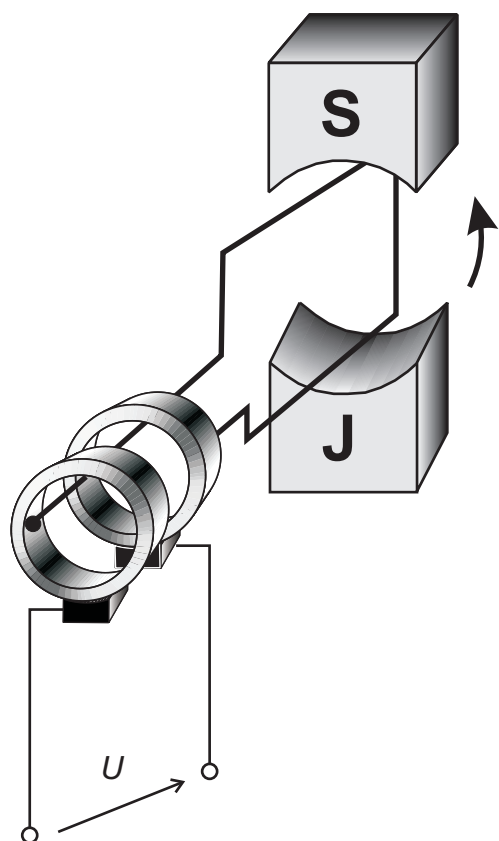
6.6 Získávání střídavého sinusového napětí



Obr. 6.04 Znárodnění indukce střídavého napětí v cívkce rotací cívkky v magnetickém

Střídavá sinusová napětí se v energetice získávají přeměnou energie mechanické v elektrickou pomocí elektromagnetické indukce. Pohybuje-li se vodič v magnetickém poli po kruhové dráze, je jím protínáný počet magnetických indukčních čar v čase různý. Tím bude docházet i k změně velikosti napětí a proudu ve vodiči. Směr proudu ve vodiči určíme pomocí

pravidla pravé ruky pro generátor:



Vložíme-li pravou ruku do magnetického pole tak, aby magnetické indukční čáry vstupovaly do dlaně a palec ukazoval směr pohybu vodiče, ukazují natažené prsty směr indukovaného proudu ve vodiči.

Napětí sinusového průběhu se získávají pomocí generátorů střídavého napětí, jehož zjednodušené schéma je uvedeno na obrázku. Závit vodiče (cívka) je rotačně umístěn v homogenním magnetickém poli. K jeho koncům jsou umístěny vodivé prstence, které rotují společně s ním. Na tyto prstence doléhají kartáče, na kterých se indukují střídavé sinusové napětí a pomocí nichž se při zatížení odebírá indukovaný proud.

Obr. 6.05 Princip získávání střídavého sinusového napětí

6.7 Znázornění sinusových veličin fázory

Průběh sinusových veličin lze znázorňovat pomocí sinusoid. Jejich konstrukce je však pracná a při znázornění více veličin i nepřehledná. Proto se ke znázornění používají tzv. fázory.

Fázor – je orientovaná úsečka, jejíž délka odpovídá maximální hodnotě zobrazené veličiny (U_m , I_m). Směr fázoru je dán úhlem α , který fázor svírá s kladnou osou x . Orientace fázoru se vyznačuje šipkou na konci úsečky. Pro fázor napětí šipkou otevřenou \rightarrow , pro fázor proudu uzavřenou $\rightarrow\rangle$. Fázory mají vlastnosti vektorů a pro počítání s nimi platí stejná pravidla.

Fázorový diagram – obrazec znázorňující sinusové veličiny pomocí fázorů.

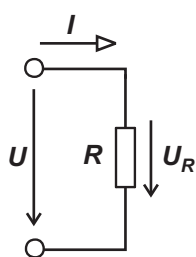
6.7.1 Zásady pro kreslení fázorových diagramů

1. Fázor rotuje úhlovou rychlostí $\omega = 2\pi f$ proti směru hodinových ručiček
2. V jednom diagramu mohou být zaznamenány pouze veličiny se stejným kmitočtem
3. Fázory skládáme či rozkládáme stejně jako vektory
4. V diagramu pracujeme jen s hodnotami stejného fyzikálního významu, např. jen s maximálními či jen s efektivními hodnotami
5. Fázory nad osou x mají kladnou, pod osou x zápornou hodnotu. Fázory ležící na ose x mají nulovou okamžitou hodnotu, fázory ležící na ose y maximální.
6. Při psaní rukou značíme fázory pomocí stříšky nad písmenem např. \hat{U} , \hat{I} . V tištěném textu se značí tučně kurzívou U , I .

6.8 Jednoduché obvody se sinusovým střídavým proudem

Jsou to takové obvody střídavého napětí U nebo proudu I , kde jsou zapojeny ideální rezistor, cívka nebo kondenzátor. Ideální obvodové prvky jsou takové prvky, u nichž se neprojeví vlastnosti jiných prvků. Ideální rezistor R má tedy jen elektrický odpor, cívka L jen indukčnost a kondenzátor C jen kapacitu. Takovéto obvody označujeme jako R , L , C obvody.

6.8.1 Ideální rezistor v obvodu střídavého proudu

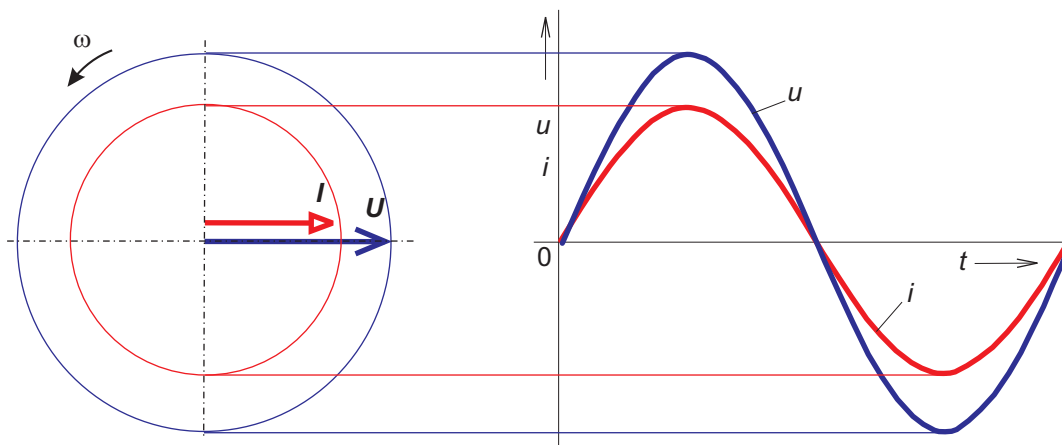


Obr. 6.06

Ideální (činný) rezistor mají tepelné spotřebiče jako žehlička, vařič, akumulární kamna nebo i žárovka. U těchto spotřebičů můžeme zanedbat indukčnost L i kapacitu C . Veškerá elektrická energie se zde mění v teplo. Pro okamžité hodnoty platí obecně Ohmův zákon:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cdot \sin \omega t}{R} = \frac{U_m}{R} \cdot \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

Proud i má stejně jako napětí u sinusový průběh, a protože je při maximální hodnotě svorkového napětí maximální a při nulové hodnotě nulový, jsou napětí a proud ve fázi.



Obr. 6.07 Průběh střídavého napětí a proudu v obvodu s ideálním rezistorem

Platí zde Ohmův zákon stejně tak jako pro obvody se stejnosměrným proudem, takže můžeme psát:

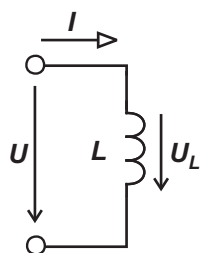
$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega; \text{V}, \text{A}]$$

Pro vodivost (konduktanci) pak efektivní hodnota

$$G = \frac{1}{R} \quad [\text{S}; -, \Omega]$$

6.8.2 Ideální cívka v obvodu střídavého proudu

Střídavý proud, který prochází vinutím cívky, vytváří časově proměnné magnetické pole. To způsobí vznik indukovaného napětí, které podle Lencova pravidla působí proti příčině, jež ho vyvolala, má tedy opačnou polaritu než napětí zdroje.



Obr. 6.08

Cívka svou vlastní indukčností způsobuje, že napětí předbíhá proud o $\pi/2$. V obvodu tedy nastal mezi napětím U a proudem I *fázový posun* φ [fí] = 90° .

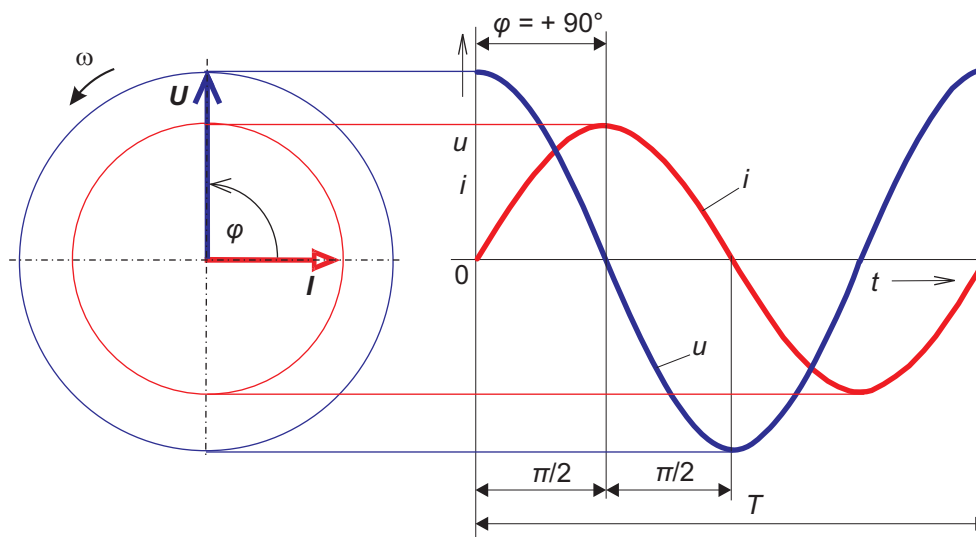
Jestliže pro okamžitou hodnotu střídavého proudu platí: $i = I_m \sin \omega t$, pak pro okamžitou hodnotu střídavého napětí musí platit:

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

(Je zřejmé, že zde neplatí Ohmův zákon).

Na ideální cívce není činný odpor. Přesto však cívka klade odpor průchodu elektrického proudu. Jedná se o odpor zdánlivý, tzv. *indukční reaktanci neboli induktanci* X_L .

$$X_L = \omega L = 2 \pi f L \quad [\Omega; s^{-1}, H; Hz, H]$$



Obr. 6.09 Průběh střídavého napětí a proudu v obvodu s ideální cívkou

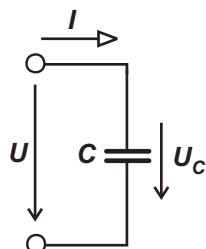
V obvodu platí Ohmův zákon ve tvaru $U = I X_L$ pro efektivní hodnoty a obdobně $U_m = I_m X_L$ pro hodnoty maximální.

Převrácenou hodnotou induktance X_L je *indukční susceptance* B_L

$$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L} \quad [S; -, \Omega; s^{-1}, H]$$

6.8.3 Ideální kondenzátor v obvodu střídavého proudu

Ideální kondenzátor má dokonale nevodivé dielektrikum. Je-li připojen k obvodu střídavého proudu, periodicky se nabíjí a vybíjí. Mění se intenzita elektrického pole a dielektrikum se střídavě polarizuje. Jeho okamžitý náboj se každým okamžikem mění.



Obr. 6.10

Nabíjecí proud v kondenzátoru je největší v okamžiku, kdy je napětí mezi jeho deskami nulové. V okamžiku, kdy je kondenzátor nabit na maximální napětí U_m , je proud v obvodu nulový. Z grafického znázornění průběhu střídavých veličin na kondenzátoru plyne pro okamžité napětí

(Opět zde neplatí Ohmův zákon.):

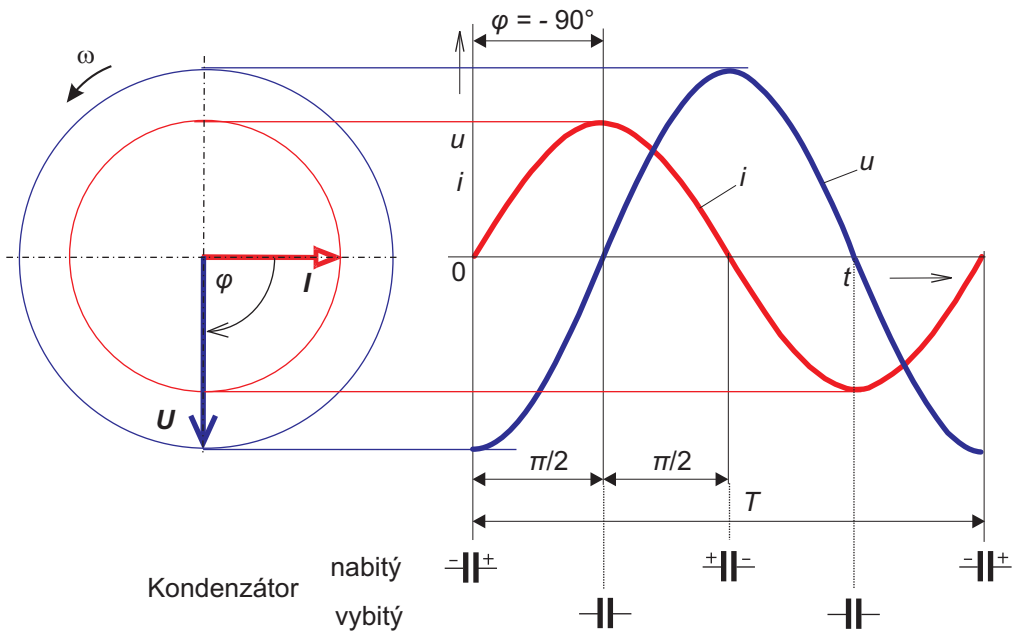
$$u = U_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

okamžitý proud

$$i = I_m \sin \omega t.$$

Proud v obvodu s ideálním kondenzátorem předbíhá napětí o $\pi/2$ a nazývá se *kapacitní proud*.

Odpor, který klade kondenzátor průchodu střídavého proudu, se nazývá *kapacitní reaktan-*



Obr. 6.11 Průběh střídavého napětí a proudu v obvodu s ideálním kondenzátorem

ce, neboli *kapacitance* X_C .

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad [\Omega; -s^{-1}, F; -, Hz, F]$$

Ze vztahu je zřejmé, že se zvyšující se frekvencí kapacitance oproti indukance klesá.

V obvodu opět platí Ohmův zákon pro efektivní hodnoty $U = I X_C$ a pro hodnoty maximální $U_m = I_m X_C$.

Převrácenou hodnotou kapacitance je *kapacitní susceptance* B_C

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \omega C \quad [S; -, \Omega; s^{-1}, F]$$

Cvičení

1. Jaký je vztah mezi periodou a frekvencí? Jak se tyto veličiny vypočítají a v jakých jednotkách uvádějí?
2. Nakreslete časový průběh sinusové veličiny a okótuje významné hodnoty.
3. Uvedte převodní vztah pro přepočet úhlu z radiánů na stupně a naopak.
4. V obloukové míře vypočítejte úhly 30° , 60° , 125° , 315° . (0,52 rad; 1,047 rad; 2,18 rad; 5,49 rad)
5. Ve stupních vypočítejte úhly 0,122 rad, 0,785 rad, 26,18 rad, 2π rad. (7° ; 45° ; 1500° ; 360°).
6. Vysvětlete, co je to efektivní hodnota střídavého proudu.
7. Co je to střední hodnota střídavého proudu či napětí?
8. Vypočítejte frekvenci a dobu kmitu při úhlové frekvenci $314 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$. ($f = 50 \text{ Hz}$; $T = 0,02 \text{ s}$)
9. Jaká je okamžitá hodnota střídavého napětí sinusového průběhu o frekvenci 100 Hz za dobu 2,5 ms, je-li maximální hodnota napětí 6 V? ($u = 6 \text{ V}$)
10. Maximální hodnota proudu je 12 A. Určete jeho efektivní a střední hodnotu. ($I = 8,48 \text{ A}$; $I_{\text{str.}} = 7,64 \text{ A}$)
11. Co je to fázor? Jak ho označujeme a jaké veličiny jím zobrazujeme?
12. Vyjmenujte zásady pro kreslení fázorových diagramů.
13. Rezistorem s činným odporem 4Ω prochází střídavý proud 57,5 A. Určete efektivní a maximální hodnotu napětí na rezistoru a maximální hodnotu proudu. Ve vhodně zvoleném měřítku nakreslete fázorový diagram. ($U = 230 \text{ V}$; $U_m = 325 \text{ V}$; $I_m = 81,3 \text{ A}$)
14. Popište, co se děje v cívce, kterou prochází střídavý proud.
15. Jak velký je fázový posun mezi napětím a proudem v obvodu s ideální cívkou?
16. Vypočítejte indukčnost ideální cívky, která je připojena na střídavé napětí 230 V, 50 Hz, jestliže jí prochází proud 2,5 A. Určete indukční susceptanci této cívky. ($L = 0,29 \text{ H}$; $B_L = 0,0108 \text{ S}$)
17. Popište, jak se chová kondenzátor v obvodu střídavého proudu.
18. Jaký je fázový posun mezi napětím zdroje a proudem v obvodu s ideálním kondenzátorem? Znázorněte pomocí fázorového diagramu.
19. Určete kmitočet střídavého napětí, při kterém má kondenzátor s kapacitou $32 \mu\text{F}$ kapacitní reaktanci 26Ω , 120Ω , 250Ω . ($f = 191$; $41,4$; $19,9 \text{ Hz}$)
20. Vypočítejte kapacitní reaktanci pro kondenzátory s kapacitou $32 \mu\text{F}$, $86 \mu\text{F}$, $115 \mu\text{F}$ při frekvenci 50 Hz. ($X_c = 99,5$; 37 ; $27,7 \Omega$)

6.9 Složené obvody R, L, C

V předešlých kapitolách jsme uváděli, jak se chovají ideální prvky v obvodu střídavého proudu. Je však zřejmé, že skutečné obvody se mohou těmto vlastnostem pouze blížit. Skutečná cívka má například nejen indukčnost, ale i rezistenci, která je dána elektrickým odporem vodiče, ze kterého je navinuta. V obvodu střídavého proudu se tedy bude chovat jako sériově spojený ideální rezistor a ideální cívka. Stejně tak náhradní schéma pro skutečný kondenzátor bude sériovým spojením rezistoru a kondenzátoru, kde rezistor vyjadřuje vlastní ztráty kondenzátoru. V praxi tvoří ideální indukčnost, kapacita a rezistence různé kombinace zapojení, jak je vidět v příloze tohoto textu.

Složený obvod klade průchodu elektrického proudu odpor, který je složen z rezistence, kapacitance a induktance. Má tedy složku činnou (rezistence) a složky reaktanční, které jsou vůči sobě vzájemně posunuty. Jejich součtem je řešení pravoúhlého trojúhelníku pomocí Pythagorovy věty, kde jedna odvěsna představuje složku činnou - rezistenci; druhá odvěsna složku reaktanční – kapacitanci či induktanci a přeponou je pak výsledný odpor obvodu, tzv. *impedance* Z [Ω]

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad [\Omega],$$

kde výraz X dosazujeme podle druhu obvodu (viz. příloha) buď X_L , X_C , případně $X_L - X_C$.

Úhel φ (fi) mezi rezistencí a impedancí je velikost fázového posunu mezi napětím a proudem. V elektrotechnice se kosinus tohoto úhlu nazývá *účinník*.

Převrácenou hodnotou impedance je admitance Y [S], tedy vodivost obvodu. Jejimi složkami jsou činná vodivost G , kapacitní susceptance B_C a indukční susceptance B_L

$$Y = \frac{1}{Z} = \sqrt{G^2 + B^2} \quad [S]$$

kde opět výraz B nabývá hodnot B_L , B_C , či $B_L - B_C$, podle druhu obvodu.

6.9.1 Postup řešení složených obvodů R , L , C

1. Při řešení obvodů není vždy nutné použít všechny body následujících postupů. Vždy vycházíme ze zadání daného příkladu.

2. Schéma zapojení a fázorové diagramy jednotlivých obvodů jsou uvedeny jako příloha v závěru učebního textu.

Všeobecná pravidla

1. Nakreslíme schéma obvodu s označením směru U a I .

2. Nakreslíme fázorový diagram a to tak, že

a) zvolíme řídicí fázor, tedy takovou veličinu, která je pro všechny obvodové prvky stejná. Pro sériová spojení je to I , pro paralelní U . Tuto veličinu nakreslíme ve vhodném měřítku do osy x .

b) ostatní veličiny kreslíme při dodržení zásad

- na činném rezistoru je U a I ve fázi
- na indukčnosti předbíhá U o $90^\circ I$
- na kondenzátoru se U zpožďuje za I o 90°

Veličiny spolu související (U , U_L , U_C , U_R nebo I , I_R , I_C , I_L) kreslíme ve stejném měřítku

Ze zakresleného fázorového diagramu vypočítáme požadované hodnoty U , I , $\cos \varphi$, případně další.

6.9.2 Postup řešení při sériovém zapojení RL , RC , RLC

1. Nakreslíme schéma obvodu.
2. Určíme velikost X_L nebo X_C , nebo obou veličin

$$X_L = 2\pi fL, \quad X_C = \frac{1}{2\pi fC}.$$

3. Určíme velikost impedance

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \text{ kde } X \text{ je } X_L, X_C, \text{ nebo } X_L - X_C.$$

4. Velikost proudu protékajícího obvodem

$$I = \frac{U}{Z}.$$

5. Úbytky napětí na odporech

$$U_R = I \cdot R, \quad U_L = I \cdot X_L, \quad U_C = I \cdot X_C.$$

6. Nakreslíme fázorový diagram. Řídícím fázorem je fázor proudu I , se kterým je fázor U_R ve fázi. Fázor U_L předbíhá proud o 90° a fázor U_C se o 90° za proudem zpožďuje. Výsledný fázor napětí U je geometrickým součtem $U = U_R + U_L + U_C$ (II. Kirchhoffův zákon).

7. Určíme účinník $\cos \varphi$

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

8. Z účinníku určíme fázový posun mezi U a I .

9. Podle smyslu fázového posunu určíme charakter obvodu. Předbíhá-li proud napětí, je charakter kapacitní, zpožďuje-li se I za U , je charakter induktivní.

Příklad: Skutečná cívka s indukčností 0,25 H a odporem 18 Ω je sériově připojena ke kondenzátoru s kapacitou 150 μF a obvodem prochází proud 6 A při frekvenci 50 Hz. Určete svorkové napětí, úbytky napětí U_R , U_L , U_C , induktanci X_L , kapacitanci X_C , impedanci Z a fázový posun φ .

Protože skutečná cívka má jak indukčnost, tak rezistenci, jedná se o sériové spojení RLC .

Schéma zapojení a fázorový diagram jsou uvedeny v příloze.

$$R = 18 \Omega, L = 0,25 \text{ H}, C = 150 \mu\text{F} = 150 \cdot 10^{-6} \text{ F}, I = 6 \text{ A}, f = 50 \text{ Hz}.$$

Induktance

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,25 \Omega = 78,54 \Omega.$$

Kapacitance

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 150 \cdot 10^{-6}} \Omega = 21,22 \Omega.$$

Impedance

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{18^2 + (78,54 - 21,22)^2} \Omega = 60,08 \Omega.$$

Svorkové napětí

$$U = ZI = 60,08 \cdot 6 = 360,48 \text{ V}.$$

Úbytky napětí

$$U_R = IR = 6 \cdot 18 = 108 \text{ V},$$

$$U_L = IX_L = 6 \cdot 78,54 = 471,24 \text{ V},$$

$$U_C = IX_C = 6 \cdot 21,22 = 127,32 \text{ V}.$$

Účinník

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{108}{360,48} = 0,299.$$

Fázový posun

$$\varphi = 72^\circ 34'.$$

Protože $X_L > X_C$, obvod bude mít induktivní charakter.

6.9.3 Postup řešení při paralelním spojení RL , RC , a RLC

Nakreslíme schéma obvodu

Určíme velikost G , B_L nebo B_C nebo obou veličin

$$G = \frac{1}{R} \quad , \quad B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{2\pi fL} \quad , \quad B_C = \frac{1}{X_C} = 2\pi fC$$

Určíme admitanci

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \quad , \quad \text{kde za } B \text{ dosadíme } B_L, B_C, \text{ nebo } B_L - B_C \text{ podle druhu obvodu.}$$

Proud protékající obvodem

$$I = U \cdot Y$$

Proudy protékající jednotlivými větvemi

$$I_R = U \cdot G \quad , \quad I_L = U \cdot B_L \quad , \quad I_C = U \cdot B_C$$

Fázorový diagram. Řídicím fázorem je napětí, se kterým je fázor I_R ve fázi. Fázor I_L se zpožďuje a fázor I_C předbíhá o 90° . Výsledný fázor I je geometrickým součtem fázorů $I = I_R + I_L + I_C$ (I. Kirchhoffův zákon).

Určíme účinník $\cos \varphi$

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

Z účinníku určíme fázový posun mezi U a I .

Určíme charakter obvodu. Předbíhá-li I U , je charakter kapacitní, zpožďuje-li se I za U , je charakter induktivní.

Příklad: Rezistor s činným odporem 48Ω , cívka s indukčností $0,4 \text{ H}$ a kondenzátor s kapacitou $60 \mu\text{F}$ jsou paralelně zapojeny a připojeny na zdroj napětí 230 V , 50 Hz . Určete proudy v jednotlivých větvích I_R , I_L , I_C , celkový proud I , impedanci Z , admitanci Y a fázový posun φ .

Schéma zapojení a fázorový diagram jsou uvedeny v příloze.

$$R = 48 \Omega, L = 0,4 \text{ H}, C = 60 \mu\text{F} = 60 \cdot 10^{-6} \text{ F}, U = 230 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}.$$

Činná vodivost – konduktance

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{48} \text{ S} = 0,02 \text{ S}.$$

Indukční susceptance

$$B_L = \frac{1}{2\pi fL} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,4} \text{ S} = 7,95 \cdot 10^{-3} \text{ S}.$$

Kapacitní susceptance

$$B_C = 2\pi fC = 2\pi \cdot 50 \cdot 60 \cdot 10^{-6} \text{ S} = 18,8 \cdot 10^{-3} \text{ S}.$$

Admitance

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = \sqrt{0,02^2 + (7,95 \cdot 10^{-3} - 18,8 \cdot 10^{-3})^2} \text{ S} = 0,0227 \text{ S}.$$

Impedance

$$Z = \frac{1}{Y} = 49,95 \Omega.$$

Celkový proud

$$I = U \cdot Y = 230 \cdot 0,0227 \text{ A} = 5,22 \text{ A}.$$

Proudy v jednotlivých větvích

$$I_R = UG = 230 \cdot 0,02 \text{ A} = 4,6 \text{ A},$$

$$I_L = UB_L = 230 \cdot 7,95 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 1,83 \text{ A},$$

$$I_C = UB_C = 230 \cdot 18,8 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0,881 \text{ A}.$$

Účinník

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{4,60}{5,22} = 0,881.$$

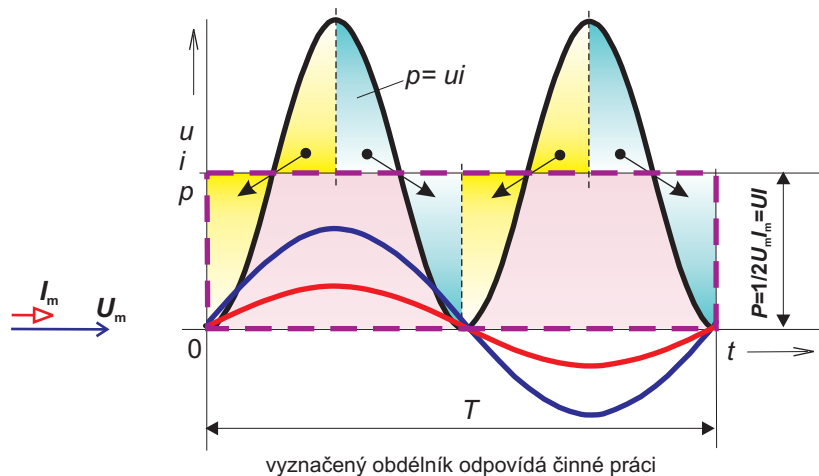
Fázový posun

$$\varphi = 28^\circ 13'.$$

Protože $I_C > I_L$, obvod bude mít kapacitní charakter.

6.10 Výkon střídavého proudu, práce, účinník

1. V obvodu jsou zapojeny jen spotřebiče s činným odporem (žárovka, topná tělesa ...).



Obr. 6.12 Výkon v obvodu s činným rezistorem

a sinusoidou výkonu je práce střídavého proudu za periodu. Přeměnou této plochy v obdélník se základnou T , odpovídá jeho výška střednímu výkonu P za periodu.

Střední výkon
$$P = \frac{1}{2} U_m I_m .$$

Protože
$$U_m = \sqrt{2}U , \quad I_m = \sqrt{2}I ,$$

bude po dosazení
$$P = \frac{1}{2} \sqrt{2}U \sqrt{2}I ,$$

po úpravě pak
$$P = UI$$

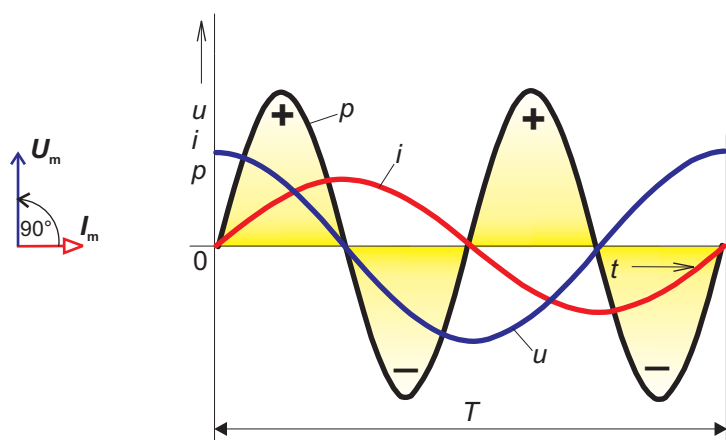
Výkon efektivního proudu v obvodu s činným odporem je dán součinem efektivních hodnot U a I .

Napětí a proud jsou ve fázi, a protože okamžitý výkon je

$$p = ui,$$

je jeho hodnota v kladné i záporné periodě kladná. Křivka výkonu je tedy sinusoida ležící nad časovou osou s dvojnásobným kmitočtem. Obsah plochy omezené časovou osou

2. Výkon proudu, který prochází ideální cívkou. Střídavý proud je za střídavým napětím

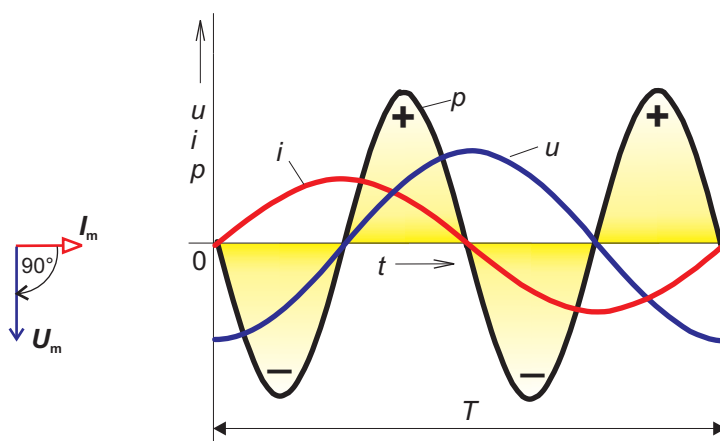


Obr. 6.13 Výkon v obvodu s ideální cívkou

magnetické pole zaniká a jeho energie se elektromagnetickou indukcí mění v elektrickou energii a vrací se zpět do zdroje.

zpožděn o 90° . Okamžitý výkon $p = ui$ má v první čtvrtině periody hodnotu kladnou, ve druhé čtvrtině zápornou. Střední hodnota práce za celou periodu je tedy nulová. V cívce se vlivem indukčnosti během jedné čtvrtiny periody vytváří magnetické pole a práce proudu se mění v energii magnetického pole. Během druhé čtvrtiny periody

3. Průběh okamžitého výkonu, je-li v obvodu zapojen ideální kondenzátor.

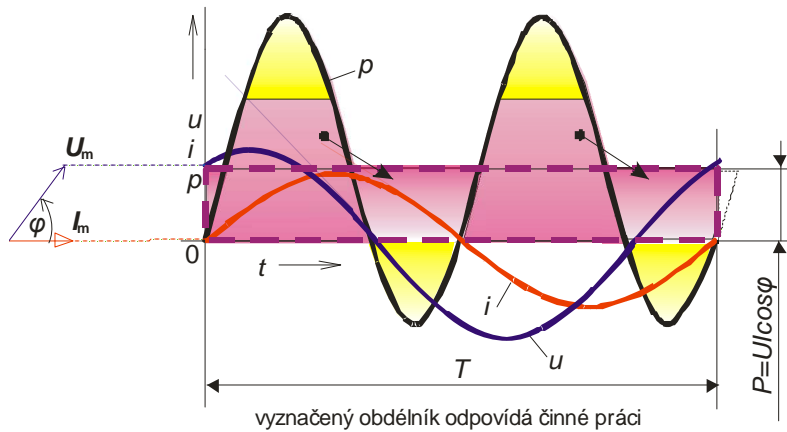


Obr. 6.14 Výkon v obvodu s ideálním kondenzátorem

elektrické pole zaniká a jeho energie se mění v elektrickou energii, která se vrací do zdroje. Střední hodnota práce střídavého proudu je tedy nulová.

Proud předbíhá napětí o 90° . Během první čtvrtiny periody se kondenzátor nabíjí – mezi deskami vzniká elektrické pole. Elektrická práce se mění v energii elektrického pole. Během druhé čtvrtiny periody se kondenzátor vybíjí – elek-

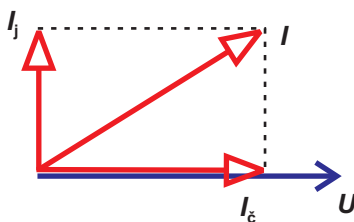
4. Obvod s více prvky – okamžitý výkon pro fázový posun φ (fí), (převládá indukčnost).



Obr. 6.15 Výkon v obvodu s více prvky

Při odebrání výkonu se odebírá i energie ze zdroje. Ta se ve spotřebiči mění na užitečnou práci a na energii potřebnou k vytvoření magnetického pole. Začneme-li se proud zmenšovat, magnetické pole slábne, jeho energie se uvolňuje – mění se v elektrickou ener-

gii a vrací se zpět do zdroje.



Obr. 6.16 Rozložení proudu na činnou a jalovou složku

Výkon efektivního proudu při fázovém posunu φ (fí)

určíme rozložením fázoru I na dvě složky.

proud činný $I_e = I \cos \varphi$ ve fázi s U

proud jalový $I_j = I \sin \varphi$ kolmá na U

Tyto složky jsou pouze teoretické, protože je nelze změřit.

řit.

Elektrickou práci koná pouze činný proud I_e

Činný výkon P

$$P = UI_e = UI \cos \varphi \quad [\text{W}]$$

závisí na úhlu fázového posunu φ (fí) mezi U a I , proto se $\cos \varphi$ nazývá **účinník**.

Jalový výkon Q

$$Q = UI_j = UI \sin \varphi, \quad [\text{var}]$$

je vytvářen společně s magnetickým (elektrickým) polem, jalovým proudem I_j , který je zpožděn za U o 90° a *nekoná práci*. Jednotkou je [var] – dříve voltampér reaktanční.

Zdánlivý výkon S

$$S = UI \quad [\text{VA}]$$

je součinem efektivních hodnot U a I . Počítá se z údajů voltmetru a ampérmetru a je důležitý, protože se podle něj dimenzují elektrické stroje a rozvodné sítě.

Činný výkon P se rovná zdánlivému při účinníku $\cos \varphi = I$.

Elektrická práce W [J]

$$W = Pt = UI \cos \varphi \cdot t$$

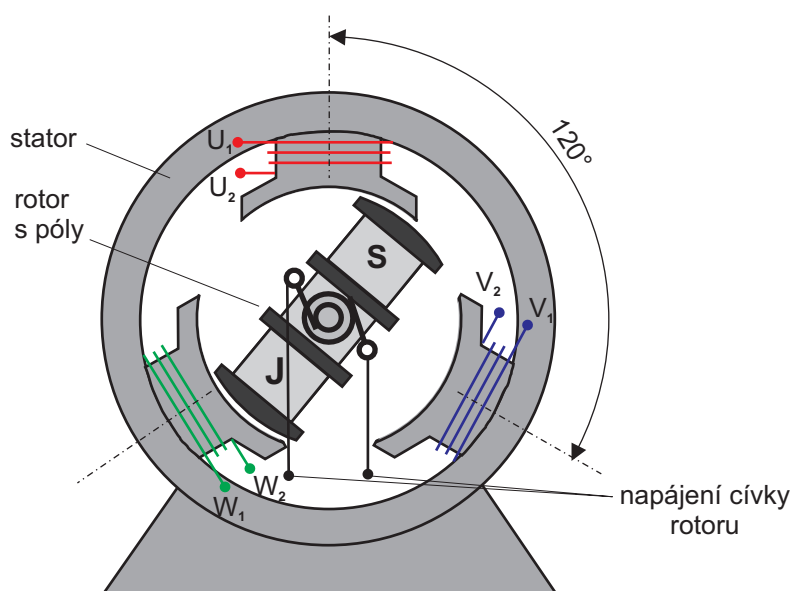
Jednotkou práce je jeden joule [J], což v elektrotechnice odpovídá jedné watsekundě [W·s]. To je však jednotka příliš malá, proto se v praxi používají W·h, kW·h atd.

Cvičení

1. Skutečná cívka má indukčnost 185 mH a odpor 60 Ω . Je připojena ke zdroji střídavého napětí o frekvenci 100 Hz a prochází jí proud 2 A. Určete impedanci obvodu, napětí zdroje, napětí na odporu a indukčnosti, účinník a fázový posun mezi napětím a proudem. ($Z = 130,81 \Omega$; $U = 261,62$ V; $U_R = 120$ V; $U_L = 232,48$ V; $\text{tg } \varphi = 1,94$; $\varphi = 62^\circ 42'$)
2. Rezistor s odporem 200 Ω je sériově spojen s ideálním kondenzátorem o kapacitě 32 μF a připojen na napětí 220 V s frekvencí 50 Hz. Vypočítejte impedanci obvodu, proud protékající obvodem, napětí na rezistoru a ideálním kondenzátoru a fázový posun mezi napětím a proudem. ($Z = 223,37 \Omega$; $I = 0,98$ A; $U_R = 196,98$ V; $U_C = 97,97$ V; $\varphi = 26^\circ 27'$)
3. Rezistor s odporem 400 Ω je paralelně spojen s ideální cívkou o indukčnosti 125 mH. Obvod je připojen ke zdroji o napětí 230 V a frekvenci 250 Hz. Určete proudy na obou prvcích obvodu, celkový proud, admitanci a impedanci obvodu a fázový posun. ($I_R = 0,58$ A; $I_L = 1,17$ A; $I = 1,31$ A; $Y = 5,67 \cdot 10^{-3}$ S; $Z = 176,26 \Omega$; $\varphi = 63^\circ 50'$)
4. K čemu slouží kompenzační kondenzátory, které bývají připojeny k motorům či zářivkám?
5. U sériového rezonančního obvodu tvořeného ideálním rezistorem s odporem 16,5 Ω , ideálním kondenzátorem s kapacitou 125 μF a ideální cívkou o indukčnosti 400 mH a připojeného na napětí 220 V, stanovte rezonanční kmitočet, proud při rezonanci, indukční a kapacitní reaktanci při rezonanci a napětí na jednotlivých prvcích obvodu. ($f_0 = 22,50$ Hz; $I_0 = 13,33$ A; $X_L = X_C = 56,56 \Omega$; $U_R = 219,99$ V; $U_L = U_C = 754,11$ V)
6. Vysvětlete princip rezonance v obvodu střídavého proudu.
7. Nakreslete a popište schéma paralelního a sériového rezonančního obvodu.
8. K čemu slouží Thomsonův vzorec? Definujte jej.
9. Co je to činná a jalová složka proudu a jak ji určíme?
10. Uveďte vztahy pro činný jalový a zdánlivý výkon. Uveďte jednotky.
11. Který z výkonů koná práci?
12. Co je to účinník?
13. Uveďte vztah pro elektrickou práci střídavého proudu a jednotky, kterými se vyjadřuje.
14. Čím se elektrická práce měří?
15. Na napětí 230 V je připojen jednofázový motor o činném výkonu 2,2 kW, kterým protéká proud 12 A. Stanovte zdánlivý a jalový výkon, účinník, činnou a jalovou složku proudu. ($S = 2,76$ kVA; $Q = 1,67$ kvar; $\varphi = 37^\circ 9'$; $I_c = 9,56$ A; $I_j = 7,24$ A)

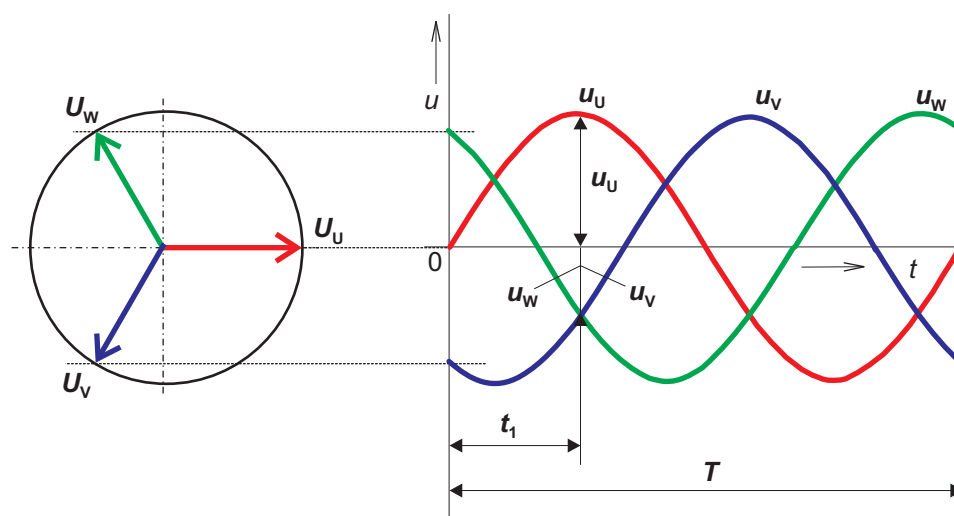
7 Trojfázová soustava

Trojfázová soustava má tři stejně velká napětí sinusového průběhu, jež jsou vzájemně posunuta o 120° , tedy o jednu třetinu periody.



Obr. 7.01 Vznik trojfázového střídavého napětí v generátoru

Trojfázové napětí vzniká v generátorech. Generátor má ve *statoru* (nehybné části) uloženy v drážkách cívky tři vinutí – fází, které jsou vzájemně posunuty o 120° . Jejich začátky jsou označeny U_1, V_1, W_1 a konce U_2, V_2, W_2 .



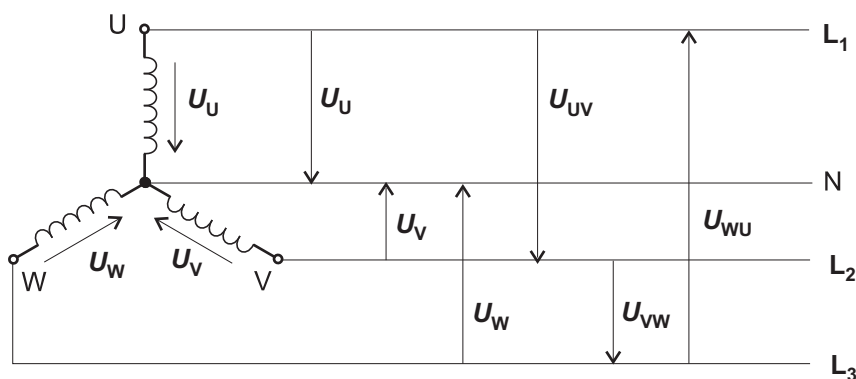
Obr. 7.02 Časový průběh trojfázového střídavého napětí

Rotor je pohyblivá část generátoru uložená uvnitř dutiny statoru. Rotor je obvykle tvořen elektromagnetem napájeným stejnosměrným proudem, aby nedocházelo ke změně polarity pólů. Otáčením rotoru dochází i k rotaci jeho magnetického pole. To přitom protíná vinutí jednotlivých fází ve statoru a indukuje v nich střídavé sinusové napětí.

Z časového průběhu trojfázového napětí i z fázorového diagramu plyne, že součet okamžitých hodnot všech tří napětí je v každém okamžiku roven nule. Této vlastnosti trojfázové soustavy se využívá při spojování vinutí elektrických strojů (generátorů, motorů, transformátorů) do hvězdy (Y) nebo do trojúhelníka (D). Díky tomu stačí pro přenos elektrické energie jen tři, (případně čtyři) vodiče a ne vodičů šest.

7.1 Spojení trojfázového vinutí do hvězdy (Y)

Při tomto zapojení se buď konce, nebo začátky všech tří fází (cívek) vodivě spojí. Toto spojení se nazývá uzel, případně nulový bod a ve čtyřvodičové přenosové soustavě je z něj vyveden střední vodič N. Začátky fází U_1 , V_1 , W_1 jsou vyvedeny na svorky generátoru a k nim připojeny fázové vodiče L_1 , L_2 , L_3 sloužící k samotnému přenosu elektrické energie.

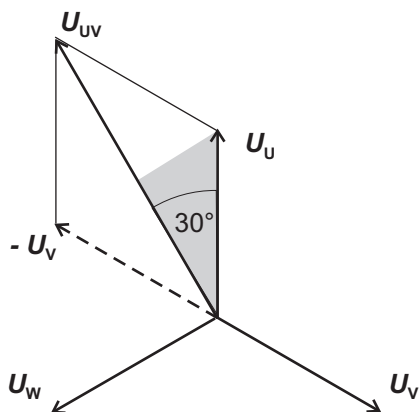


Obr. 7.03 Spojení fází do hvězdy - Y

Velikost napětí mezi jednotlivými fázemi a středním vodičem nazýváme *napětí fázové*, napětí naměřené mezi jednotlivými fázemi *napětí sdružené*. Pro tato napětí platí:

Napětí fázové:
$$U_f = U_U = U_V = U_W$$

Napětí sdružené:
$$U_s = U = U_{UV} = U_{VW} = U_{WU},$$



Obr. 7.04 Fázorový diagram pro spojení fází do hvězdy - Y

kde U je napětí síťové.

Z obrázku je patrný směr jednotlivých napětí. Z II. Kirchhoffova zákona lze ze smyčky U_U , U_V a U_{UV} určit fázor sdruženého napětí U_{UV} :

$$U_{UV} + U_V - U_U = 0$$

$$U_{UV} = U_U - U_V$$

Sdružené napětí je tedy geometrickým rozdílem napětí dvou fází, protože fáze jsou spojeny proti sobě.

Ve fázorovém diagramu určíme velikost sdruženého napětí tak, že k fázoru U_U přičteme opačný fázor U_V . Výslednicí je pak fázor sdruženého napětí U_{UV} (viz. Obr.). Z naznačeného pravoúhlého trojúhelníku plyne:

$$\frac{U_{UV}}{2} = U_U \cos 30^\circ = U_U \frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$U_{UV} = \sqrt{3} U_U.$$

Můžeme tedy psát:

$$U_s = U = \sqrt{3} U_f \cong 1,73 U_f.$$

V praxi je používána rozvodná síť nízkého napětí s normalizovaným napětím

3 x 230 / 400 V, kde 230 V je napětí fázové U_f a 400 V napětí sdružené U_s . K této soustavě lze připojit jak jednofázové, tak i trojfázové spotřebiče.

7.2 Spojení trojfázového vinutí do trojúhelníku

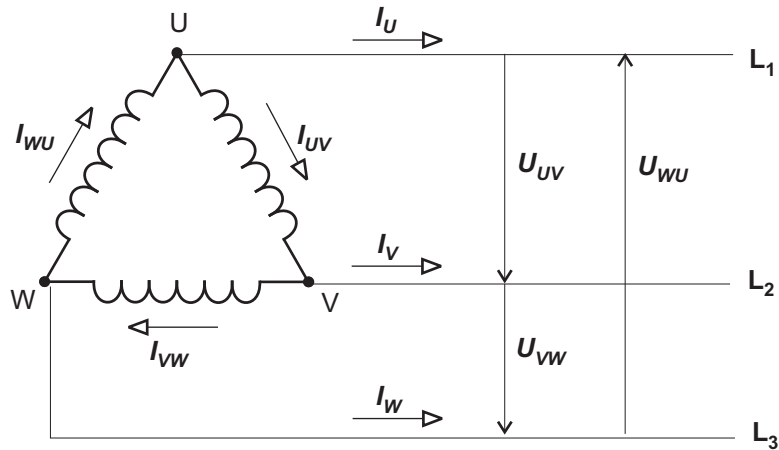
Při tomto spojení je vždy konec jednoho vinutí fáze spojen se začátkem vinutí fáze následující, takže vinutí tvoří uzavřený obvod, a proto zde není střední vodič. Rozvodná síť je tedy třívodičová. V zapojení je jen jeden druh napětí, napětí mezi fázemi tedy sdružené napětí U_s .

$$U_s = U = U_f$$

Proudové poměry v obvodu jsou zřejmé z obrázku. Z I. Kirchhoffova zákona platí např. pro uzel U

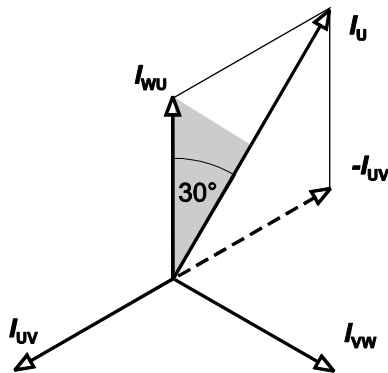
$$I_{WU} = I_U + I_{UV}$$

$$I_U = I_{WU} - I_{UV}$$



Obr. 7.05 Spojení fází do trojúhelníku - D

Sdružený proud je dán geometrickým součtem proudů dvou fází, jak je patrné z fázorového diagramu.



Obr. 7.06 Fázorový diagram pro spojení fází do trojúhelníku - D

$$\frac{I_U}{2} = I_{WU} \cos 30^\circ = I_{WU} \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$I_U = I_{WU} \sqrt{3} = I \cong 1,73 I_f$$

Síťový proud je při spojení vinutí generátoru do trojúhelníku $\sqrt{3}$ krát větší než fázový proud generátoru (transformátoru).

7.3 Výkon a práce trojfázového proudu

Výkon trojfázového proudu je dán součtem výkonů jednotlivých fází.

$$P = P_U + P_V + P_W$$

Činný výkon jedné fáze je

$$P_f = U_f I_f \cos \varphi,$$

kde úhel φ je fázový posun mezi fázovým napětím U_f a fázovým proudem I_f .

Pomocí sdružených hodnot napětí a proudu lze výkon vyjádřit následovně:

Pro zapojení do hvězdy Y

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}}, \quad I_f = I.$$

Pro výkon platí:

$$P = 3U_f I_f = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I \cos \varphi = UI \cos \varphi \sqrt{3}.$$

Pro zapojení do trojúhelníku D

$$U_f = U, \quad I_f = \frac{I}{\sqrt{3}}.$$

Pro výkon platí:

$$P = UI = 3U \frac{I}{\sqrt{3}} \cos \varphi = UI \cos \varphi \sqrt{3}.$$

Uvedený vztah platí pro *činný výkon* generátoru a *činný příkon* spotřebiče.

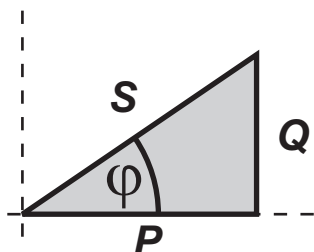
$$P = UI \cos \varphi \sqrt{3} \quad [\text{W}; -, \text{V}, \text{A}, -].$$

Pro *zdánlivý výkon* trojfázové soustavy platí:

$$S = 3U_f I_f = UI \sqrt{3} \quad [\text{VA}; -, \text{V}, \text{A}].$$

Pro *jalový výkon* trojfázové soustavy platí:

$$Q = 3U_f I_f \sin \varphi = UI \sin \varphi \sqrt{3} \quad [\text{var}; -, \text{V}, \text{A}, -].$$



Obr. 7.07 Trojúhelník výkonů

Práce trojfázového proudu

Elektrická práce

$$W = P \cdot t,$$

se tedy rovná součinu daného výkonu a času. Elektrická práce trojfázové soustavy je při souměrném zatížení:

$$W = UI \cos \varphi t \sqrt{3} \quad [W \cdot s; V, A, -, s, -]$$

7.4 Točivé magnetické pole

Rotujeme-li permanentním magnetem kolem osy, rotuje současně s ním i jeho magnetické pole. Hovoříme o točivém magnetickém poli. Je to pole, které plynule mění svůj směr, jeho velikost a průběh se však nemění. Obdobné točivé magnetické pole vznikne i působením trojfázového proudu ve vinutí statoru elektrického stroje za předpokladu, že cívky jednotlivých fází jsou posunuty o 120° , tedy stejně jako jsou vzájemně posunuty časové průběhy přiváděných proudů. Jeden kmit střídavého proudu tedy vytvoří jednu otáčku točivého magnetického pole. Rychlost otáčení magnetického pole je shodná s frekvencí přiváděného střídavého proudu $n = f$.

Točivé magnetické pole je základ funkce indukčních motorů, kde dochází k vzájemnému působení točivého pole statoru a magnetického pole, vytvořeného proudem indukovaným v rotoru nebo u synchronních motorů, které mají na rotoru budiče vinutí napájené stejnosměrným proudem vytvářejícím magnetické pole.

Cvičení

1. Vysvětlete pojem trojfázová soustava.
2. Vysvětlete princip získávání trojfázového střídavého napětí.
3. Co je to rotor a stator generátoru? Jaká je jejich funkce při získávání elektrické energie?
4. Zakreslete časový průběh střídavého trojfázového napětí.
5. Nakreslete a popište spojení trojfázového vinutí do hvězdy.
6. Co je to napětí fázové a sdružené a jaký je mezi nimi vztah?
7. Nakreslete a popište spojení trojfázového vinutí do trojúhelníku.
8. Při spojení vinutí do hvězdy je z uzlu, tedy z místa spojení konců všech vinutí vyveden střední vodič N, kterým při souměrném zatížení sítě neprochází proud. Vysvětlete proč.

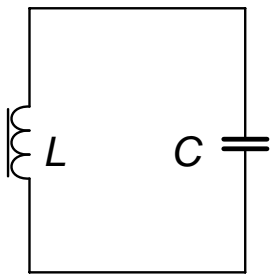
9. Uveďte vztah a jednotky pro činný, jalový a zdánlivý výkon v trojfázové soustavě.
10. Vysvětlete vznik točivého magnetického pole.
11. Trojfázový generátor dodává při sdruženém napětí 400V proud 180 A. Při souměrném zatížení je účinník 0,6. Stanovte činný, jalový a zdánlivý výkon. ($P = 74,82 \text{ kW}$; $Q = 99,77 \text{ kvar}$; $S = 124,71 \text{ kVA}$)

8. Elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické vlnění je fyzikální děj běžně pozorovatelný v přírodě a široce využívaný v technické praxi. Vlastnosti elektromagnetického vlnění má světlo i tepelné záření, elektromagnetické vlnění umožňuje dálkový přenos informací například ve formě zvuku či obrazu, a to nejen na Zemi, ale i v kosmickém prostoru.

Zdrojem elektromagnetického vlnění je elektromagnetický oscilátor.

8.1 Elektromagnetický oscilátor

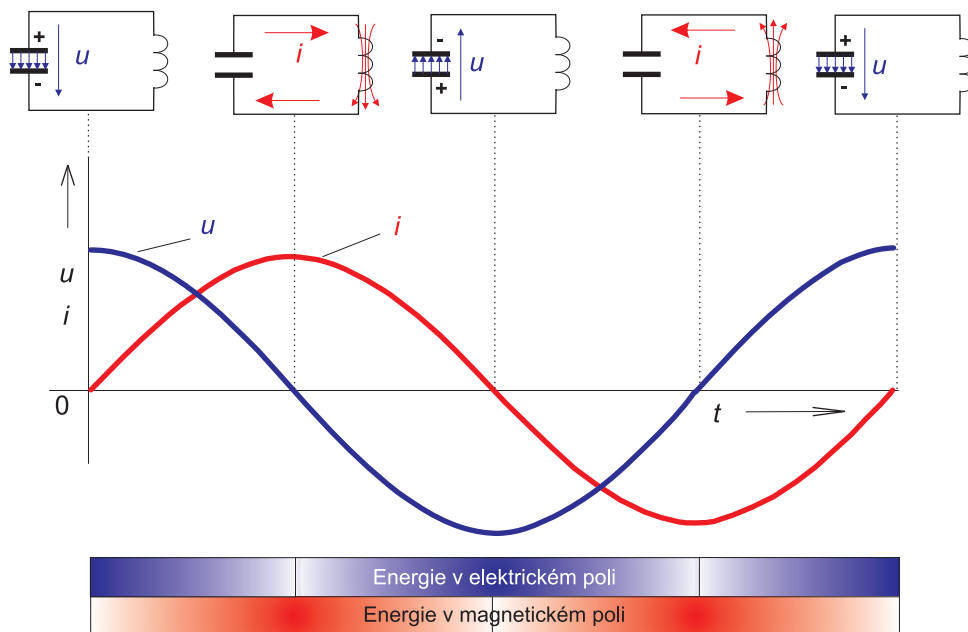


Obr. 8.01 Oscilační obvod

Nejjednodušším příkladem elektromagnetického oscilátoru je obvod LC (oscilační obvod) tedy obvod tvořený cívkou s indukčností L a kondenzátorem s kapacitou C .

Elektromagnetický oscilátor lze popsat vzájemnými přeměnami elektrického a magnetického pole. Nabitý kondenzátor je připojen k cívce.

Mezi deskami nabitého kondenzátoru se vytvoří elektrické pole, jehož energie představuje počáteční energii oscilátoru. Po připojení kondenzátoru k cívce začne oscilačním obvodem procházet proud, kondenzátor se vybíjí a energie elektrického



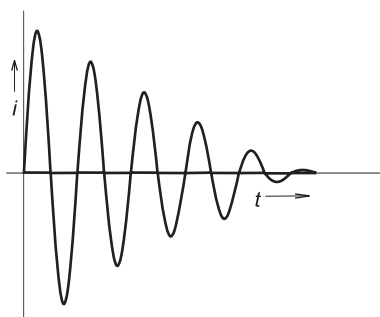
Obr. 8.02 Elektrické a magnetické pole v oscilačním obvodu

pole se zmenšuje. Současně se zvětšuje proud procházející cívkou a vytváří kolem ní magnetické pole. Když se kondenzátor vybije, začne také slábnout magnetické pole cívky. Tato změna magnetického pole cívky však v cívce indukuje napětí, které vyvolá proud, který bude nabíjet kondenzátor na opačnou polaritu, a to tak dlouho, dokud magnetické pole cívky zcela nevyumizí. Energie elektrického pole kondenzátoru se tedy mění na energii magnetického pole cívky a naopak.

8.2 Vlastní a nucené kmitání elektromagnetického oscilátoru

8.2.1 Vlastní kmitání

Kmitavý (oscilační) obvod je tvořen cívkou a kondenzátorem. Především na vinutí cívky



Obr. 8.03 Tlumené kmitání

dochází ke ztrátám zapříčiněným činným odporem tohoto vinutí. Kmitavá energie oscilátoru se tady mění v teplo. Nejsou-li tyto ztráty průběžně nahrazovány, veškerá elektrická a magnetická energie jednorázově vybuzeného kmitavého obvodu se postupně mění v teplo, kmitání se zmenšuje, až ustane. **Vlastní kmitání oscilačního obvodu je vždy tlumené.**

8.2.2 Nucené kmitání

Technická praxe vyžaduje, aby kmitání oscilačního obvodu bylo netlumené, aby tedy napětí na oscilátoru mělo stálou amplitudu. Aby byl tento požadavek naplněn, musíme ztráty vzniklé tlumením periodicky nahrazovat, musíme oscilátoru energii dodávat zvnějšku. To lze učinit například tak, že na začátku každé periody připojíme oscilační obvod na krátký okamžik ke zdroji stejnosměrného napětí. Takto by se kondenzátor nabil na počáteční hodnotu a oscilátor by kmital neustále. Průběh jeho napětí by však nebyl harmonický. Připojíme-li však oscilátor trvale ke zdroji střídavého napětí, vzniká v něm nucené kmitání. Oscilátor kmitá s frekvencí připojeného zdroje (ne s frekvencí vlastního kmitání). **Nucené kmitání je netlumené.**

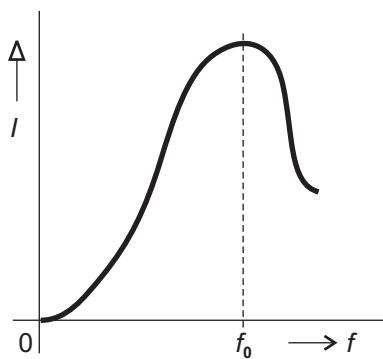
Vlastnosti oscilačního obvodu však ovlivňují nucené kmitání. To dosahuje maximální amplitudy tehdy, je-li frekvence nuceného kmitání rovna vlastní frekvenci oscilačního obvodu. Při splnění této podmínky nastává **rezonance elektromagnetického oscilátoru.**

8.3 Rezonanční obvody

Jsou to RLC obvody, kde se indukance a kapacitance vzájemně rovnají, takže zdroj zatě-
žují pouze rezistory. Tyto obvody jsou frekvenčně závislé.

8.3.1 Sériový rezonanční obvod

Schéma zapojení a fázorový diagram jsou uvedeny v přehledu *RLC* obvodů. Impedance se
při stejných hodnotách indukance a kapacitance rovná rezistenci.



Obr. 8.04 Frekvenční proudová
závislost u sériové rezonance

$$Z_0 = \sqrt{R^2} = R.$$

Maximální proud v rezonančním obvodu

$$I_0 = \frac{U}{Z_0} = \frac{U}{R}$$

je proud při tzv. *rezonančním kmitočtu* f_0 .

Rezonanční podmínkou je rovnost indukance X_L a
kapacitance X_C , tedy

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}.$$

Úhlový rezonanční kmitočet ω_0 .

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Dosadíme-li za $\omega_0 = 2\pi f_0$, pak po úpravě dostaneme *Thomsonův vzorec*:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}; -, -, -, \text{H}, \text{F}].$$

Ze vztahu plyne, že při stálém kmitočtu f_0 a stálé kapacitě C nastane rezonance při

$$L_0 = \frac{1}{\omega_0^2 C}.$$

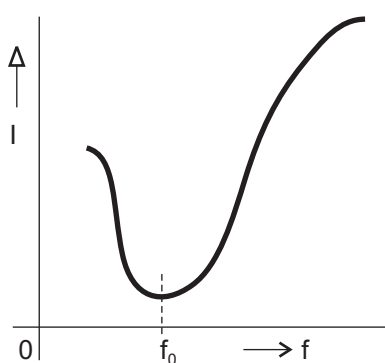
Při stálé indukčnosti L nastane rezonance při

$$C_0 = \frac{1}{\omega_0^2 L}.$$

Sériovou rezonanci nazýváme rezonancí napěťovou, protože se při ní vzájemně ruší napětí. Může zde však dojít k tomu, že napětí na cívce L či kondenzátoru C bude několikanásobně vyšší než napětí svorkové, což může ohrozit izolaci elektrického zařízení.

Užití: laděné obvody v rozhlasových přijímačích, televizorech, navigačních systémech atd.

8.3.2 Paralelní rezonanční obvod



Obr. 8.05 Frekvenční proudová závislost u paralelní rezonance

V praxi se jedná převážně o spojení skutečné cívky (R , L sériově) a skutečného kondenzátoru, který má téměř vlastnosti ideálního (kromě elektrolytických) a je k cívce připojen paralelně.

Platí zde *Thomsonův vzorec*. V případě, že činný rezistor cívky je malý, bude i proud při impedanci minimální, protože

$$I_0 = \frac{U}{Z_0}.$$

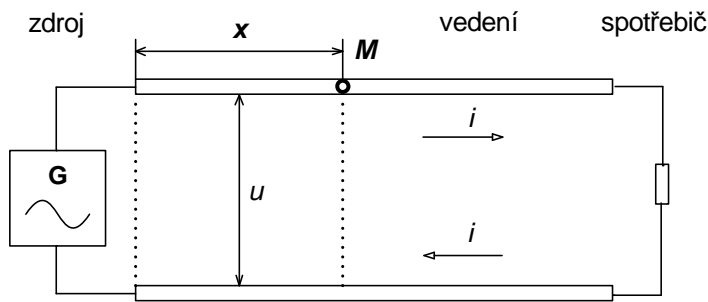
V obvodu však tento proud může dosáhnout nebezpečné velikosti. Hovoříme o proudové rezonanci.

Užití: v elektronice např. zamezení vstupu střídavého proudu s nežádoucím kmitočtem do dalšího obvodu, zejména v ladících a vazebních obvodech u rozhlasových přijímačů a v televizorech.

8.4 Vznik elektromagnetického vlnění

V kmitajícím elektromagnetickém oscilátoru probíhají periodické změny energie, která však nepřechází do okolí oscilátoru. V praxi je ale nutné energii z oscilátoru přenášet. Například ze zdroje střídavého napětí o frekvenci 50 Hz, který lze považovat za nízkofrekvenční oscilátor, je energie přenášena dvěma vodiči ke spotřebiči. Mezi vodiči spojujícími zdroj se spotřebičem je v každém okamžiku a ve všech bodech na vedení stejné napětí. Bude-li oscilátor kmitat s vysokou frekvencí, bude mít přenos energie ze zdroje ke spotřebiči jiný průběh.

Uvažujme tedy vysokofrekvenční zdroj harmonického napětí, spojený se spotřebičem dvou vodičovým vedením (viz Obr. 8.06).



Obr. 8.06 Přenos elektromagnetického vlnění vedením

Nejdříve je ale nutné uvědomit si jednu základní skutečnost: změny napětí na začátku vedení dospějí na jeho konec (ke spotřebiči) s jistým zpožděním. Přenos energie probíhá sice velkou, ale přece jen

konečnou rychlostí.

Vycházejme z poznatků Anglického fyzik J. C. Maxwella (1831 - 1879). Ten dospěl k závěru, že rychlost šíření elektromagnetického vlnění v homogenním prostředí je dána vztahem

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

kde ϵ – permitivita prostředí $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} [\text{F} \cdot \text{m}^{-1}]$

μ – permeabilita prostředí $\mu = \mu_0\mu_r$ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{H} \cdot \text{m}^{-1}]$

Z toho plyne jednoduchá úvaha, že rychlost elektromagnetického vlnění ve vakuu je

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$$

Po dosazení $c = 299\,863\,380 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, tedy rychlost světla. Můžeme tedy říci, že ve volném prostoru se rychlost šíření elektromagnetických vln rovná rychlosti světla, a že světlo je druhem elektromagnetického vlnění.

Při vysokých frekvencích zdroje napětí bude u dvou vodičového vedení napětí mezi vodiči záviset na čase a na vzdálenosti od zdroje. Pro okamžité napětí zdroje platí, že

$$u = U_m \sin \omega t.$$

V bodě M , který je od zdroje vzdálen x , bude okamžité napětí zpožděno o dobu

$$\tau = \frac{x}{c}.$$

Vzdálenost, do které dospěje vlnění za dobu jedné periody T a kde f je frekvence kmitání oscilátoru, nazýváme *vlnová délka* λ . (lambda).

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \text{ [m; m s}^{-1}, \text{ s; m s}^{-1}, \text{ Hz]}$$

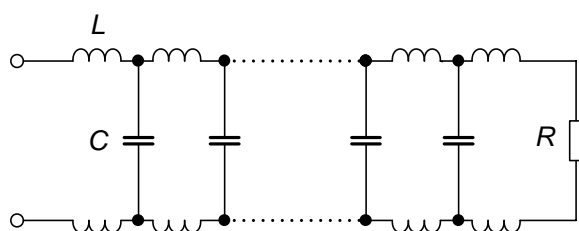
Pro napětí mezi vodiči v bodě M tedy dostáváme:

$$u = U_m \sin \omega(t - \tau) = U_m \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{c} \right) = U_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

Obdobnou rovnicí je popsáno i mechanické vlnění v obecné fyzice. Rovnice

$$u = U_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

je rovnicí postupného elektromagnetického vlnění.



Obr. 8.07 Dvou vodičové vedení

Tak, jak je naznačeno na obrázku, lze dvou vodičové vedení považovat za řadu vzájemně spojených obvodů LC . Jednotlivé části vodiče představují indukčnost, jejich vzájemná vzdálenost a prostředí mezi nimi pak kapacitu. Protože jsou oba tyto parametry, tedy indukčnost a kapacita, rovnoměrně rozloženy podél celého

vedení, hovoříme o jednorozměrné soustavě s rozestřeny parametry.

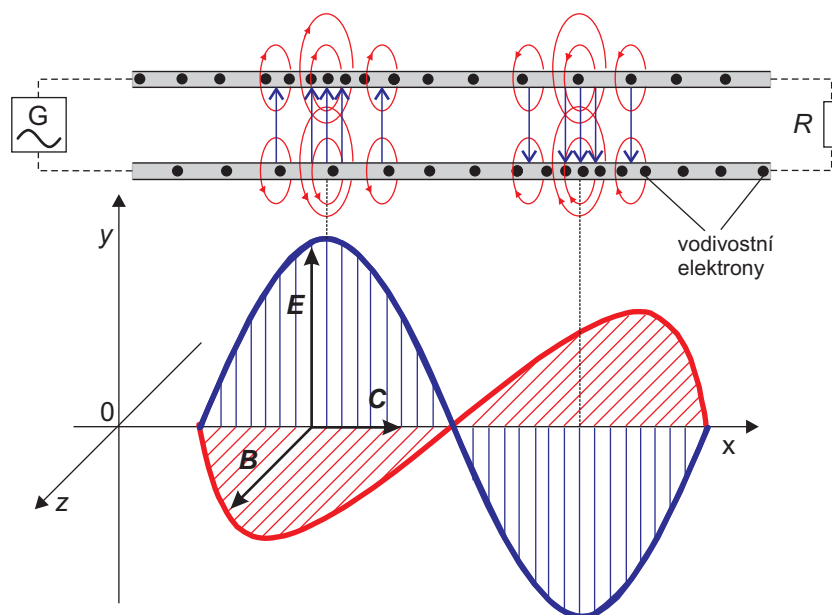
Při nízkých frekvencích, tedy např. při 50 Hz, je mezi vodiči celého vedení všude stejné napětí. To vysvětlujeme velkou rychlostí šíření elektromagnetického vlnění. Vlnová délka je tedy totiž $\lambda = \frac{c}{f} = 6 \cdot 10^6 \text{ m} = 6000 \text{ km}$. Rozměry celého obvodu je tedy možné vzhledem k vlnové délce zanedbat a děje ve vedení mají ráz kmitání.

K tomu dojde vždy, když v rovnici postupné vlny $t/T \gg x/\lambda$. Za těchto podmínek přechází rovnice ve vztah pro kmitání $u = U_m \sin \omega t$ a vlnový ráz uvažovaného děje se neprojevuje. vlnění tedy chápeme jako děj v soustavách, které mají rozměry odpovídající, či větší, než je vlnová délka elektromagnetického vlnění.

8.5 Elektromagnetická vlna

Již bylo naznačeno, že díky vysokým rychlostem elektromagnetického vlnění, budou mít děje ve vedení vlnový charakter pouze při vysokých frekvencích, tedy je-li splněna podmínka, že délka elektromagnetické vlny je srovnatelná s délkou vedení.

V modelovém případě bude k vedení připojen vysokofrekvenční zdroj napětí a přijímač s rezistancí R . Vedením prochází vysokofrekvenční proud i a mezi vodiči je napětí u (obr.



Obr. 8.08 Elektromagnetická vlna ve vedení

8.08) Velikost napětí a proudu však není ve všech částech obvodu stejná, ale periodicky se mění.

Zdrojem elektromagnetického vlnění jsou nerovnoměrně se pohybující elektricky nabitě částice – elektrony. Mezi vodiči se tedy vytváří pole elektrické a pohyb elektronů, tedy z makroskopického hlediska elektrický proud, vytváří kolem vodičů pole magnetické. Tato dvě pole se vzájemně podmiňují a jsou nedělitelná – vytváří **elektromagnetické pole**.

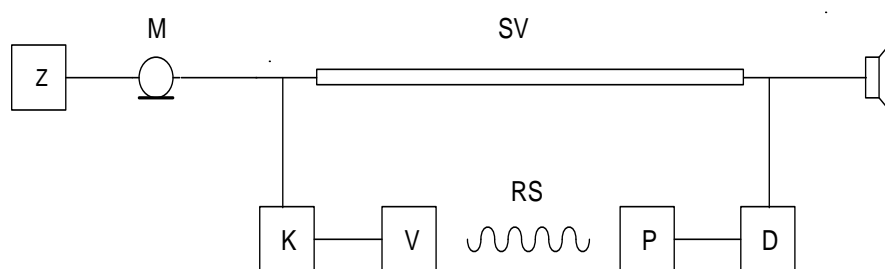
Elektromagnetické pole je charakterizováno intenzitou elektrického pole E a elektromagnetickou indukcí B . Obě tyto veličiny mají vektorový charakter a jsou ve fázi. Oba vektory jsou navzájem kolmé a zároveň jsou kolmé k směru přenosu elektromagnetického vlnění. **Energie není přenášena vodiči, ale elektromagnetickým polem mezi nimi.**

8.6 Přenos informací elektromagnetickým vlněním

Moderní společnost klade vysoké nároky na přenos informací. Je nutno přenášet obraz, mluvené slovo, počítačová data, údaje měřících přístrojů, senzorů atd. Touto problematikou se zabývá samostatný technický obor - sdělovací technika. Přenos informací se uskutečňuje mnoha způsoby, pomocí zařízení používaných ve sdělovacích soustavách rozhlasového a televizního vysílání.

8.6.1 Sdělovací soustava

K základnímu přenosu informací slouží sdělovací soustava. Jako informaci obecně chápeme zprávu, což je taková skutečnost, kterou je potřeba sdělit z jednoho místa na druhé, bez ohledu na vzdálenost, formu zprávy či použitý sdělovací prostředek.



Obr. 8.09 Přenos informace

Složení sdělovací soustavy:

1. *Zdroj zprávy Z.*
2. *Mikrofon M* - v případě, že se jedná o akustický (zvukový) signál. V mikrofonu se kmitání mechanické mění na elektrický signál.
3. *Sdělovací vedení SV*, které je tvořeno kabelem či telefonní sítí, jimiž probíhá vlastní přenos.
4. *Radiokomunikační soustava RS* - bezdrátový přenos pomocí elektromagnetického vlnění, které se může šířit volným prostorem a které se dále dělí na:
 - a) *kódování K* - převod daného elektrického signálu na signál vhodnější k přenosu (v současnosti se používá modulace zprávy),

b) *vysílač* V - vysílá kódované elektromagnetické vlnění, c) *přijímač* P - přijímá vyslané elektromagnetické vlnění,

d) *demodulace* D - signál je přeměněn na původní zprávu v podobě elektrického signálu

5. *Reproduktor* R - elektrický signál (elektrické kmity) mění ve zvukové vlnění (mechanické kmity)

Cvičení

1. Uvažujme oscilační obvod s ideální cívkou a ideálním kondenzátorem. Jakou energii bude mít kondenzátor tohoto obvodu v okamžiku, kdy proud v cívce dosahuje a) maximální hodnoty; b) nulové hodnoty.
2. Vznikají v obvodu s rezistorem a kondenzátorem elektromagnetické kmity? Vysvětlete.
3. Co je to kmitání tlumené a jak vzniká?
4. Vysvětlete pojem „nucené kmitání“.
5. Cívka s indukčností 100 nH a kondenzátor s kapacitou měnitelnou v rozmezí od 50 pF do 500 pF jsou zapojeny v oscilačním obvodu. Určete frekvenční interval, ve kterém lze obvod naladit.
($f_1 = 7,11 \cdot 10^7$ Hz, $f_2 = 2,25 \cdot 10^7$ Hz)
6. Vysvětlete princip rezonance v obvodu střídavého proudu.
7. Nakreslete a popište schéma paralelního a sériového rezonančního obvodu.
8. K čemu slouží Thomsonův vzorec? Definujte jej.
9. U sériového rezonančního obvodu tvořeného ideálním rezistorem s odporem 16,5 Ω, ideálním kondenzátorem s kapacitou 125 μF a ideální cívkou o indukčnosti 400 mH připojeného na napětí 220 V, stanovte rezonanční kmitočet, proud při rezonanci, indukční a kapacitní reaktanci při rezonanci a napětí na jednotlivých prvcích obvodu.
($f_0 = 22,50$ Hz; $I_0 = 13,33$ A; $X_L = X_C = 56,56$ Ω; $U_R = 219,99$ V; $U_L = U_C = 754,11$ V)
10. Vysvětlí vznik elektromagnetické vlny.
11. Popiš sdělovací soustavu.

Účinky elektrického proudu na živý organizmus

Podle charakteru lze účinky elektrického proudu na živý organizmus dělit na:

1. Účinky fyziologické – dýchací potíže, zástava dechu, ztráta vědomí, porucha krevního oběhu, křeče, fibrilace, zástava srdeční činnosti, ochrnutí, úrazy způsobené pádem, leknutím, šokem.

2. Účinky chemické – při úrazu stejnosměrným elektrickým proudem dochází k rozkladu krve a buněk.

3. Účinky tepelné – popáleniny všech stupňů, při úrazu vysokým napětím i hloubkové, zasahující velké plochy těla a způsobující až zuhelnatění tkáně.

Podle druhu a velikosti procházejícího proudu:

1. Střídavý proud – 50 Hz

Člověk je schopen vnímat proudy od 0,05 mA.

- Proud**
- 1 až 3 mA – pociťuje člověk jako příjemné brnění
 - 5 až 10 mA – pocit přestává být příjemný
 - 10 mA – končí činitel lidské vůle, člověk ztrácí schopnost se z vlastní vůle uvolnit z obvodu elektrického proudu
 - 15 až 20 mA – svalové křeče, těžké dýchání, dráždění nervové soustavy
 - 30 mA – srdce přestává plnit svou funkci

2. Střídavý vysokofrekvenční proud (200 kHz)

Způsobuje především povrchové a hloubkové popáleniny. Křeče při něm mizí.

3. Stejnosměrný proud – jeho účinky jsou nejméně prozkoumány. Dochází k rozkladu krve a buněk. Hranice účinků stejnosměrného proudu jsou o něco větší než u střídavého.

Účinky elektrického proudu jsou u jednotlivých lidí rozdílné. Obecně jsou nejcitlivější děti, pak ženy, muži. Účinky zvyšuje nervozita, alkohol, některé choroby. Při těchto faktorech totiž dochází ke zvýšení potivosti a tím ke snížení celkového odporu pokožky (vlhká pokožka asi 2 k Ω , suchá až 5 k Ω). Dále závisí na tom, kterou částí těla elektrický proud prochází. Průchod z levé do pravé ruky je nejnebezpečnější – elektrický proud prochází přímo srdcem.

První pomoc při úrazu elektrickým proudem

Postup:

1. Vyproštění postiženého
2. Oživovací pokusy
3. Lékařské ošetření
4. Hlášení úrazu

ad. 1. Při nejčastějším úrazu, tedy úrazu střídavým proudem dochází ke svalové křeči, která postiženému znemožňuje, aby se sám vyprostil z obvodu. Je nutno tak co nejrychleji učinit, a to:

- a) vypnutím proudu
- b) odsunutím vodiče (nevodivým suchým předmětem)
- c) odtažením postiženého (pozor na zasažení elektrickým proudem zachránce)
- d) přerušením vodiče

Volíme vždy nejrychlejší možnost. Postiženého je třeba zabezpečit proti případnému pádu.

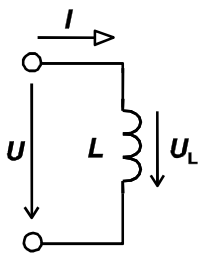
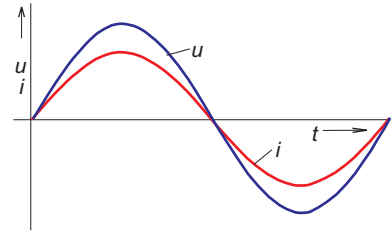
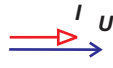
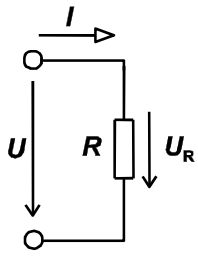
Pozor: Při zasažení vn, vvn hrozí při přibližování se k postiženému tzv. „krokové napětí“. Potenciálový spád běžné zeminy je asi 1 000 V na metr. Při průměrné délce kroku 75 cm je napětí mezi nohama 750 V! Musíme buď nejprve odpojit obvod, nebo se k postiženému přibližovat malými kroky, nejlépe posunováním nohou.

ad 2. Nejprve zjistit, zda postižený dýchá, bije-li mu srdce, je-li při vědomí. Potom zjistit další poranění – krvácení, zlomeniny, popáleniny. Nedýchá-li, zavést umělé dýchání. Nebije-li mu srdce, zahájit nepřímou srdeční masáž. Není-li při vědomí, musí být trvale pod dohledem až do nabytí vědomí.

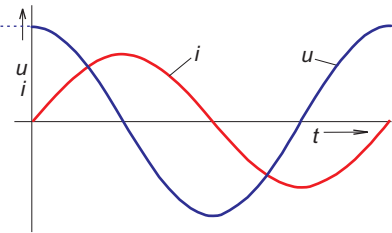
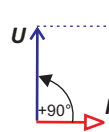
ad 3. Jsou dvě možnosti: a) přivolání lékaře, b) doprava postiženého k lékaři. Volí se ta možnost, která je nejrychlejší. Postiženému věnovat stálou pozornost. I několik hodin po úrazu elektrickým proudem (zvláště vn) hrozí nebezpečí poúrazového šoku, selhání srdce či ledvin.

ad 4. Každý úraz elektrickým proudem je třeba hlásit a zaregistrovat. Tyto úrazy mohou mít skryté nebo opožděné následky a pak se jejich původ obtížně zjišťuje a prokazuje.

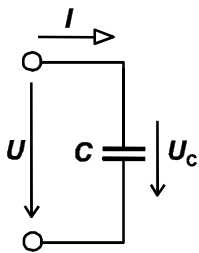
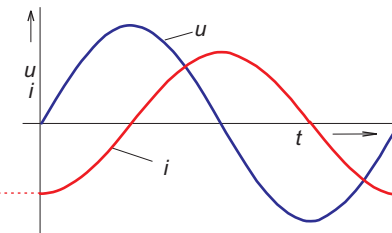
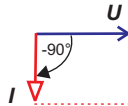
Přehled obvodů RLC



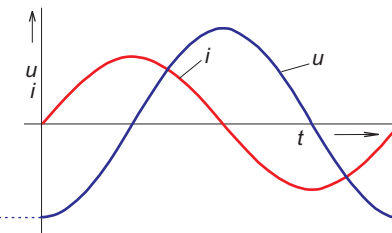
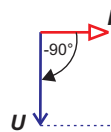
$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$



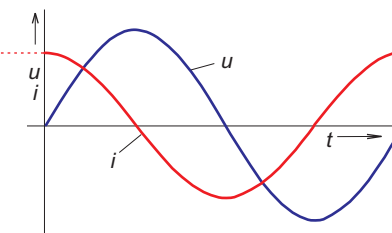
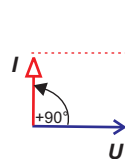
Je-li řídicím fázorem U

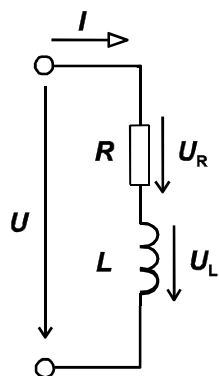


$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

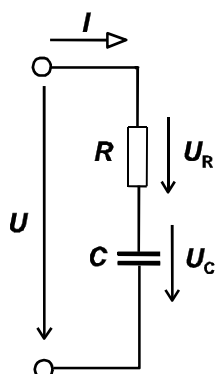
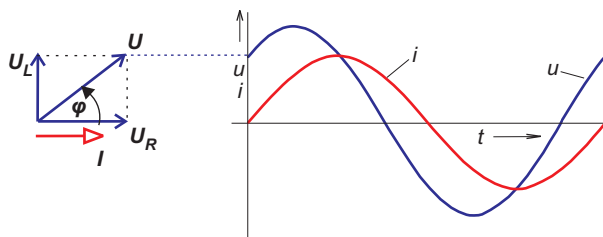


Je-li řídicím fázorem U

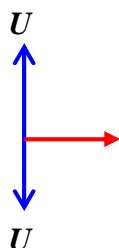
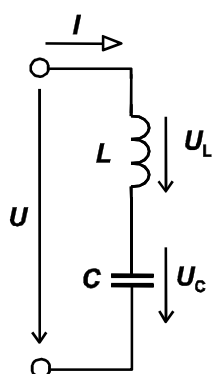
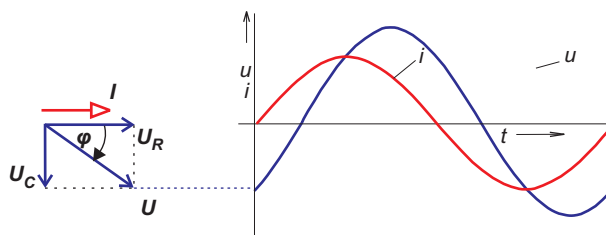




$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$



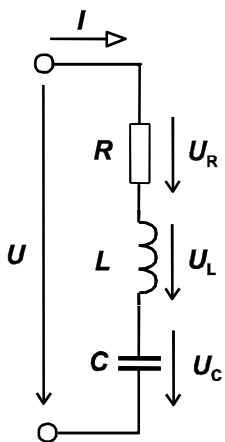
$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$



Fázory U_L a U_C působí proti sobě. Výsledné U je tedy jejich algebraickým rozdílem. Mohou nastat tři případy:

- 1) $U_L > U_C$ – induktivní charakter obvodu
- 2) $U_L < U_C$ – kapacitní charakter obvodu
- 3) $U_L = U_C$ – sériová rezonance

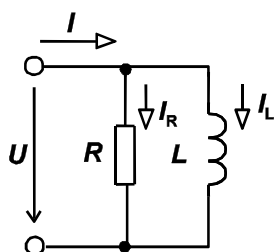
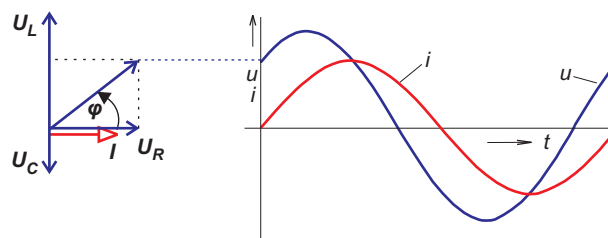
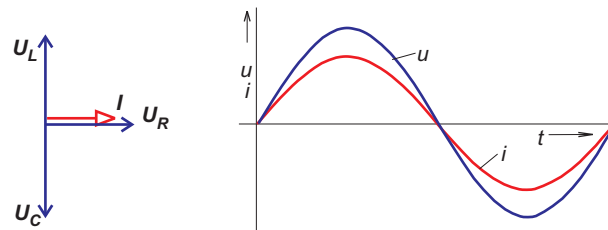
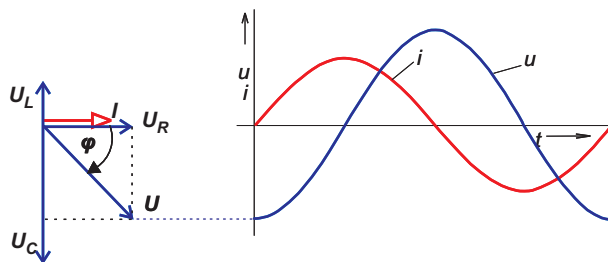
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$



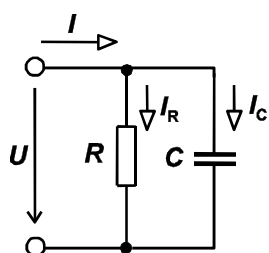
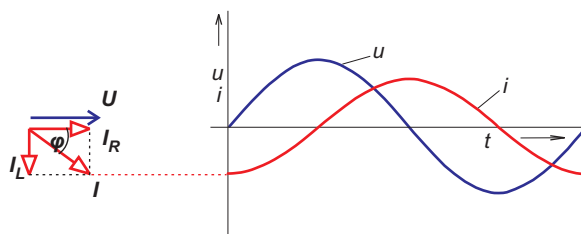
$$Z = R$$

Sériová rezonance

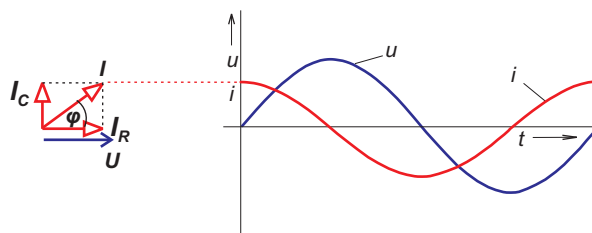
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

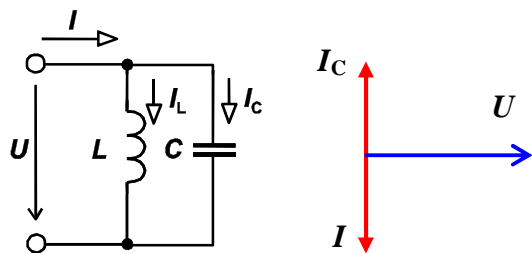


$$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2}$$



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

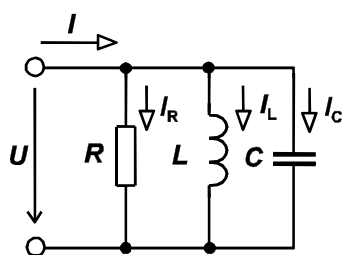
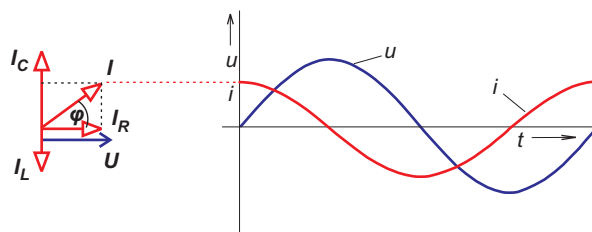




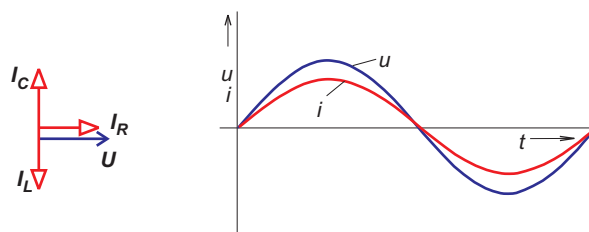
Fázory I_C a I_L působí proti sobě. Výsledný fázor I je jejich algebraickým součtem. Mohou nastat tři případy:

1. $I_L > I_C$ – induktivní charakter obvodu
2. $I_L < I_C$ – kapacitní charakter obvodu
3. $I_L = I_C$ – paralelní rezonance

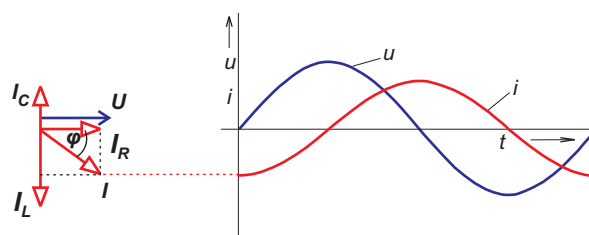
$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$$



$Y = G$
Paralelní
rezonance



$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$$



Vlastnosti materiálů

Materiál	Rezistivita ρ $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	Konduktivita γ $\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$	Teplotní součinitel odporu $\alpha[\text{K}^{-1}]$ pro 0 + 100°C
hliník	0,028 5	35,2	0,004
měď	0,017 8	56,2	0,004 2
nikl	0,1	10	0,004 3
platina	0,1	10	0,003 7
rtuť	0,958	1,04	0,000 9
stříbro	0,016 3	61,5	0,004
wolfram	0,055	18,2	0,004 1
zinek	0,062	16,2	0,004
zlato	0,023	43,5	0,003 7
železo	0,1	10	0,005 5
konstantan	0,5	2	$2 \cdot 10^{-6}$
nikelin	0,4	2,5	$1,1 \cdot 10^{-4}$

Permitivita některých materiálů

Materiál	Relativní permitivita ϵ_r	Elektrická pevnost $E_p[\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}]$
vzduch	1,000 6	2 ÷ 3
minerální olej	2,2 ÷ 2,4	20 ÷ 30
parafín	1,9 ÷ 2,2	20 ÷ 30
kondenzátorový papír	2 ÷ 5	30 ÷ 58
kabelový papír	2,5 ÷ 4	7 ÷ 10
polyetylén	2,2 ÷ 2,3	45 ÷ 60
polystyrén	2,5 ÷ 2,9	50 ÷ 80
sklo křemenné	3,5 ÷ 4	20 ÷ 50
slída	6 ÷ 7	40 ÷ 80

Odborné elektrotechnické výrazy

Česko – anglicky

amplituda	amplitude
anténa	antenna
atmosférický tlak	atmospheric pressure
baterie	battery
biomasa	biomass
budič	exciter
buzení	excitation
cívka	coil
činitel	factor
dělič napětí	voltage divider
dioda	diode
dotyk	contact
drát	wire
elektrárna	power station (power plant)
elektrická energie	electric power
elektrický náboj	electric charge
elektrický pohon	electric drive
elektrické pole	electric field
elektrická síť	electric network
elektrický zdroj	electric power supply
elektromagnetická indukce	electromagnetic induction
elektromagnetická vlna	electromagnetic wave
elektromagnetismus	electromagnetism
elektromotor	electric motor
elektrina	electricity
energetická špička	energetic maximum consumption
fáze	phase
fosilní palivo	fossil fuel
fotoelektrický článek	photoelectric cell
fotoelektrický jev	photoelectric effect
frekvence	frequency
generátor/dynamo	generator
geotermální elektrárna	geothermal power plant
hodnota	value
chladicí věž	cooling tower
chod (stroje)	duty
chod nakrátko	short-circuit operation
chod naprázdno	no-load operation
impedance	impedance
impuls	impulse
indukčnost	inductance
integrováný obvod	integrated circuit
jaderná elektrárna	nuclear power plant
jaderný odpad	nuclear waste
jaderný reaktor	nuclear reactor

jev	effect
jiskra	spark
jistič	circuit breaker
kabel silový	power cable
kapacita	capacitance
kmitočet	frequency
kolektor	collector
kondenzátor	capacitor
konektor	connector
kontrolér	controller
kostra	frame
kotva	armature
kryt	cover
magnet	magnet
magnetické pole	magnetic field
magnetismus	magnetism
měnič	converter
měnit	convert
měření	measurement
nadproud	overcurrent
napětí	voltage
napětí fázové	phase voltage
napětí jmenovité	rated voltage
nevýbušný(motor)	explosion-proof
oblouk (elektrický)	arc
obnovitelné zdroje energie	enewable energy sources
obvod	circuit
odpínač (elektrický)	switch isolator
odpojovač (elektrický)	isolating switch
odpor	resistor
odporník	resistor (rheostat)
ochrana	protection
oscilátor	oscillator
osvětlení	lighting
osvětlování	illumination
otáčky	rotation
oteplení	temperature rise
paměť	memory
pára	steam
paralelní řazení	parallel configuration
pohon	drive
pojistka	fuse
polovodič	semiconductor
primární okruh	primary circuit
proud budící	field current
proud elektrický	electric current
proud jmenovitý	rated current
proud stejnosměrný	direct current
proud střídavý	alternating current
proud zemní	earth current

proud zkratový	short-circuit current
přečerpávací vodní elektrárna	pumped storage hydro plant
přenašeč	transmitter
přepětí	overvoltage
přepět'ová ochrana	surge guard
přepínač	change-over switch
přeskok	flashover
přetížení	overload
převod	transmission ratio
převodník	converter
příkon	input power
přílivová vodní elektrárna	tidal hydroelectric station
přístroj	apparatus
přívod (proudu)	current supply
reaktance	effective reactance
regulace	control
relé	relay
rezistor	resistor
rozběh (stroje)	starting
rozdávěč (elektrický)	switchboard
rozvodna	switching station
řízení (otáček)	speed control
sběrač	current collector
sekundární okruh	secondary circuit
sériové řazení	serial configuration
schéma zapojení	circuit diagram
sinusovka	sine wave
skleníkový efekt	greenhouse effect
sopečná aktivita	volcanic activity
soustrojí	set
spalovací motor	combustion engine
spalovat	burn
spínač	switch
spojování	connection
spotřeba	consumption
spotřeba energie	energy consumption
spotřebič (elektrický)	current consumer
spouštěč	starter
strojovna	machine room
styk (elektrický)	contact
stykač	contactor
svorka	terminal
škodlivé emise	pollutant emission
tepelná elektrárna	thermal power station
těžba uhlí	coal mining
tlačítko	button
tlumivka	inductor
transformovna	transformer substation
trolejové vedení	trolley line
turbína	turbine

účinník	power factor
účinnost	efficiency
uhelná elektrárna	coal-fired power station
usměrňovač	rectifier
úspora energie	energy saving
uzemnění	earthing
vedení	transmission line
větrná elektrárna	wind power station
vinutí	winding
vodič	conductor
vodní elektrárna	hydropower plant
vstup	input
výkon	power
výkon činný	active power
výkon jalový	reactive power
výkon jmenovitý	rated power
výkon zdánlivý	apparent power
vypínač	switch
zařízení elektrické	electrical equipment
zatížení jmenovité	normal load
závit	turn
zdroj	source
zem	earth
zemní spojení	earth fault
zemnič	earth electrode
zemské jádro	Earth's core
zesílit	amplify
zesilovač	amplifier
zkrat	short circuit
zpoždění	lag
ztráty	losses
žárovka	bulb

připojení a odpojení vedení
connecting and disconnecting cables

úplné odpojení od síťového napětí
completely disconnect the mains voltage

návod na obsluhu zařízení
manuals for the device.

Dodržujte bezpečnostní pokyny.
also refer to the safety notes

Přístroj musí být opatřen bezpečným síťovým připojením.
A safety-tested power supply cables is required for this device.

Nemanipulujte v blízkosti s otevřeným plamenem.
Keep the device away from naked flames.

Nepracujte se zařízením ve vlhkém prostředí.
Do not use the device in a damp environment.

Nepoužívejte poškozené vedení.
Do not use damaged cables.

Nedotýkejte se kontaktů.
Do not touch the contacts .

Vypněte přístroj.
Switch off the device immediately.

Toto zařízení odpovídá příslušným bezpečnostním předpisům.
Device complies with the relevant safety regulations.

Česko – německy

amplituda	die Amplitude
anténa	die Antenne
atmosférický tlak	der Luftdruck
baterie	die Barerie
biomasa	die Biomasse
budič	der Erreger
buzení	die Erregung
cívka	die Spule, der Solenoid
činitel	der Faktor
dělič napětí	der Spannungsteiler
dioda	die Diode
dotyk	die Berührung
drát	der Drath
elektrárna	das Kraftwerk
elektrická energie	elektrische Energie
elektrický náboj	elektrische Ladung
elektrický pohon	der Elektroantrieb
elektrické pole	elektrisches Feld
elektrická síť	das Stromleitungsnetz
elektrický zdroj	die Stromquelle
elektromagnetická indukce	elektromagnetische Induktion
elektromagnetická vlna	elektromagnetische Welle
elektromotor	der Elektromotor
elektrina	die Elektrizität
energetická špička	die Energiespitze
fáze	die Phase
fosilní palivo	fossiler Brennstoff
fotoelektrický jev	fotoelektrischer Effekt
frekvence	die Frequenz
generátor/dynamo	der Generator
geotermální elektrárna	das Geothermiekraftwerk
hodnota	der Wert

chladicí věž	der Kühlturm
chod (stroje)	die Betriebsart
chod naprázdno	der Leerlauf
chod nakrátko	der Kurzschlussbetrieb
impedance	der Schutzschalter
impuls	der Impuls
indukčnost	die Induktivität
integrovaný obvod	integrierter Schaltkreis
jaderná elektrárna	das Atomkraftwerk
jaderný odpad	der Atomabfall
jaderný reaktor	der Atomreaktor, der Kernreaktor
jev	der Effekt
jiskra	das Funken
jistič	der Schutzschalter
kabel silový	das Starkstromkabel
kapacita	die Kapazität
kmitočet	die Frequenz
kondenzátor	der Kondensátor
konektor	der Konnektor
kontrolér	der Fahrshalter
kostra (stroje)	das Gerüst
kotva (stroje)	der Anker
kryt (stroje)	die Abdeckung
magnet	der Magnet
magnetické pole	magnetisches Feld
magnetismus	der Magnetismus
měnič (silnoprúdý)	der Umformer
měření	die Messung
nadproud	der Überstrom
napětí	die Spannung
napětí fázové	die Phasenspannung
napětí jmenovité	die Nennspannung
nevýbušný (motor)	explosionssicher
oblouk (elektrický)	der Bogen
obnovitelné zdroje energie	erneubare Energiequelle
obvod (elektrický)	der Kreis
odpínač (elektrický)	der Abtrenner
odpojovač(elektrický)	der Trennerschalter
odpor	der Widerstand
odporník	der Widerstandkörper
ochrana	der Schutz
oscilátor	der Oszillator, der Schwinger
osvětlení	die Beleuchtungsstärke
osvětlování	die Beleuchtung
otáčky	die Drehzahl
oteplení	die Übertemperatur
paměť pocitace	der Speicher
pára	der Dampf
paralelní řazení	die Parallelschaltung
pohon	der Antrieb

pojistka (el.)	die Sicherung
polovodič	der Halbleiter
primární okruh	der Primärkreis
proud budící	der Erregerstrom
proud elektrický	der elektrische Strom
proud jmenovitý	der Nennstrom
proud stejnosměrný	der Gleichstrom
proud střídavý	der Wechselstrom
proud zemní	der Erdstrom
proud zkratový	der Kurzschlussstrom
přepětí	die Überspannung
přepínač	der Umschalter
přeskok	der Überschlag
přetížení	die Überlast
převod	die Übersetzung
převodník	der A/D Wandler
příkon	die zugeführte Leistung
přístroj	der Apparat
	das Gerät
přívod (proudu)	die Zuleitung
reaktance	der Blindwiderstand
regulace	die Regulation
relé	das Relais
rezistor	der Resistor
rozběh (stroje)	der Anlauf
rozdávěč (elektrický)	die Schalttafel
rozvodna	die Schaltanlage
řízení (otáček)	die Regelung
sběrač (proudu)	der Stromabnehmer
sériové řazení	die Serienschaltung
schéma zapojení	der Schaltplan
sinusovka	die Sinuslinie
skleníkový efekt	der Treibhauseffekt
sopečná aktivita	vulkanische Aktivität
soustrojí	das Aggregat
spalovací motor	der Brennstoffmotor
spalovat	verbrennen
spínač	der Schalter
spotřebič	der Verbraucher
spojování	die Schaltung
spotřeba	der Verbrauch
spotřeba energie	der Energieverbrauch
spotřebič (proudu)	der Stromverbraucher
spouštěč	der Anlasser
strojovna	der Maschinenraum
styk (elektrický)	die Berührung
stykač	der Schütz
svorka	die Klemme
emise	die Emission
tepelná elektrárna	das Wärmekraftwerk

těžba uhlí	die Kohlenförderung
tlačítko	der Druckknopf
tlumivka	die Drosselspule
transformovna	das Umspannwerk
trolejové vedení	die Oberleitung
účinník	der Leistungsfaktor
účinnost	der Wirkungsgrad
usměrňovač	der Gleichrichter
úspora energie	die Energieeinsparung
uzemnění	die Erdung
vedení	die Übertragungsleitung
větrná elektrárna	die Windkraftanlage
vinutí	die Wicklung
vodič	der Leiter
vodní elektrárna	das Wasserkraftwerk
vstup	der Einstieg, der Eintritt
výkon	die Leistung
výkon činný	die Wirkleistung
výkon jalový	die Blindleistung
výkon jmenovitý	die Nennleistung
výkon zdánlivý	die Scheinleistung
vypínač	der Ausschalter
zařízení elektrické	die elektrische Einrichtung
zatížení jmenovité	die Nennlast
závit	die Windung
zemní spojení	der Erdchluss
zemnič	die Erdelektrode
zemské jádro	die Siderosphäre
zesílit	verstärkern
zesilovač	der Verstärker
zkrat	der Kurzschluss
zpoždění	die Verzögerung
ztráty	die Verluste
žárovka	die Glühlampe

připojení a odpojení vedení
das Anschließen und Lösen der Leitungen

úplné odpojení od síťového napětí
vollständige Trennung von der Netzspannung

návod na obsluhu zařízení
die Anleitungen des Gerätes

Dodržujte bezpečnostní pokyny.
Beachten Sie die Sicherheitshinweise

Přístroj musí být opatřen bezpečným síťovým připojením.
Für das Gerät ist eine sicherheitsgeprüfte Netzleitung erforderlich

Nemanipulujte v blízkosti s otevřeným plamenem.
Hantieren Sie nicht mit einer offenen Flamme in unmittelbarer Umgebung des Gerätes.

Nepracujte se zařízením ve vlhkém prostředí.
Verwenden Sie das Gerät nicht in einer feuchten Umgebung.

Nepoužívejte poškozené vedení.
Verwenden Sie keine beschädigten Leitungen.

Nedotýkejte se kontaktů.
Berühren Sie nicht die Anschlußkontakte.

Vypněte přístroj.
Schalten Sie das Gerät sofort aus.

Toto zařízení odpovídá příslušným bezpečnostním předpisům.
Das Gerät entspricht den einschlägigen Sicherheitsbestimmungen.

Česko – rusky

amplituda	амплитуда
anténa	антенна
atmosférický tlak	атмосферное давление
baterie	батарея
biomasa	биомасса
budič	кондуктор
buzení (kmitů)	возбуждение колебаний
cívka	катушка
činitel	коэффициент
dělič napětí	делитель напряжения
dioda	диод
dotyk	контакт
drát	проволока
elektrárna	электростанция
elektrická energie	электрическая энергия
elektrický náboj	электрический заряд
elektrický pohon	электрическое движение
elektrické pole	электрическое поле
elektrická síť	электрическая сеть
elektrický zdroj	электрический источник
elektromagnetická indukce	электромагнитная индукция
elektromagnetická vlna	электромагнитная
elektromagnetismus	электромагнетизм
elektromotor	электродвигатель
elektrina	электричество
energetická špička	часы пик
fáze	фаза
fosilní palivo	ископаемое топливо
fotoelektrický článek	фотоэлектрический элемент

fotoelektrický jev	фотоэлектрический эффект
frekvence	частота
generátor/dynamo	генератор
geotermální elektrárna	геотермальная электростанция
hodnota	значение
chladicí věž	градирня
chod (stroje)	режим работы
chod nakrátko	холостой ход
chod naprázdno	ход с коротким замыканием
impedance	полное сопротивление
impuls	импульс
indukčnost	индуктивность
integrováný obvod	интегральная схема
jaderná elektrárna	атомная электростанция
jaderný odpad	ядерный лом
jaderný reaktor	ядерный реактор
jev	явление, эффект
jiskra	искра
jistič	защитный выключатель, предохранитель
kabel silový	силовой кабель
kapacita	емкость
kmitočet	частота
kolektor	коллектор
kondenzátor	конденсатор
konektor	штекер
kontrolér	контроллер
kostra (stroje)	каркас
kotva (stroje)	якорь; анкер
kryt	кожух
magnet	магнит
magnetické pole	магнитное поле
magnetismus	магнетизм
měníč	преобразователь
měnit	изменять
měření	измерение
nadproud	сверхток
napětí	напряжение
napětí fázové	фазное напряжение
napětí jmenovité	номинальное напряжение
nevýbušný (motor)	взрывобезопасный
oblouk (elektrický)	электрическая дуга
obnovitelné zdroje energie	обновляющиеся источники энергии
obvod	цель
odpínač (elektrický)	силовой выключатель
odpojovač (elektrický)	разъединитель
odpor	сопротивление
odporník	реостат
ochrana	защита
oscilátor	осцилятор
osvětlení	освещение

osvětlování	освещение	
otáčky	обороты	
oteplení	повышение температуры	
paměť počítače	запоминающее устройство	
pára	пар	
paralelní řazení	паралельное включение	
pohon	привод	
pojistka	предохранитель	
polovodič	полупроводник	
primární okruh	первый контур	
proud budící	возбуждающий ток	
proud elektrický	электрический ток	
proud jmenovitý	номинальный ток	
proud stejnosměrný	постоянный ток	
proud střídavý	переменный ток	
proud zemní	ток замыкания на землю	
proud zkratový	ток короткого замыкания	
přenašeč	переносчик	
přepětí	перенапряжение	
přepěťová ochrana	защита от перенапряжения	
přepínač	переключатель	
přeskok	перекрытие	
přetížení	перегрузка	
převod	передача	
převodník	преобразователь	
příkon	потребляемая мощность	
přístroj	прибор	
přívod (proudu)	подвод тока	
reaktance	реактивное сопротивление	
regulace	регулировка	
relé	реле	
rezistor	резистор	
rozběh (stroje)	разгон	
rozdávěč (elektrický)	разпределительный щит	
rozvodna	разпределительное устройство	
řízení (otáček)	управление	
sběrač	токоприемник	
sekundární okruh	секундарный контур	
sériové řazení	последовательное соединение	
schéma zapojení	схема	включения
sinusovka	синусоида	
skleníkový efekt	парниковый эффект	
sopečná aktivita	вулканическая активность	
soustrojí	агрегат	
spalovací motor	сжигательный двигатель	
spalovat	сжигать	
spínač	включатель	
spojování	соединение	
spotřeba	потребление	
spotřeba energie	затрата энергии	

spotřebič(elektrický)	прибор
spouštěč	пускатель
strojovna	машинное помещение
styk (elektrický)	контакт
stykač	контактор
svorka	зажим
škodlivé emise	эмиссии
tepelná elektrárna	тепловая электростанция
těžba uhlí	добыча угля
tlačítko	кнопка
tlumivka	дроссельная катушка
transformovna	трансформаторная подстанция
trolejové vedení	контактная сеть
účinič	коэффициент мощности
účinnost	коэффициент эффективности
usměřovač	выпрямитель
úspora energie	энергосбережение
uzemnění	заземление
vedení	проводка
větrná elektrárna	ветряная электростанция
vinutí	обмотка
vodič	провод
vodní elektrárna	гидроэлектростанция
vstup	ввод
výkon	мощность
výkon činný	активная мощность
výkon jalový	реактивная мощность
výkon jmenovitý	номинальная мощность
výkon zdánlivý	кажущаяся мощность
vypínač	выключатель
zařízení elektrické	электрическое оборудование
zatížení jmenovité	номинальная нагрузка
závit	виток
zdroj	источник
zem	земля
zemní spojení	заземление
zemnič	заземлитель
zemské jádro	ядро Земли
zesílit	усилиться
zesilovač	усилитель
zkrat	короткое замыкание
zpoždění	отставание
ztráty	потери
žárovka	электрическая лампа

připojení a odpojení vedení
подключение и отсоединение кабелей

úplné odpojení od síťového napětí
полное отключение от сетевого напряжения

návod na obsluhu zařízení
инструкции по эксплуатации устройства

Dodržujte bezpečnostní pokyny.
Необходимо соблюдать указания по технике безопасности.

Přístroj musí být opatřen bezpečným síťovým připojením.
Для питания устройства требуется проверенный сетевой кабель.

Nemanipulujte v blízkosti s otevřeným plamenem.
Не пользуйтесь устройством в близости от открытого пламени.

Nepracujte se zařízením ve vlhkém prostředí.
Не пользуйтесь прибором во влажной среде.

Nepoužívejte poškozené vedení.
Не используйте поврежденные проводки.

Nedotýkejte se kontaktů.
Не прикасайтесь к контактам.

Vypněte hned přístroj.
Выключите незамедлительно устройство.

Toto zařízení odpovídá příslušným bezpečnostním předpisům.
Это устройство соответствует положениям по технике безопасности.

Použitá literatura

- [1] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika I.* 3. vydání. Praha : Informatorium, 1999. 191 s. ISBN 80-860-73-49-1.
- [2] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika II.* 2. vydání. Praha : Informatorium, 1997. 153 s. ISBN 80-860-73-19-X.
- [3] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika III.* 3. vydání. Praha : Informatorium, 1999. 291 s. ISBN 80-860-73-50-5.
- [4] OPAVA, Zdeněk. *Elektrina kolem nás.* 2. opravené a doplněné vydání. Praha : Albatros, 1985. 334 s. ISBN 13-724-85.
- [5] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie.* 1. vydání. Praha : BEN, 1999. 183 s. ISBN 80-86056-75-9
- [6] POLÁČEK, Dušan a kol. *Elektrotechnické tabulky.* 1. vydání. Ostrava : Montanex, 1996. 392 s. ISBN 80-85780-48-8.
- [7] VALEŠ, František. *Základy elektrotechniky.* Trhové Sviny : František Valeš, 1993. 65 s.
- [8] VOŽENÍLEK, Ladislav; ŘEŠÁTKO, Miloš. *Základy elektrotechniky I.* 1. vydání. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. 301 s. ISBN 04-508-84.
- [9] HELUZIN, Hubert; DVOŘÁČEK, Jaroslav; HREBÍK, Andrej. *Elektrotechnická praxe v příkladech.* 1. vydání. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986. 490 s. ISBN 04-534-86.
- [10] NAHODIL, Josef. *Fyzika v běžném životě.* 1. vydání. Praha : Prometheus, 1996. 149 s. ISBN 80-7196-005-5.
- [11] TKOTZ, Klaus a kol. *Příručka pro elektrotechnika.* Praha : Europa - Sobotáles cz s r.o., 2002. 561 s. ISBN 80-86706-00-1.
- [12] PORŠ, Z. Co je to palivový článěk?. *Třetí pól.* 2003, 3, s. 23-24.
- [13] LEPIL, Oldřich ; ŠEDIVÝ, Přemysl. *Fyzika pro gymnázia : Elektrina a magnetismus.* 5. přepracované vydání. Praha : PROMETHEUS, 2000. 342 s. ISBN 80-7196-202-3.
- [14] DANIHELKA, Petr. *Základy elektrotechniky.* 1. vydání. České Budějovice : ROČNÍ OBDOBÍ, 2004.
- [15] ČSN ISO 31-5 (01 1300)