



Vzdelávacia Akadémia Jána Amosa Komenského

V.A.J.A.K. s.r.o., NÁM. SNP 9, 911 01 TRENČÍN
IČO 36333166 IČ DPH SK2021790012 Č. REG. 14381/R – OKR. SÚD TRENČÍN

Elektrotechnik / Elektrotechnička

akreditovaný vzdelávací program

študijné materiály pre účastníkov

1	ÚVOD DO ELEKTROTECHNIKY	6
1.1	Elektrický náboj.....	6
1.2	Coulombov zákon.....	7
1.3	Intenzita a indukcia elektrostatického poľa	9
1.4	Práca elektrostatického poľa.....	12
1.5	Potenciál elektrostatického poľa.....	13
1.6	Elektrické napätie	15
1.7	Kapacita vodiča	17
1.7.1	Kapacita doskového kondenzátora	18
1.7.2	Energia kondenzátora a energia elektrického poľa.....	18
1.7.3	Parametre a typy kondenzátorov	20
1.8	Delenie materiálov z hľadiska ich vodivosti	22
1.9	Elektrický prúd	23
1.10	Elektrický odpor a rezistor	25
1.10.1	Parametre rezistorov	28
1.11	Elektrická práca a výkon	30
1.12	Ohmov zákon.....	31
2	JEDNOSMERNÉ ELEKTRICKÉ OBVODY	34
2.1	Úvod do elektrických obvodov.....	34
2.2	Zdroje v elektrických obvodoch	36
2.3	Spotrebiče v elektrických obvodoch.....	41
2.4	Základné metódy analýzy elektrických obvodov	42
2.4.1	Kirchhoffove zákony	43
2.4.2	Metóda postupného zjednodušovania	44
2.4.2.1	Spájanie kondenzátorov	49
2.4.2.2	Potenciometer	50
2.4.3	Metóda priameho použitia Kirchhoffových zákonov	51
3	MAGNETIZMUS A MAGNETICKÉ OBVODY	56
3.1	Úvod do magnetizmu.....	56
3.2	Permeabilita prostredia	58
3.3	Ampérov zákon celkového prúdu	59
3.4	Cievka.....	62
3.4.1	Indukčnosť cievky.....	63

3.5	Zákon elektromagnetickej indukcie.....	64
3.6	Magnetické obvody	65
3.6.1	Základné zákony pre analýzu magnetických obvodov	67
3.6.2	Analýza magnetických obvodov	68
4	STRIEDAVÉ OBVODY	74
4.1	Úvod do striedavých veličín a obvodov	74
4.2	Efektívna a stredná hodnota	77
4.3	Symbolicko-komplexná metóda	78
4.4	Grafické zobrazenie komplexorov a fázorov.....	80
4.5	Popis elektrických obvodov pomocou komplexných čísel.....	82
4.6	Základné zákony pre analýzu striedavých obvodov	85
4.7	Výkony v striedavých obvodoch	89
5	ELEKTRONIKA	94
5.1	Stručný úvod do fyziky polovodičov.....	94
5.1.1	Vlastná vodivosť polovodičov	95
5.1.2	Nevlastná vodivosť polovodičov. Polovodič typu N a typu P	97
5.1.3	PN priedchod	98
5.1.4	PN priedchod po pripojení napätia	100
5.2	Diódy	101
5.2.1	Usmerňovacie a spínacie diódy	102
5.2.2	Charakteristické hodnoty diód	104
5.2.3	Mostíkový usmerňovač	106
5.3	Tranzistory	108
5.3.1	Bipolárne tranzistory.....	109
5.3.2	Charakteristiky bipolárnych tranzistorov.....	111
5.3.3	Charakteristické hodnoty bipolárnych tranzistorov	113
5.3.4	Nastavenie kľudového prac. bodu tranzistora a získavanie napätia na báze	114
5.3.5	Základné zapojenia tranzistorov	116
5.3.6	Zosilňovače	117
5.4	Tyristory	119
5.5	Triaky.....	122
5.5.1	Charakteristické parametre tyristorov a triakov	124

1 ÚVOD DO ELEKTROTECHNIKY

Ciele

Po preštudovaní kapitoly by mal byť študent schopný:

1. Definovať pojem elektrický náboj a charakterizovať jeho základné vlastnosti
2. Definovať a vysvetliť Coulombov zákon.
3. Charakterizovať veličiny popisujúce elektrostatické pole: intenzita a potenciál elektrického poľa.
4. Definovať a vysvetliť elektrické napätie.
5. Vysvetliť kapacitu a uviesť definičný vzťah.
6. Popísať doskový kondenzátor, uviesť jeho funkciu v elektrotechnike a nakresliť jeho symbol
7. Definovať elektrický prúd, elektrický odpor a elektrický výkon.
8. Charakterizovať rezistor, vymenovať základné parametre rezistorov a nakresliť jeho symbol
9. Definovať Ohmov zákon a nakresliť V-A charakteristiku rezistora

1.1 Elektrický náboj

Príčinou elektrického stavu daného telesa je jeho elektrický náboj, jedna zo základných charakteristík mikročastíc. Poznáme dva typy elektrického náboja a to kladný a záporný. Častice s nábojom rovnakého znamienka sa odpudzujú a náboje rôzneho znamienka sa priťahujú. Ak sa v telese nachádza rovnaký počet kladných aj záporných nábojov, hovoríme, že teleso je elektricky neutrálne, výsledný náboj je nulový (napr. atóm). Pokiaľ jeden typ náboja prevyšuje, prejavuje sa ich rozdiel ako voľný náboj a vtedy hovoríme o elektrickom stave telesa. Elektrické náboje vytvárajú okolo seba elektrické pole, ktoré pôsobí na iné náboje elektrickou silou. Ďalší empirický poznatok hovorí, že celkové množstvo elektrického náboja v ľubovoľnom procese sa nemení. Túto skutočnosť vyjadruje tzv. zákon zachovania elektrického náboja.

Základné poznatky o elektrických nábojoch:

1. Elektrický náboj je vždy spojený s časticou s nenulovou hmotnosťou.
2. Elektrický náboj môžeme prenášať z povrchu jedného telesa na povrch iného telesa. Náboj sa môže premiestňovať aj v telese. Látky, v ktorých sa náboj voľne premiestňuje, voláme vodiče. Látky, v ktorých sa žiadny náboj nemôže voľne premiestňovať, voláme dielektriká – nevodiče.
3. Existujú dva typy elektrického náboja: kladný a záporný.
4. Zákon zachovania náboja: v elektricky izolovanej sústave telies je celkový elektrický náboj konštantný, elektrický náboj nemožno vytvoriť ani zničiť, je možné ho len premiestňovať.
5. Elektrický náboj je deliteľný, nemožno ho však deliť neobmedzene, ale len po **elementárny elektrický náboj**: $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$. Nositeľmi náboja sú elementárne častice, napr. elektrón (záporný náboj), protón (kladný náboj). Ak v atóme je rovnaký počet elektrónov (obal) a protónov (jadro), navonok sa tvári ako elektricky neutrálny.

6. Zákon superpozície: pri súčasnom pôsobení bodových nábojov je účinok rovnaký, ako keby pôsobil jeden náboj s nábojom všetkých ostatných nábojov.
7. Zákon invariantnosti: elektrický náboj je vo všetkých sústavách invariantný, t. j. nameraná veľkosť náboja je celkom nezávislá od rýchlosti pohybu častice.

Elektrický náboj ako fyzikálnu veličinu označujeme Q alebo q a jeho jednotkou v sústave jednotiek SI je **1 coulomb (C)**, teda $[Q] = 1C$. Jednotka coulomb je definovaná ako množstvo náboja, ktoré pretečie cez ľubovoľný prierez vodiča za 1 sekundu, ak vodičom tečie konštantný elektrický prúd 1 A.

☞ Všetky nabité makroskopické telesá obsahujú určité množstvo elektrického náboja. Tento náboj je rozložený v objeme (resp. na povrchu telesa) v takom množstve, že dané rozloženie považujeme za spojité. Vzhľadom na tvar a rozmery telesa definujeme objemovú, plošnú a dĺžkovú hustotu elektrického náboja:

- objemová hustota elektrického náboja: $\rho = \frac{dQ}{dV}$ $[\rho] = C.m^{-3}$
- plošná hustota elektrického náboja: $\sigma = \frac{dQ}{dS}$ $[\rho] = C.m^{-2}$
- dĺžková hustota elektrického náboja: $\lambda = \frac{dQ}{dl}$ $[\rho] = C.m^{-1}$

1.2 Coulombov zákon

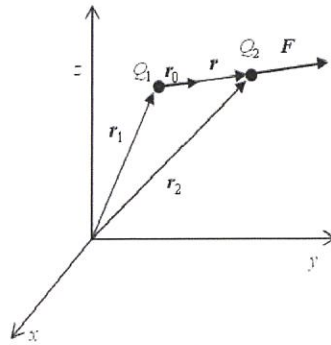
Kvantitatívnou charakteristikou elektrickej interakcie je sila. Veľkosť elektrickej sily, ktorou pôsobia na seba dva bodové náboje, prvýkrát zmeral na torzných váhach v roku 1785 francúzsky fyzik Ch. A. Coulomb¹. Na základe svojich meraní sformuloval zákon popisujúci vzájomné silové pôsobenie medzi nábojmi, ktorý sa podľa neho nazýva **Coulombov zákon**: **Dva bodové náboje v pokoji pôsobia na seba silou, ktorá je priamo úmerná súčinu veľkosti nábojov a nepriamo úmerná druhej mocnine ich vzdialenosti.**

Matematicky môžeme Coulombov zákon formulovať nasledovne:

$$\vec{F}_{21} = k \frac{Q_1 Q_2}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^3} \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \quad (1.1)$$

kde \vec{F}_{21} je sila pôsobiaca na náboj Q_2 pochádzajúca od náboja Q_1 a \vec{r}_2 , \vec{r}_1 sú polohové vektory týchto nábojov. Pritom budeme vždy dodržiavať konvenciu, že prvý index určuje objekt, na ktorý sila pôsobí a druhý index je spojený s pôvodom tejto sily.

¹ Charles Coulomb (1736 – 1806) francúzsky vojenský inžinier a objaviteľ Coulombovho zákona.



Obr. 1.1: Silové pôsobenie medzi dvoma nábojmi

Pre veľkosť sily vzájomného pôsobenia medzi bodovými nábojmi pričom jej smer spadá do smeru spojnice uvažovaných nábojov platí:

$$F_e = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1.2)$$

Rovnica (1.1) rešpektuje vektorový charakter pôsobiacej sily a súčasne aj príťažlivý a odpudivý charakter sily v závislosti od výsledného znamienka súčinu nábojov. V menovateli formálne vystupuje tretia mocnina vzájomnej vzdialenosti nábojov, ale treba si uvedomiť, že výraz $\frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|} = \vec{r}_0$ vyjadruje jednotkový vektor v smere pôsobiacej sily.

Konštanta úmernosti k vo vzťahu (1.1) závisí od použitej sústavy jednotiek. V SI sústave pre k platí: $k = 1/4\pi\epsilon_0$, kde $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-3} \text{ s}^4$. Veličinu ϵ_0 nazývame **permitivitou vákua** (niekedy dielektrická konštanta vákua).

Treba pripomenúť, že pre sily, ktoré vystupujú v Coulombovom zákone platí princíp akcie a reakcie, a teda platí:

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \quad (1.3)$$

☞ Skúmame, aké bude silové pôsobenie na náboj Q v bode \vec{r} od väčšieho počtu bodových nábojov Q_1, Q_2, \dots, Q_n , ktoré sa nachádzajú v bodoch $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n$. Sila pôsobiacia na tento náboj pochádzajúca od náboja q_i je $\vec{F}_i = kQQ_i \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3}$. Experimenty ukazujú, že výslednú silu dostaneme ako vektorový súčet takýchto síl od všetkých pôsobiacich nábojov, teda $\vec{F} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} QQ_i \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3}$. Tento vzťah vyjadruje "**princíp superpozície elektrických síl**".

Príklad 1.1
 Dve rovnako veľké guľôčky majú elektrické náboje $Q_1 = +24 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ a $Q_2 = -18 \cdot 10^{-6} \text{ C}$.

a) Akou veľkou silou sa priťahujú zo vzdialenosti $r = 6\text{cm}$ vo vákuu?

b) Akou silou sa budú z tej istej vzdialenosti odpudzovať, keď sme ich predtým uviedli do vzájomného styku?

a) Podľa Coulombovho zákona môžeme pre veľkosť sily písať: $F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$

Po dosadení dostávame:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} = \frac{24 \cdot 10^{-6} \text{C} \cdot 18 \cdot 10^{-6} \text{C}}{4\pi \cdot 8,859 \cdot 10^{-12} \text{A}^2 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-3} \text{s}^4 \cdot (0,06\text{m})^2} = 1,078 \cdot 10^3 \text{N}$$

b) Keď sa obe guľôčky dotknú, náboje sa vyrovnajú, takže celkový náboj pripadajúci na obidve guľôčky bude: $Q_{1,2} = 24 \cdot 10^{-6} \text{C} - 18 \cdot 10^{-6} \text{C} = 6 \cdot 10^{-6} \text{C}$

Po vzdialení sa oboch guľôčiek sa bude každá z nich vyznačovať rovnakým nábojom, t. j. :

$$Q_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{C}, Q_2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{C}$$

Pre veľkosť sily, ktorou sa budú guľôčky zo vzdialenosti $r = 6\text{cm}$ odpudzovať, platí:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} = \frac{3 \cdot 10^{-6} \text{C} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \text{C}}{4\pi \cdot 8,859 \cdot 10^{-12} \text{A}^2 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-3} \text{s}^4 \cdot (0,06\text{m})^2} = 22,46 \text{N}$$

1.3 Intenzita a indukcia elektrostatického poľa

Na popis silového elektrostatického poľa v okolí náboja, ktorý je v pokoji, je vhodné zaviesť novú veličinu, ktorú budeme nazývať **intenzita elektrostatického poľa** \vec{E} .

Intenzita elektrostatického poľa E náboja Q_1 je určená podielom elektrickej sily F_e , ktorou v danom mieste poľa pôsobí na daný bodový náboj Q_2 a veľkosti tohto náboja:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{Q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{r^3} \vec{r} \quad (1.4)$$

Intenzita elektrického poľa sa číselne rovná sile, ktorá by v danom mieste pôsobila na jednotkový elektrický náboj. Intenzita elektrického poľa je vektorová veličina a vektor intenzity elektrického poľa v danom bode má smer sily, ktorá by v danom mieste pôsobila na kladný elektrický náboj.

Jednotka intenzity elektrického poľa je $[E] = \frac{N}{C} = \frac{\text{Jm}^{-1}}{C} = \text{Vm}^{-1}$ a jej rozmer v sústave SI je $\text{N/C} = \text{kgmA}^{-1}\text{s}^{-3}$. Z praktických dôvodov sa intenzita elektrického poľa vyjadruje v jednotkách $\text{V/m} = \text{Vm}^{-1}$.

Ak poznáme intenzitu elektrického poľa v určitom mieste, tak sila pôsobiaca v tomto mieste na ľubovoľný elektrický náboj Q je $\vec{F} = Q\vec{E}$. Veľkosť a smer sily \vec{F} pôsobiacej na elektrický

náboj Q v elektrickom poli závisí od jeho polohy a teda je funkciou \vec{r} . To znamená, že aj intenzita poľa \vec{E} je funkciou polohy \vec{r} , čiže $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r})$.

☞ Ak je pole vytvárané viacerými bodovými nábojmi Q_i platí:

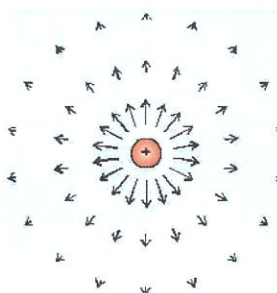
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{Q} = \frac{\sum_i \vec{F}_i}{Q} = \frac{\sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_i Q}{r_i^3} \vec{r}_i}{Q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{Q_i \vec{r}_i}{r_i^3}$$

Rovnica je príkladom princípu superpozície, ktorý v tomto prípade hovorí, že výsledná intenzita elektrostatického poľa v danom mieste je vektorovým súčtom intenzít polí vytvorených jednotlivými nábojmi.

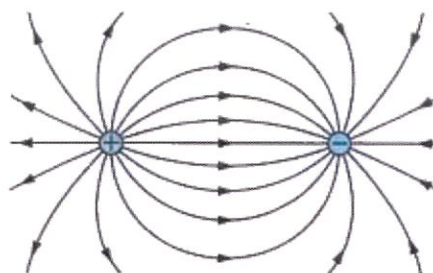
Intenzita poľa je vektorová veličina, ktorej smer a orientácia sú dané vektorom príslušnej sily.

Elektrostatické pole môžeme znázorniť pomocou **elektrických siločiar** (Obr.1.2). Ich vlastností možno zhrnúť takto:

1. Dotyčnica k siločiare v každom bode určuje smer intenzity \vec{E} v tomto bode.
2. Počet siločiar na jednotku prierezu (kolmo k siločiarom) je úmerný veľkosti intenzity \vec{E} . Ak sú teda siločiahy blízko k sebe, pole E je veľké, ak sú siločiahy vzájomne vzdialené, pole E je malé.
3. Siločiahy majú počiatok iba na kladných nábojoch a končia iba na záporných nábojoch.



(a)



(b)

Obr. 1.2: Tvary siločiar elektrostatického poľa

Podľa tvaru rozloženia siločiar rozdeľujeme elektrostatické pole na homogénne a nehomogénne. V homogénnom poli je hodnota intenzity všade konštantná a má rovnaký smer. S homogénnym elektrickým poľom sa stretávame napríklad v rovinnom kondenzátore. Nehomogénne sú všetky polia, pre ktoré neplatí predošlé tvrdenie. Špeciálnym prípadom nehomogénneho poľa je radiálne pole bodového náboja (obr. 1.2 (a)).

Elektrická indukcia vyjadruje podiel náboja Q indukovaného na ploche s elektrickou indukciou, ktorú označíme D :

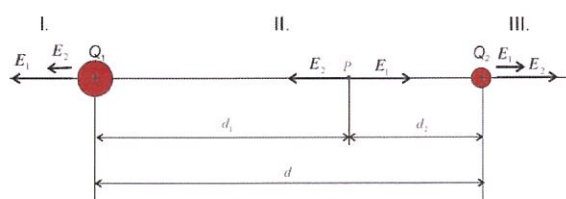
$$D = \frac{Q}{S} = \epsilon \cdot E \quad (1.5)$$

Jednotkou elektrickej indukcie je **coulomb na m²** $[D] = C \cdot m^{-2}$. Elektrická indukcia závisí od polohy vodiča v elektrostatickom poli. Ak je kovová platnička kolmo na smer silového pôsobenia, elektrická indukcia je maximálna. V inej polohe ju určujeme ako priemer vektora $D' = D \cdot \cos \alpha$. Elektrická indukcia je vektorová fyzikálna veličina, ktorá charakterizuje elektrické pole bez započítania vplyvu elektrických nábojov viazaných v prostredí – **dielektriku**, ale iba na základe "vonkajších" zdrojov poľa, teda voľných **elektrických nábojov**. Vzťah (1.5) vyjadruje závislosť dvoch charakteristických veličín – elektrickej indukcie a intenzity elektrického poľa.

Príklad 1.2

Vo vzdialenosti $r = 20\text{cm}$ od seba sú pevne uložené dva kladné elektrické náboje $Q_1 = 9\mu\text{C}$ a $Q_2 = 4\mu\text{C}$. V ktorom mieste na ich spojnici je intenzita elektrického poľa rovná nule?

Výsledná intenzita elektrostatického poľa sa rovná súčtu intenzít, ktorými prispievajú jednotlivé náboje k výslednej intenzite, teda $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Výsledná intenzita sa rovná nule, keď $\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 0$.



Z obrázku je vidieť, že musí teda platiť: $E_1 = E_2$.

Pre intenzity teda platí:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{d_1^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_2}{(d - d_1)^2}$$

Po úprave dostaneme:

$$\frac{\sqrt{Q_1}}{d_1} = \frac{\sqrt{Q_2}}{(d - d_1)} \Rightarrow d_1 = \frac{d\sqrt{Q_1}}{\sqrt{Q_1} + \sqrt{Q_2}} = \frac{0,2\text{m} \cdot \sqrt{9 \cdot 10^{-6}\text{C}}}{\sqrt{9 \cdot 10^{-6}\text{C}} + \sqrt{4 \cdot 10^{-6}\text{C}}} = 0,12\text{m}$$

Príklad 1.3

V Bohrovom modeli atómu vodíka elektrón obieha okolo protónu po kruhových dráhach. Nájdite rýchlosť elektrónu na prvej Bohrovej dráhe, ak jej polomer je $0,52 \cdot 10^{-10}\text{m}$, hmotnosť elektrónu je $9,1 \cdot 10^{-31}\text{kg}$ a náboj elektrónu je $1,602 \cdot 10^{-19}\text{C}$.

Dostredivá sila pri kruhovom pohybe je elektrická príťažlivá sila medzi elektrónom a protónom $F_e = \frac{m_e v^2}{r}$, odkiaľ pre rýchlosť elektrónu platí: $v = \sqrt{\frac{F_e \cdot r}{m_e}}$.

Elektrickú silu určíme z Coulombovho zákona

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{1}{4\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}} \frac{(1,602 \cdot 10^{-19})^2}{(0,52 \cdot 10^{-10})^2} N = 8,530 \cdot 10^{-8} N$$

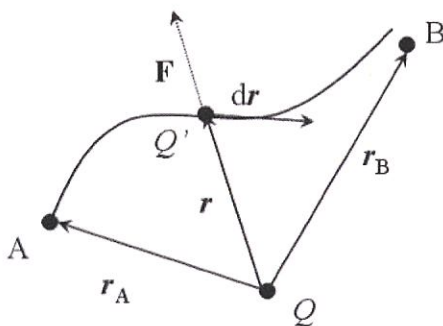
a pre rýchlosť dostávame

$$v = \sqrt{\frac{8,530 \cdot 10^{-8} \cdot 0,52 \cdot 10^{-10}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \text{ms}^{-1} = 2,20 \cdot 10^6 \text{ms}^{-1}$$

Rýchlosť elektrónu na obežnej dráhe je $2,25 \cdot 10^6 \text{ms}^{-1}$.

1.4 Práca elektrostatického poľa

Majme elektrostatické pole vytvorené bodovým elektrickým nábojom Q umiestneným v počiatku súradnicovej sústavy (Obr. 1.3).



Obr. 1.3: Práca v elektrostatickom poli náboja Q

V tomto elektrickom poli na ďalší bodový elektrický náboj Q' pôsobí sila

$$\vec{F}_{el} = q\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ'}{r^3} \vec{r} \quad (1.6)$$

Pri posunutí elektrického náboja Q' z bodu A do bodu B sila elektrostatického poľa vykoná prácu

$$W_{AB} = \int_{r_A}^{r_B} \vec{F}_{el} d\vec{r} \quad (1.7)$$

Nech elektrické pole \vec{E} je vytvorené kladným bodovým nábojom Q a \vec{r} je polohový vektor náboja Q' vzhľadom na náboj Q . Práca vykonaná poľom náboja Q je potom:

$$W = \int_{r_A}^{r_B} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{QQ'}{r^3} \vec{r} d\vec{r} = \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_A}^{r_B} \frac{dr}{r^2} = \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0} \left[-\frac{1}{r} \right]_{r_A}^{r_B} = \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (1.8)$$

Pri úprave rovnice sme využili fakt, že $\vec{r} \cdot d\vec{r} = r \cdot dr$, lebo v prípade radiálneho poľa oba vektory majú rovnaký smer.

Je zrejmé, že práca vykonaná elektrostatickým poľom pri prenesení náboja Q' medzi dvoma bodmi nezávisí od dráhy, po ktorej náboj prenášame, ale iba od začiatkovej a konečnej polohy prenášaného náboja. Je tiež vidno, že ak sa náboj Q' pohybuje z jedného bodu späť do toho istého bodu po uzavretej dráhe (krivke), práca elektrostatickej sily je rovná nule. Je to základná vlastnosť elektrostatického poľa a môžeme ju vyjadriť vzťahom (1.9):

$$\oint_L \vec{E} d\vec{r} = 0 \quad (1.9)$$

Táto rovnica hovorí, že elektrostatická sila je konzervatívna sila, takže pre elektrostatické pole je možné definovať potenciálnu energiu a potenciál.

V elektrostatickom poli bodového elektrického náboja, podobne ako v gravitačnom poli hmotného bodu, za vzťažné miesto obyčajne volíme nekonečno a potenciálnu energiu v nekonečne kladieme rovnú nule. Pre potenciálnu energiu dvoch bodových elektrických nábojov Q a Q' vzdialených o r potom dostávame:

$$E_p(r) = W_{r,\infty} = \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0} \left[-\frac{1}{r} \right]_r^{\infty} = \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_\infty} \right) = \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \quad (1.10)$$

Práca, ktorá sa vykoná pri presune náboja Q' v elektrostatickom poli náboja Q z bodu A do bodu B, sa potom vyjadří ako rozdiel potenciálnych energií v daných bodoch, $W = \Delta E_p = E_p(r_A) - E_p(r_B)$. Keďže v homogénnom elektrostatickom poli je intenzita všade konštantná, potom pre prácu vykonanú pri prenesení náboja Q' o vzdialenosť d platí $W = q \cdot E \cdot d$.

Príklad 1.4

Dva protóny v jadre hélia sú vzdialené od seba o vzdialenosť $R = 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$. Aká práca sa musela vykonať, aby sme protóny do tejto vzdialenosti dostali?

Práca externej sily pri prenesení dvoch elektrických nábojov rovnakej polarity z nekonečna do vzdialenosti R je rovnaká ako práca elektrostatickej odpudivej sily medzi týmito elektrickými nábojmi pri ich vzdialení z daného miesta do nekonečna. Preto platí.

$$W = \int_R^\infty \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^3} \vec{r} d\vec{r} = \int_R^\infty \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} dr = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R} = 1,538 \cdot 10^{-13} \text{ J} \cong 1 \text{ MeV}$$

1.5 Potenciál elektrostatického poľa

Pri charakterizovaní elektrického poľa pomocou vektora intenzity elektrického poľa sme vychádzali z vyjadrenia sily pôsobiacej na bodový náboj. Analogicky môžeme v každom bode elektrostatického poľa určiť potenciálnu energiu, ktorú by mal v danom mieste skúšobný náboj. Samozrejme, že potenciálna energia by bola rôzna pre rôzne náboje. Podiel potenciálnej energie a náboja však bude veličina charakterizujúca iba samotné skúmané elektrické pole. Takúto veličinu nazývame **potenciál elektrického poľa** a označujeme symbolom φ .

Nech elektrický náboj Q je náboj, ktorého elektrické pole chceme charakterizovať. Potom podľa (1.10) a predchádzajúcej úvahy

$$\varphi(r_A) = \frac{E_p(r_A)}{Q'} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_A} \quad (1.11)$$

Potenciál elektrického poľa v určitom mieste sa číselne rovná práci, ktorú by vykonala sila poľa na prenesenie jednotkového kladného elektrického náboja z daného miesta do vzťažného miesta (v tomto prípade do nekonečnej vzdialenosti).


Pomocou práce sily elektrického poľa sme definovali potenciálnu energiu pre určitý elektrický náboj v danom mieste elektrického poľa. Ekvivalentná je preto nasledovná názorná definícia elektrického potenciálu:

Potenciál v nejakom bode elektrostatického poľa sa rovná potenciálnej energii ľubovoľného elektrického náboja v danom mieste delenej týmto nábojom.

Pre elektrostatický potenciál bola zavedená samostatná jednotka **volt²**, značka **V**. Rozmer tejto jednotky je $[\varphi] = V = J.C^{-1}$. Slovami môžeme povedať: medzi dvoma bodmi je rozdiel potenciálu 1 volt, ak pri prenose náboja 1 coulomb medzi týmito dvoma bodmi vykonáme prácu 1 joule.

Potenciál elektrostatického poľa sa dá zapísať pomocou intenzity elektrostatického poľa aj ako

$$\varphi(r) = -\int_{\infty}^r \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (1.12)$$

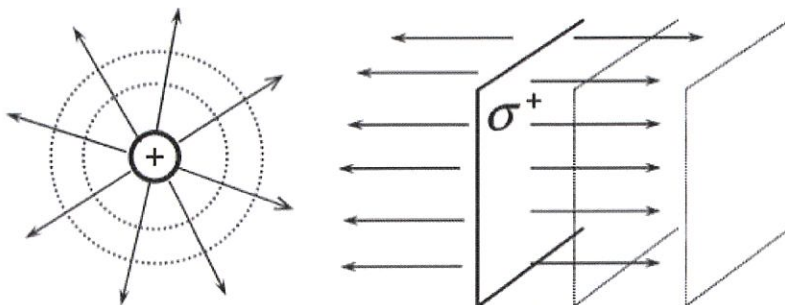
 Definíciu elektrického potenciálu môžeme zovšeobecniť na sústavu bodových elektrických nábojov pomocou princípu superpozície. Ak máme sústavu bodových elektrických nábojov Q_i , tak potenciál elektrického poľa sústavy v určitom bode je súčtom elektrických potenciálov od jednotlivých elektrických nábojov

$$\varphi = \sum_i \varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{Q_i}{r_i}$$

Množina bodov, v ktorých má elektrický potenciál rovnakú hodnotu, je **ekvipotenciálna hladina**. Pri pohybe elektrického náboja po ekvipotenciálnej hladine sila poľa nekoná žiadnu prácu. Siločiarly preto musia byť kolmé na ekvipotenciálne hladiny. Dôkaz tohto tvrdenia je jednoduchý. Ak by neboli, potom by bola nenulová zložka intenzity elektrického poľa v smere dotyčnice ku ekvipotenciálnej hladine a práca elektrostatickej sily odpovedajúcej tejto zložke intenzity elektrického poľa by bola rôzna od nuly. Ekvipotenciálne hladiny pre bodový elektrický náboj sú sústredné guľové plochy. V homogénnom poli, napr. v okolí nekonečnej nabitaj roviny, sú ekvipotenciálne hladiny rovnobežné roviny kolmé na siločiarly.

² ALESSANDRO VOLTA (1754 – 1827) taliansky vynálezca, fyzik (venoval sa elektrine). Vytvoril ako prvý galvanickú batériu, ktorá dostala pomenovanie Voltov článok.

Ekvipotenciálne hladiny pre konštantné elektrické pole a pole bodového elektrického náboja sú zobrazené na obr. 1.4.



Obr. 1.4: Ekvipotenciálne hladiny pre homogénne elektrické pole

Príklad 1.5

Z vodivej mydlovej bubliny polomeru $r = 2\text{cm}$ a nabitej na potenciál $\varphi = 10^4\text{V}$ vznikne po prasknutí kvapka vody s polomerom $r_1 = 0,05\text{cm}$. Aký veľký je potenciál φ_1 kvapky?

Potenciál bubliny pre prasknutím bol
$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

z čoho pre náboj uložený na bubline vyplýva
$$Q = \varphi \cdot r \cdot 4\pi\epsilon_0$$

Potenciál guľôčky vzniknutej prasknutím bubliny potom bude

$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\varphi \cdot r \cdot 4\pi\epsilon_0}{r_1} = \varphi \frac{r}{r_1} = 10000\text{V} \cdot \frac{0,02\text{m}}{0,0005\text{m}} = 400 \cdot 10^3\text{V}$$

1.6 Elektrické napätie

Potenciál sme zaviedli pomocou práce. V dôsledku toho prácu na prenesenie elektrického náboja v elektrickom poli môžeme vyjadriť aj pomocou rozdielu elektrických potenciálov. Vzťah (1.8) vyjadrujúci prácu elektrického poľa pri prenesení bodového elektrického náboja v poli iného bodového elektrického náboja môžeme upraviť na súčin

$$W = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) = q \left(\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_A} - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_B} \right) = q(\varphi(r_A) - \varphi(r_B)) \quad (1.13)$$

Práca, ktorú sily elektrického poľa vykonajú na prenesenie elektrického náboja sa rovná súčinu náboja a rozdielu elektrických potenciálov v počiatkovej a konečnej polohe. Na charakterizovanie elektrického poľa definujeme elektrické napätie medzi dvomi bodmi elektrického poľa.

Elektrické napätie medzi dvomi bodmi elektrostatického poľa sa rovná práci na prenesenie jednotkového kladného elektrického náboja medzi týmito bodmi elektrického poľa.

Ako vyplýva z (1.13) **elektrické napätie** sa rovná rozdielu potenciálov

$$U_{AB} = \frac{W}{q} = \Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B \quad (1.14)$$

Jednotka napätia je rovnaká ako jednotka potenciálu, teda **volt (V)**. Medzi dvoma bodmi elektrického poľa je elektrické napätie 1 volt, ak pri prenesení elektrického náboja 1 C medzi týmito bodmi treba vykonať prácu 1 J, alebo sa získa energia 1 J. Definície, ktoré sme tu zaviedli pre elektrické pole bodového elektrického náboja, platia pre ľubovoľné elektrické pole.

Vo fyzike sa často, hlavne vo fyzike atómov a molekúl a fyzike elementárnych častíc ako jednotka energie používa **elektrónvolt** (skratka *eV*). Elektrónvolt sa rovná práci, ktorú elektrické pole vykoná pri prenesení elementárneho elektrického náboja $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ medzi dvomi miestami v elektrickom poli, ktorých rozdiel elektrických potenciálov sa rovná 1 V.

Elektrické napätie môžeme vyjadriť aj pomocou intenzity elektrického poľa a platí

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = \int_{r_A}^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{r} - \int_{r_B}^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_{r_A}^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{r} + \int_{\infty}^{r_B} \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_{r_A}^{r_B} \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (1.15)$$

Elektrické napätie medzi dvomi bodmi elektrostatičného poľa sa rovná integrálu elektrickej intenzity tohto poľa po ľubovoľnej krivke spájajúcej dané dva body.

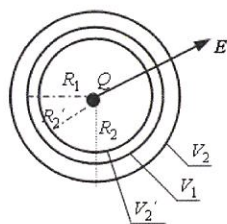
Príklad 1.7

Ekvipotenciálna hladina prechádza bodom poľa s intenzitou $E_1 = 5 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, vzdialeným od elektrického náboja, ktorý toto pole vytvára o $R_1 = 2,5 \text{ cm}$. V akej vzdialenosti od elektrického náboja máme viesť ďalšiu ekvipotenciálnu hladinu, aby napätie medzi ekvipotenciálnymi hladinami bolo 25V?

Ekvipotenciálne hladiny elektrostatičného poľa v okolí bodového elektrického náboja sú sústredné guľové plochy a siločiarly sú z elektrického náboja radiálne vystupujúce vektory. Pre veľkosť intenzity vo vzdialenosti R_1 od bodového elektrického náboja Q platí:

$$E_1 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R_1^2} \quad \text{a elektrický potenciál na tejto ekvipotenciálnej hladine je}$$

$$\varphi_1 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R_1} = E_1 \cdot R_1.$$



Hľadáme polomery ekvipotenciálnych hladín R_2, R_2' , pre ktoré má platiť:

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \Delta\varphi, \text{ resp. } \varphi_2' = \varphi_1 + \Delta\varphi.$$

Dosadením výrazov pre elektrické potenciály φ_2, φ_1 resp. φ_2' platí:

$$\varphi_2 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R_2} = \frac{E_1 \cdot R_1^2}{R_2}, \quad \varphi_1 = E_1 \cdot R_1.$$

Dostaneme rovnicu, z ktorej vyjadríme polomer hľadanej ekvipotenciálnej plochy:

$$\frac{E_1 R_1^2}{R_2} = E_1 R_1 - \Delta\varphi \quad \Rightarrow \quad R_2 = \frac{E_1 R_1^2}{E_1 R_1 - \Delta\varphi} \quad \text{resp.} \quad R_2' = \frac{E_1 R_1^2}{E_1 R_1 - \Delta\varphi}.$$

Po dosadení číselných hodnôt dostaneme polomery $R_2 = 3,125\text{cm}$ a $R_2' = 2,08\text{cm}$.

1.7 Kapacita vodiča

Dôležitou vlastnosťou vodiča, sústavy vodičov a telies je schopnosť akumulovať elektrický náboj. Táto vlastnosť má veľké praktické využitie v prvkoch elektrických obvodov a zariadení, ktoré voláme **kondenzátory**. Pri nabíjaní vodičov zistíme, že rôzne telesá nabité rovnakým nábojom majú rôzny potenciál. Tento potenciál závisí od veľkosti a tvaru telesa, vzdialenosti od ostatných telies ako i prostredia, v ktorom sú uložené. Potenciál každého telesa je v bežných prostrediach priamoúmerný náboju $Q = C \cdot \varphi$. Konštantu úmernosti C , ktorá charakterizuje schopnosť hromadiť istý elektrický náboj, nazývame **kapacita**. Kapacitu vodiča možno definovať vztáhom:

$$C = \frac{Q}{\varphi} \quad (1.16)$$

Jednotkou kapacity v sústave SI je **farad (F)**. Jeden farad je kapacita vodiča, ktorý sa nábojom 1C nabije na potenciál 1V, teda $[F] = C \cdot V^{-1}$. V technickej praxi sa kapacita meria v menších jednotkách ako sú $1\mu F = 10^{-6} F$, $1nF = 10^{-9} F$, $1pF = 10^{-12} F$.

Elektrická kapacita, aj keď je definovaná pomocou elektrického náboja na vodiči, nezávisí od tohto náboja, je iba funkciou tvaru vodiča, resp. zoskupenia vodičov. Výpočet elektrickej kapacity je vo všeobecnosti veľmi zložitý problém. Najjednoduchšie je určiť elektrickú kapacitu osamelej gule. Ak je na guli elektrický náboj Q , potom jej elektrický potenciál je rovnaký ako elektrický potenciál poľa rovnakého elektrického náboja, umiestneného v jej strede a pre elektrickú kapacitu vodivej gule platí

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R} \quad \Rightarrow \quad C = 4\pi\epsilon_0 R \quad (1.17)$$

Kapacita osamotených vodičov je veľmi malá. Napríklad guľový vodič s polomerom 9cm vo vákuu má podľa (1.17) kapacitu len $10pF$.

Väčšiu kapacitu má sústava dvoch navzájom izolovaných vodičov, ktorú nazývame **kondenzátor**. Pokiaľ majú spomínané vodiče rovnako veľké náboje opačných znamienok, hovoríme, že kondenzátor je nabitý. Jeho kapacitu určíme zo vzťahu:

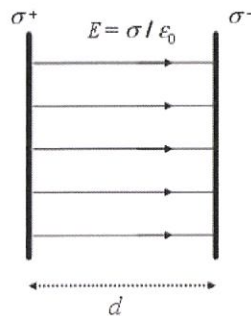
$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U} \quad (1.18)$$

kde U je napätie medzi vodičmi s potenciálmi φ_1 a φ_2 . V zásade rozlišujeme tri druhy kondenzátorov: doskový, guľový a valcový, pričom každý z nich má svoje modifikácie.

1.7.1 Kapacita doskového kondenzátora

Doskový kondenzátor tvoria dve rovinné kovové platne (Obr.1.5).

Privedieme na jednu z dosiek kondenzátora elektrický náboj Q a na druhú rovnako veľký opačný elektrický náboj $-Q$. Elektrické náboje sa rozložia po ich povrchu približne rovnomerne s plošnými hustotami σ^+ a σ^- . Ak je vzdialenosť dosiek oveľa menšia ako rozmery dosiek, môžeme tieto považovať za nekonečne veľké. Nech plošný obsah každej z dosiek je S , potom elektrický náboj na kladnej doske je $Q = \sigma S$.



Obr.1.5: Intenzita elektrostatického poľa medzi platňami doskového kondenzátora

Elektrické pole medzi doskami môžeme považovať za homogénne s intenzitou $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ kolmou na povrch dosiek. Napätie medzi doskami podľa Obr. 1.5 je

$$U_{12} = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l} = Ed = \frac{\sigma}{\epsilon} d = \frac{Q}{S\epsilon} d \quad (1.19)$$

Po dosadení do (1.18) sa elektrická kapacita doskového kondenzátora rovná

$$C = \frac{S\epsilon}{d} \quad (1.20)$$

Elektrická kapacita doskového kondenzátora je priamo úmerná plošnému obsahu dosiek a nepriamo úmerná vzájomnej vzdialenosti dosiek, pričom permitivita $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ vyjadruje vplyv materiálu dielektrika (medzi doskami kondenzátora) na veľkosť kapacity.

1.7.2 Energia kondenzátora a energia elektrického poľa

Jednoduchými pokusmi sa môžeme presvedčiť, že elektrostatické pole má svoju energiu, ktorá vyjadruje schopnosť konať prácu na úkor zmeny tohto poľa. Ak dosky nabitého kondenzátora spojíme vodičom, potom elektrický prúd vyvinie na vodiči teplo, ktorého veľkosť bude súvisieť so zmenou elektrického náboja a teda aj intenzity elektrického poľa v kondenzátore. V súlade so zákonom zachovania energie musí mať elektrostatické pole energiu, ktorá sa pri vybíjaní kondenzátora premení na inú formu. Zo zákona zachovania energie je zrejmé, že táto energia sa musí rovnať práci na nabitie pôvodne nenabitého kondenzátora, to znamená na postupné prenesenie kladného elektrického náboja zo zápornej dosky na kladnú.

Predstavme si, že máme izolovaný kondenzátor a že elektrický náboj prenášame cez priestor medzi doskami kondenzátora. Na prenesenie prvého nekonečne malého kladného elektrického náboja dQ nie je potrebná práca. Tento elektrický náboj však vytvorí medzi doskami kondenzátora elektrostatické pole a pri prenášaní ďalšieho elektrického náboja dQ proti prenášanému elektrickému náboju už pôsobí sila elektrostatického poľa. Ak je kondenzátor nabitý elektrickým nábojom Q na napätie U , je na prenesenie ďalšieho náboja dQ potrebná elementárna práca

$$dW = U \cdot dQ = \frac{QdQ}{C} \quad (1.21)$$

Celá práca potrebná na nabitie pôvodne nenabitého kondenzátora, to znamená na postupné prenesenie celého náboja Q na kladnú dosku, je

$$W = \int_0^Q \frac{QdQ}{C} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} CU^2 \quad (1.22)$$

Energia kondenzátora je sústredená v elektrickom poli medzi doskami kondenzátora. Vede k tomu jednoduchá úvaha. Majme izolovaný rovinný kondenzátor nabitý určitým elektrickým nábojom. Z plošnej hustoty náboja vyplýva intenzita elektrického poľa daná vzťahom $E = \sigma / \varepsilon_0$. Ak dosky kondenzátora oddialime, bude na nich rovnaký elektrický náboj a tiež aj intenzita elektrického poľa, pretože zostala rovnaká hustota náboja. Väčšia však bude energia kondenzátora. Na oddialenie dosiek kondenzátora sme museli vynaložiť prácu. Zvýšenie energie je spojené so zväčšením priestoru, v ktorom je elektrické pole. Zovšeobecnením tejto úvahy je tvrdenie: elektrické pole má energiu. V elektrostatike úvahy o energii elektrostatického poľa vyplývajú z potenciálnej energie elektrického náboja na doskách kondenzátora, čiže ide vlastne o potenciálnu energiu sústavy elektrických nábojov E_{pe} .

Príklad 1.11

Kondenzátor kapacity $C_1 = 4\mu F$ bol nabitý na potenciálový rozdiel $U_0 = 100V$ a odpojený od zdroja napätia. Ku kondenzátoru paralelne pripojíme nenabitý kondenzátor kapacity $C_2 = 6\mu F$. Vypočítajte napätie na sústave kondenzátorov, energiu sústavy kondenzátorov, porovnajte ju s pôvodnou energiou prvého nabitého kondenzátora a vysvetlite zmenu, ktorá nastala.

Pri paralelnom zapojení kondenzátorov výsledná kapacita $C = C_1 + C_2$. Náboj na sústave kondenzátorov bude rovnaký a z toho pre napätie na sústave paralelne spojených kondenzátorov dostávame:

$$C_1 U_0 = (C_1 + C_2) U \quad \Rightarrow \quad U = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_0 = \frac{4 \cdot 10^{-6} F}{4 \cdot 10^{-6} F + 6 \cdot 10^{-6} F} 100V = 40V.$$

$$\text{Energia sústavy kondenzátorov } W = \frac{1}{2} (C_1 + C_2) U^2 = \frac{1}{2} \cdot 10^{-5} F \cdot 40V = 8 \cdot 10^{-3} J.$$

$$\text{Energia nabitého prvého kondenzátora je } W_1 = \frac{1}{2} C_1 U^2 = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 10^{-5} F \cdot 100V = 2 \cdot 10^{-2} J.$$

Rozdiel pôvodnej energie a energie po pripojení druhého kondenzátora bude

$$\Delta W = W_1 - W = 2 \cdot 10^{-2} J - 0,8 \cdot 10^{-2} J = 1,2 \cdot 10^{-2} J$$

Otázkou je, kam sa stratila táto energia? Pri pripojení nenabitého kondenzátora vodičom musel pretekať prúd, uvoľnilo sa teplo v prírodných vodičoch a to je tá chýbajúca energia.

1.7.3 Parametre a typy kondenzátorov

Najdôležitejšími parametrami kondenzátorov sú *menovitá kapacita* (charakteristický parameter) a *menovité napätie* (medzný parameter). Menovitá kapacita odpovedá kapacite kondenzátora s určitou toleranciou a menovité napätie je najvyššia hodnota napätia, ktorú kondenzátor znesie bez poškodenia. Kondenzátory sa, podobne ako rezistory, vyrábajú v kapacitných radoch, pričom najčastejšie bývajú rady E6 a E12 [14]. Ďalšími parametrami sú:

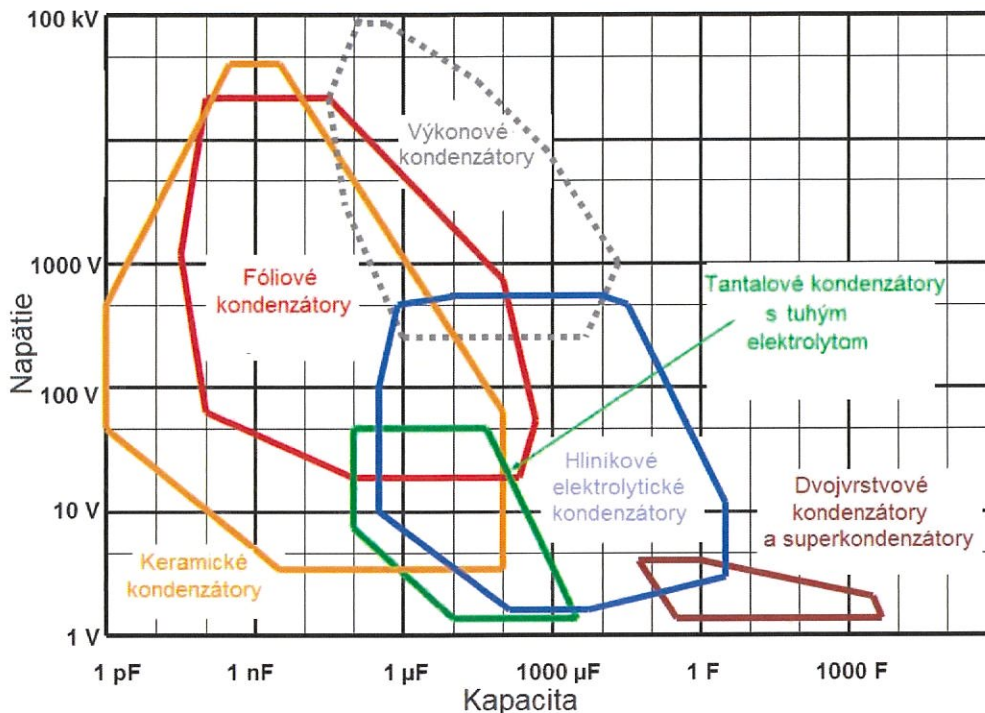
- presnosť kapacity
- stratový činiteľ ($\tan \delta$)
- teplotný súčiniteľ kapacity
- izolačný odpor a iné

Kondenzátory možno z hľadiska konštrukcie rozdeliť do nasledujúcich skupín:

- keramické
- fóliové
- elektrolytické
 - s tuhým dielektrikom
 - s kvapalným dielektrikom
- superkondenzátory
 - dvojvrstvové
 - pseudokondenzátory
 - hybridné

Rozdelenie do vyššie uvedených skupín je určené typom dielektrika použitým v kondenzátore. Jednotlivé typy kondenzátorov sa líšia svojimi vlastnosťami a rozsahmi hodnôt charakteristických a medzných parametrov, čo podmieňuje ich použiteľnosť v konkrétnej aplikácii. Na Obr.1.6 sú vyznačené rozsahy menovitých hodnôt napätí a kapacít rôznych typov kondenzátorov.

Keramické kondenzátory používajú ako dielektrikum keramický materiál. Pozostáva z dvoch alebo viacerých striedajúcich sa vrstiev keramického materiálu a kovových elektród. Majú obvykle malé rozmery vďaka veľmi vysokej hodnote relatívnej permitivity použitého dielektrika (až do hodnôt 10^4). Na Obr.1.6 je vidieť, že keramické kondenzátory dosahujú vysoké hodnoty menovitých napätí, rádovo až desiatok kV. Keramické kondenzátory sa delia do dvoch tried, pričom kondenzátory prvej triedy sa vyznačujú vysokou stabilitou a nízkymi stratami a používajú sa v hlavne v rezonančných obvodoch a kondenzátory druhej triedy sa vyznačujú vysokými hodnotami kapacity na jednotku plochy dielektrika ale nižšou presnosťou a vyššou teplotnou závislosťou a sú používané predovšetkým ako blokovacie resp. filtrovacie kondenzátory.



Obr. 1.6 Rozsahy menovitých napätí a kapacít rôznych typov kondenzátorov [16]

Fóliové kondenzátory majú dielektrikum z umelej hmoty obvykle s pokovenými elektródami z hliníku alebo zinku nanesenými priamo na plochu dielektrika alebo osobitnou fóliou položenou na umelohmotnom dielektriku. Tieto vrstvy bývajú zvinuté do tvaru valca a často sploštené z dôvodu úspory miesta na doskách plošných spojov alebo vytvorené z viacerých vrstiev zložených na sebe. Fóliové kondenzátory majú obvykle väčšie rozmery pretože používané dielektrikum má nízku relatívnu permitivitu (rádovo jednotky) avšak vyznačujú sa veľkou presnosťou kapacity, dobrými vysokofrekvenčnými vlastnosťami, veľmi dobrou teplotnou stabilitou a nízkymi hodnotami zvodových prúdov. Osobitnou kategóriou sú *výkonové kondenzátory*, ktoré konštrukčne odpovedajú fóliovým kondenzátorom ale z historických dôvodov tvoria osobitnú skupinu, s určením pre výkonové aplikácie.

Elektrolytické kondenzátory majú veľmi veľké hodnoty kapacity na jednotku objemu vďaka použitiu porézneho dielektrika (veľká hodnota plochy S) a malej vzdialenosti d . Kontakt katódy (zápornej elektródy) je tvorený kovovým puzdrom alebo kovovou fóliou pripevnenou na puzdro. Samotná katóda má formu vodivého elektrolytu (tuhého alebo kvapalného), ktorý privádza elektrický prúd k dielektriku tvoreného obvykle oxidom kovu (napr. tantalu) vytvoreného pri priechode jednosmerného elektrického prúdu. Anódu tvorí kovová fólia (napr. z hliníku alebo spekaného práškoveho tantalu), obvykle leptaná z dôvodu zväčšenia plochy. Tieto kondenzátory je nutné správne polarizovať pretože pri prepólovaní dochádza k odformovaniu dielektrika s následnou tvorbou plynov a tepla.

Superkondenzátory sú kondenzátory, ktoré tiež využívajú elektrolyt avšak na rozdiel od elektrolytických kondenzátorov v ktorých elektrolyt predstavuje katódu, tvorí elektrolyt v superkondenzátoroch vodivé spojenie medzi elektródami. Superkondenzátory majú najvyššiu hodnotu energie pripadajúcej na jednotku objemu v porovnaní s inými kondenzátormi. Superkondenzátory využívajú dva rôzne princípy uchovávaní náboja a delia sa na: dvojvrstvové kondenzátory a pseudokondenzátory. V dvojvrstvových kondenzátoroch sa využíva oddeľovanie náboja v Helmholtzovej dvojvrstve na rozhraní medzi elektródou a elektrolytom. Hrúbka separácie náboja je okolo 0,3-0,8 nm, teda omnoho menej ako

v konvenčných kondenzátoroch. V pseudokondenzátoroch sa náboj uchováva elektrochemickou cestou prostredníctvom redoxných reakcií na povrchu elektród. Na Obr.1.7 sú znázornené rôzne typy kondenzátorov používaných v praxi.



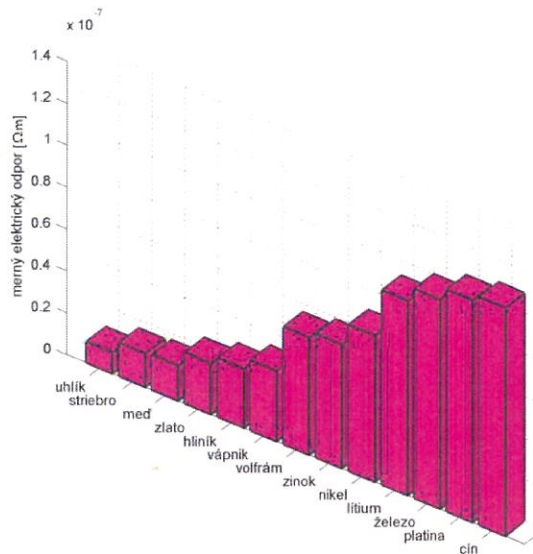
Obr.1.7 Rôzne typy kondenzátorov [15]

1.8 Delenie materiálov z hľadiska ich vodivosti


Elektrická vodivosť vyjadruje schopnosť daného materiálu viesť *elektrický prúd*. Elektrická vodivosť je vlastnosťou daného materiálu, ktorá sa vyjadruje všeobecne pomocou *merného elektrického odporu* vyjadrujúcej elektrický odpor vodiča s dĺžkou 1m a priereze 1m² (označenie ρ a jednotka $\Omega \cdot m$). Hodnota merného elektrického odporu toho ktorého materiálu závisí od počtu voľných nosičov náboja na základe čoho je možné materiály rozdeliť do troch skupín [8]:

- I. *Vodiče*
 - a. *Vodiče prvého druhu* (všetky kovy a zliatiny, uhlík)
 - b. *Vodiče druhého druhu* (roztavené soli a vodné roztoky solí, kyselín a zásad)
- II. *Izolanty (dielektriká)* (napr. vzduch, sklo, chemicky čistá voda a i.)
- III. *Polovodiče* (kremík, germánium, selén a i.)

Kryštalická mriežka kovov je tvorená kladnými iónmi, medzi ktorými sa (ak nepôsobí vonkajšie elektrické pole) pohybujú voľné elektróny rôznymi smermi a rýchlosťami. Práve tieto voľné nosiče náboja (*elektróny*) sú zdrojom veľmi dobrej elektrickej vodivosti kovov. Vo vodičoch druhého druhu dochádza k rozpadu časti molekúl soli, kyseliny alebo zásady na kladné a záporné ióny. V prípade vodičov druhého druhu sú teda nosičmi náboja *ióny*. V izolantoch je za normálnych podmienok počet voľných nosičov náboja veľmi malý, pretože väčšina častíc je viazaná k časticiam s opačným nábojom čo neumožňuje ich voľný pohyb. Ďalšou skupinou materiálov sú polovodiče, ktorých vodivosť sa nachádza medzi vodivosťou izolantov a kovov. Polovodiče obsahujú veľké množstvo elektrónov iba slabovo viazaných v atómoch. Najdôležitejšou vlastnosťou polovodičov je závislosť ich vodivosti na koncentrácii rôznych prímiesí, čím je možné vytvoriť súčiastky používané pre zosilnenie signálov, spínanie alebo premenu energie. Porovnanie niektorých druhov kovov z hľadiska ich merného elektrického odporu je možné vidieť na Obr. 1.8.



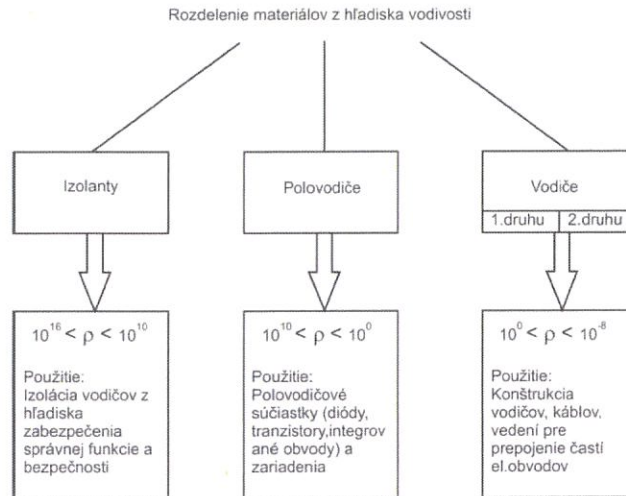
Obr.1.8 Porovnanie merného elektrického odporu niektorých materiálov

 Väčšina vodičov je vyrobená z meďi alebo hliníka. Napriek tomu, že elektrický merný odpor hliníka je približne o 40% väčší (viď Obr.1.8), je nutné vziať do úvahy že hliník je ľahší a lacnejší. Pre konštrukciu nadzemných vedení sa používa jadro z ocele alebo zliatiny hliníka obklopené hliníkom. Vodiče týchto vedení sú potom zavesené na keramických alebo porcelánových izolátoroch, ktoré môžu byť pokryté gumou, polyetylénom, azbestom alebo termoplastom.

Na Obr.1.9 je možné grafické znázornenie rozdelenia materiálov podľa ich elektrického merného odporu s vyznačením ich využitia v elektrotechnike a elektronike. Izolanty ako nevodivé materiály majú samozrejme svoj význam pri zabezpečení správnej funkcie elektrických obvodov a bezpečnosti (napr. prevencia voči skratu dotykom vodičov alebo zamedzenie odrazov elektromagnetických vln v koaxiálnych kábloch a pod.). Polovodičové materiály sú základom pre výrobu elektronických súčiastok (diódy, tranzistory, integrované obvody a i.), ktoré sa používajú v zariadeniach s extrémne širokým spektrom použiteľnosti (spotrebiteľská elektronika, počítače, vybavenie automobilov, domáce spotrebiče a množstvo ďalších). Vodiče prvého druhu (kovy) sa potom používajú predovšetkým pre konštrukciu káblov a vedení, ktoré slúžia pre vodivé prepojenie jednotlivých častí obvodu. Vodiče druhého druhu (roztoky) sa môžu použiť napr. pri konštrukcii niektorých typov zdrojov (akumulátory).

1.9 Elektrický prúd

Ak vystavíme vodič účinkom elektromagnetického poľa, začne na častice s nábojom pôsobiť sila v dôsledku čoho sa začnú pohybovať. Smer pohybu týchto častíc závisí od znamienka ich náboja, s tým, že častice s kladným nábojom sa budú pohybovať v smere siločiar elektrického poľa a častice so záporným nábojom proti smeru siločiar elektrického poľa.



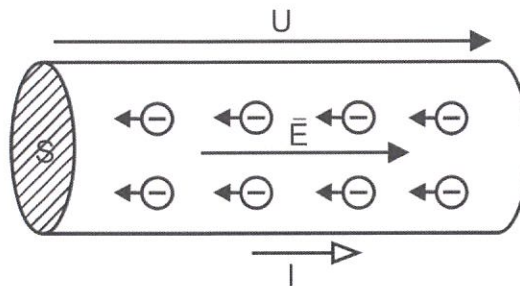
Obr.1.9 Použitie jednotlivých typov materiálov podľa ich merného elektrického odporu

Elektrický prúd nazývame usporiadaný pohyb častí s nábojom, ktorý nastáva v dôsledku pôsobenia elektrického poľa. Veličinu označujeme písmenom I a jednotkou elektrického prúdu je **ampér** [A].

Veľkosť elektrického prúdu je daná množstvom náboja, ktorý prejde prierezom vodiča za jednotku času čo možno vyjadriť:

$$I = \frac{Q}{t}, \text{ resp. } i = \frac{dq}{dt} \quad (1.23)$$

Prvý vzťah platí v prípade, že sa veľkosť elektrického prúdu v čase nemení (jednosmerný prúd). Druhý vzťah platí v prípade časovo premenného elektrického prúdu (striedavý prúd), kedy je okamžitá hodnota prúdu označená i daná rýchlosťou zmeny veľkosti elektrického náboja, ktorý prejde prierezom vodiča za jednotku času.



Obr.1.10 Znárodnenie elektrického prúdu – elektróny ako častice so záporným nábojom sa pohybujú proti smeru siločiar vyjadreného smerom vektora intenzity el.poľa. Plocha prierezu vodiča je označená S .

Elektrický prúd je veličina skalárna, orientovaná čo znamená, že v elektrických obvodoch sa jeho smer vyznačuje (šípkou) a za dohodnutý smer sa považuje smer pohybu častí s kladným nábojom (teda opačný ako smer pohybu elektrónov). Bez prítomnosti el.poľa sa pohybujú elektróny náhodnými smermi pomerne veľkými rýchlosťami (asi 10^6 m/s), pričom dochádza k neustálym zrážkam týchto elektrónov s atómami kryštálovej mriežky materiálu. *Priemerná*

rýchlosť pohybu elektrónov je v tomto prípade nulová. Po vložení materiálu do elektrického poľa dochádza k usporiadanému pohybu elektrónov avšak ich dodatočnú kinetickú energiu pomerne rýchlo odovzdávajú pri zrážkach s atómami mriežky. Za krátky čas medzi zrážkami sa pohybujú priemernou rýchlosťou, ktorá sa nazýva **driftová** (tá je výrazne nižšia ako rýchlosť pohybu jednotlivých elektrónov).

Príklad 1.12

Určte aký prúd preteká medeným vodičom ak má priemer 0,815 mm a driftová rýchlosť pohybu elektrónov je $3,54 \cdot 10^{-2}$ mm/s. Uvažujme, že na každý atóm pripadá jeden voľný elektrón.

Ak uvažujeme, že objemová koncentrácia voľných častíc s nábojom je n_q a každý z nich má elektrický náboj veľkosti q , môžeme napísať pre celkový náboj ΔQ , ktorý prejde prierezom vodiča s plochou S za čas Δt s driftovou rýchlosťou v_d

$$\Delta Q = qn_q S v_d \Delta t$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = qn_q S v_d$$

Keďže na každý atóm pripadá jeden voľný elektrón, platí $n_q = n_a$, kde n_a – objemová koncentrácia atómov materiálu. Tú môžeme určiť zo znalosti hustoty materiálu (medi v našom prípade) ($\rho = 8,93$ g/cm³), Avogadrovej konštanty ($N_A = 6,02$ at/mol) a molárnej hmotnosti ($M = 63,5$ g/mol):

$$n_a = \frac{\rho N_A}{M} = \frac{8,93 \text{ g/cm}^3 \cdot 6,02 \text{ at/mol}}{63,5 \text{ g/mol}} = 8,47 \cdot 10^{28} \text{ at/m}^3$$

Veľkosť náboja každého elektrónu je rovná $q = e^- = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C, takže platí

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = qn_q S v_d = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 8,47 \cdot 10^{28} \text{ at/m}^3 \cdot (\pi \cdot (0,815 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2) \cdot 3,54 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} \cong 1 \text{ A}$$

1.10 Elektrický odpor a rezistor

Ako bolo uvedené, pri usporiadanom pohybe častíc s nábojom (teda pri priechode elektrického prúdu) dochádza k zrážkam týchto častíc s iónmi kryštalickej mriežky materiálu čím sa odovzdáva ich kinetická energia a zároveň sa zväčšuje amplitúda kmitov iónov mriežky čo sa prejaví zvýšením teploty.

Elektrický odpor je schopnosť daného materiálu meniť elektrickú energiu na tepelnú. Veľičinu označujem písmenom R a jednotkou elektrického odporu je **ohm** [Ω].

Veľkosť elektrického odporu je pri danom elektrickom prúde úmerná elektrickej energii premenenej na tepelnú za jednotku času.

Elektrická vodivosť je prevrátená hodnota elektrického odporu

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.24)$$

Jednotkou elektrickej vodivosti je **siemens** [S].

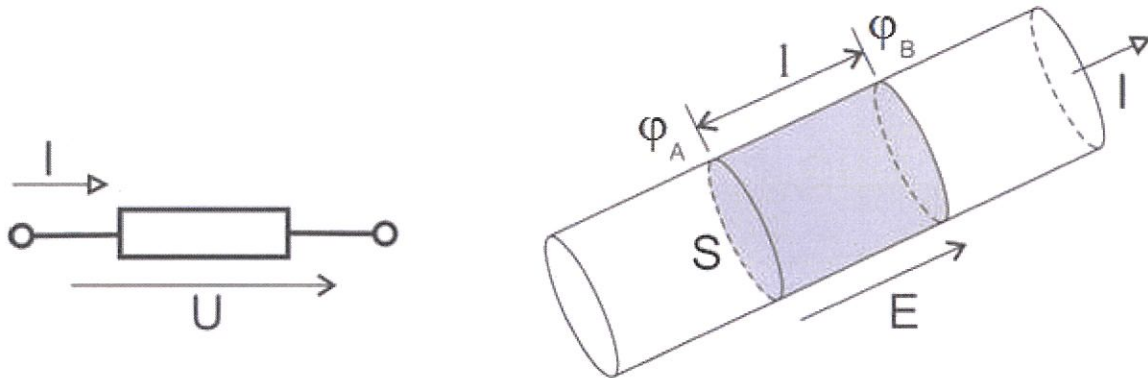
Súčiastku, ktorej charakteristickým parametrom je elektrický odpor nazývame **rezistor** (symbol používaný v elektrických schémach je zobrazený na Obr.1.11 vľavo).

Uvažujme časť vodiča s dĺžkou l , plochou prierezu S a prúd I , ktorý ním prechádza (Obr.1.11 vpravo). Potenciál v bode A označený φ_A bude mať väčšiu hodnotu ako potenciál v bode B označený φ_B a ak predpokladáme homogénne elektrické pole (v každom bode má vektor intenzity elektrického poľa E rovnaký smer aj veľkosť), vznikne na tomto úseku **úbytok napätia**

$$U = \varphi_A - \varphi_B = El \quad (1.25)$$

Pomer veľkosti úbytku napätia tohto úseku k veľkosti prúdu vyjadruje veľkosť elektrického odporu

$$R = \frac{U}{I} \quad (1.26)$$



Obr.1.11 Symbol rezistora používaný v elektrických schémach a vyznačenie vzniku úbytku napätia na úseku vodiča pretekaného prúdom I

Odpor vodiča s dĺžkou l a prierezom S závisí okrem týchto geometrických parametrov aj od typu materiálu vyjadrenom pomocou merného elektrického odporu (tiež nazývaného *rezistivita*) ρ (kapitola 1.8) a je možné ho vypočítať podľa nasledujúceho vzťahu:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.27)$$

Pri použití vzťahu 1.27 je potrebné vziať do úvahy, že odpor materiálov sa s teplotou mení, a preto jeho veľkosť takto vypočítaná bude správna len pri teplote pri ktorej bol určený merný elektrický odpor materiálu. V kovocho sa pri zvyšovaní teploty zvyšuje aj elektrický odpor, zatiaľ čo u polovodičov je to vo všeobecnosti naopak. Zmenu odporu pri zmene teploty o ΔT môžeme vypočítať podľa vzťahu:

$$R_T = R(1 + \alpha\Delta T) \quad (1.28)$$

kde α - teplotný koeficient rezistivity. Pokiaľ má kladnú hodnotu, elektrický odpor materiálu bude s rastúcou teplotou narastať zatiaľ čo pri zápornom koeficiente bude klesať.

Príklad 1.13

Určte ako sa zmení elektrický odpor medeného vodiča telefónneho vedenia dĺžky $l = 30 \text{ km}$ a priemeru $d = 4 \text{ mm}$ ak bude teplota $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ (teplotný koeficient rezistivity medi je $\alpha = 0,00392 \text{ K}^{-1}$).

Pre výpočet použijeme vzťahy 1.27 a 1.28. Rezistivita medi má hodnotu $\rho = 0,0175 \text{ }\mu\Omega\text{m}$ (je vhodné pripomenúť, že rezistivita sa určuje pri teplote $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Odpor vodiča má teda pri teplote $20 \text{ }^\circ\text{C}$ hodnotu:

$$R_{20} = \rho \frac{l}{S} = 0,0175 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m} \frac{30 \cdot 10^3 \text{ m}}{\pi (2 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2} = 41,78 \Omega$$

Odpor tohto vodiča pri teplote $35 \text{ }^\circ\text{C}$ určíme takto:

$$R_{35} = R_{20}(1 + \alpha\Delta T) = 41,78 \Omega (1 + 0,00392 \text{ K}^{-1} 15 \text{ K}) = 44,24 \Omega$$

Pozn.: Rozdiel medzi termodynamickou teplotou a teplotou je len v definícii vzťažných hodnôt (termodynamická teplota 0 K odpovedá teplota $-273,16 \text{ }^\circ\text{C}$), a preto majú zmeny týchto teplôt rovnakú veľkosť bez ohľadu na použité jednotky.



Pri veľmi nízkych teplotách sa elektrické a magnetické vlastnosti niektorých materiálov radikálne menia. Ak sú takéto materiály ochladené pod kritickú teplotu, vykazujú nulový elektrický odpor a stávajú sa ideálnym diamagnetikom, teda kompenzujú vonkajšie magnetické pole. Tento jav sa nazýva supravodivosť a materiály u ktorých je možné tento jav pozorovať sa delia do dvoch skupín (Typ 1 – napr. olovo, ortuť, zinok, zirkónium, kadmium a i. a Typ 2 – vanád, technécium, niób a rôzne zlúčeniny kovov). V súčasnosti sa supravodiče využívajú napr. v magnetickej levitácii, pri ktorej sa objekt „vznáša“ nad silným supramagnetom čím sa prakticky eliminuje trenie (známym príkladom je vlak MAGLEV v Japonsku). Ďalšími aplikáciami sú: prístroje pre magnetickú rezonanciu, urýchľovače častíc, elektrické motory, transformátory a i.



Magnetická levitácia objektu nad supermagnetom (vľavo) [17] a vlak MAGLEV (vpravo) [18]

1.10.1 Parametre rezistorov

Ako bolo uvedené vyššie, *rezistor* je súčiastka ktorej charakteristickým parametrom je elektrický odpor. Rezistory sa dnes vyrábajú v dvoch prevedeniach, a v *diskrétnom* (ako samostatná súčiastka) a *integrovanom* (v integrovaných obvodoch). Z konštrukčného hľadiska je elektrický odpor diskrétnych rezistorov realizovaný pomocou tenkej vrstvy z uhlíka alebo kovu. Rezistory je obvykle možné popísať pomocou:

- medzných parametrov
- charakteristických parametrov
 - *menovitá hodnota odporu*
 - *menovitá zaťažiteľnosť*
 - *teplotný súčiniteľ odporu*
 - *napäťový súčiniteľ odporu*
 - *veľkosť nežiaduceho šumu generovaného rezistorom*
 - *veľkosť parazitnej indukčnosti a i.*

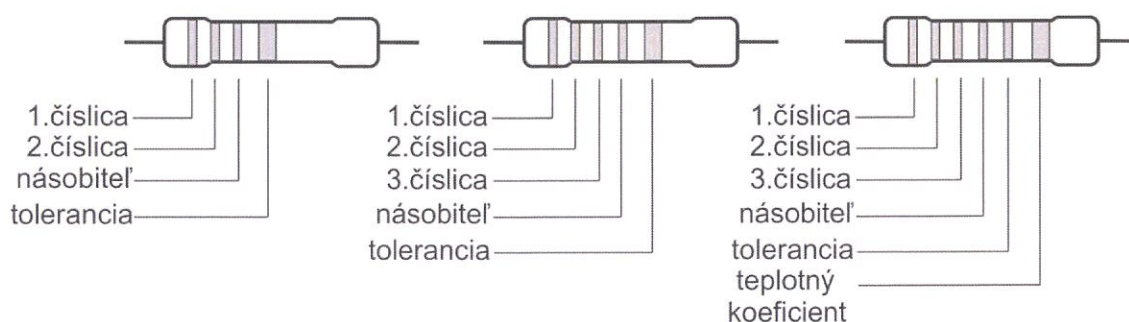
Medzné parametre predstavujú parametre, ktorých prekročenie vedie k zničeniu súčiastky zatiaľ čo charakteristické parametre popisujú úžitkové vlastnosti rezistora. Keďže štandardné rezistory sa vyrábajú v rozsahu menovitých hodnôt odporu asi 1Ω až $10^6 \Omega$, je zrejmé, že sa vyrábajú len rezistory s určitými menovitými hodnotami. Rezistory sú rozdelené do *odporových radov*, kde každý rad obsahuje určitý počet menovitých hodnôt odporov v rámci jednej odporovej dekády, pričom jednotlivé odporové rady sa od seba líšia aj toleranciou (Tab.1.1). V tabuľke môžeme vidieť, že označenie radu v skutočnosti označuje počet dostupných hodnôt odporu rezistorov v rámci jednej odporovej dekády.

Tab.1.1 Odporové rady rezistorov

Rad E24 $\pm 5\%$											
1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0
3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1
Rad E12 $\pm 10\%$											

1,0	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	3,9	4,7	5,6	6,8	8,2
Rad E6 ±20%											
1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8						

V prípade miniatúrnych rezistorov sa namiesto vyznačenia číselného vyznačenia menovitej hodnoty odporu (prípadne ďalších údajov) používa farebný čiarový kód (Obr.1.12 a Obr.1.13). Tento kód obsahuje štyri až šesť farebných prúžkov, pričom začiatok kódu je zo strany prúžka, ktorý je bližšie k okraju rezistora. Menovitá hodnota odporu sa vyznačuje pomocou dvoch alebo troch číslic hodnoty a násobiteľa, pričom posledný prúžok udáva toleranciu (v prípade štyroch a piatich prúžkov) resp. teplotný koeficient (v prípade šiestich prúžkov). Význam jednotlivých prúžkov podľa farebnej schémy je uvedený v Tab.1.2.

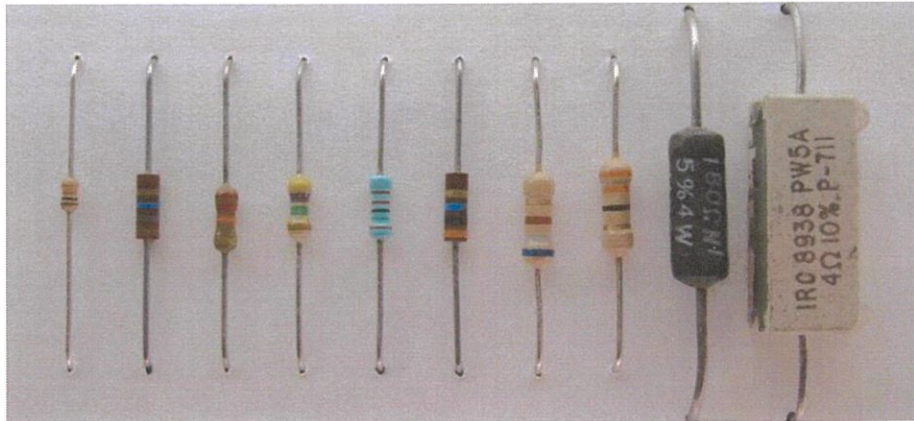


Obr. 1.12 Farebný kód značenia miniatúrnych rezistorov

Tab. 1.2 Vysvetlenie farebného kódu pre označenie rezistorov [14]

farba	1. číslica	2. číslica	3. číslica	násobiteľ	tolerancia	TK_R [K^{-1}]
strieborná				10^{-2}	10%	
zlatá				10^{-1}	5%	
čierna	0	0	0	10^0		$200 \cdot 10^{-6}$
hnedá	1	1	1	10^1	1%	$100 \cdot 10^{-6}$
červená	2	2	2	10^2	2%	$50 \cdot 10^{-6}$
oranžová	3	3	3	10^3		$25 \cdot 10^{-6}$
žltá	4	4	4	10^4		$15 \cdot 10^{-6}$
zelená	5	5	5	10^5	0,5%	
modrá	6	6	6	10^6	0,25%	

fialová	7	7	7	10^7	0,1%	
šedá	8	8	8	10^8		
biela	9	9	9	10^9		



Obr. 1.13 Príklad rôznych typov rezistorov [19]

1.11 Elektrická práca a výkon

Vo fyzike vyjadruje veličina *práca* silové pôsobenie po dráhe. Prácu môžeme vypočítať ako súčin sily F pôsobiacej po dráhe s :

$$W = F \cdot s \quad (1.29)$$

Jednotkou práce je **joule** [J]. Vzťah 1.29 platí za predpokladu, že smer vektora sily a smer pohybu sú zhodné, inak je do vzťahu potrebné doplniť člen $\cos \theta$, kde θ je uhol medzi vektorom sily a smerom pohybu. Ak uvažujeme presun elektrického náboja z jedného miesta elektrického obvodu na iné, vykoná sa pri tom práca v dôsledku vytvoreného elektrického poľa charakterizovaného vektorom \mathbf{E} (intenzita elektrického poľa).

Energia vo fyzike vyjadruje schopnosť konať prácu. Podľa prvého termodynamického zákona nie je možné energiu ani vytvoriť ani zničiť, je teda možná len jej premena z jednej formy do druhej. Rýchlosť premeny energie z jednej formy do druhej vyjadrujeme pomocou veličiny nazývanej **výkon**. Výkon teda zodpovedá množstvu vykonanej práce za určitý čas:

$$P = \frac{W}{t} \quad (1.30)$$

Jednotkou výkonu je **watt** [W].

Ak uvážime, že veľkosť elektrického prúdu je daná množstvom náboja, ktoré prejde prierezom vodiča za jednotku času ($I = Q/t$) a napätie odpovedá práci, ktorá sa vykoná pri presune elektrického náboja medzi dvoma bodmi ($U = W/Q$) môžeme pre elektrický výkon získať nasledujúci vzťah:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UQ}{t} = UI \quad (1.31)$$

Výkon môžeme vyjadriť aj v inej forme ak použijeme Ohmov zákon (viď kapitola 1.12):

$$\begin{aligned} P &= UI = (RI)I = RI^2 \\ P &= UI = U\left(\frac{U}{R}\right) = \frac{U^2}{R} \end{aligned} \quad (1.32)$$

Príklad 1.14

Sila odporu vzduchu pri pohybe elektrického vlaku s hmotnosťou $m = 200 \text{ t}$ je $F_D = 62,5 \cdot 10^{-3} \text{ N.kg}^{-1}$ a účinnosť pohonu je $\eta = 0,87$. Aký veľký prúd je dodávaný vedením pri napájanom napätí $U_N = 1500 \text{ V}$ a rýchlosti pohybu vlaku $v = 80 \text{ km.h}^{-1}$.

Môžeme uvažovať prácu, ktorá sa vykoná pri presune vlaku o vzdialenosť 1 m . Sila sa musí rovnať sile odporu vzduchu pri hmotnosti 200 t , teda platí:

$$W = F \cdot s = m \cdot F_D \cdot s = 200 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 62,5 \cdot 10^{-3} \text{ N.kg}^{-1} \cdot 1 \text{ m} = 12500 \text{ J}$$

Kvôli účinnosti nižšej ako 100% sa iba časť dodanej energie premenila na užitočnú prácu, preto platí:

$$W_D = \frac{W}{\eta} = \frac{12500 \text{ J}}{0,87} = 14368 \text{ J}$$

Výkon je definovaný ako práca vykonaná za určitý čas a číselne sa rovná práci vykonanej za čas 1 s (pri rýchlosti $v = 80 \text{ km.h}^{-1} = 22,2 \text{ m.s}^{-1}$):

$$P = \frac{W_D v}{t} = \frac{14368 \text{ J} \cdot 22,2 \text{ m.s}^{-1}}{1 \text{ s}} \cong 320 \cdot 10^3 \text{ W}$$

Zo vzťahu pre elektrický výkon môžeme vypočítať dodávaný prúd:

$$P = UI \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{320 \cdot 10^3 \text{ W}}{1500 \text{ V}} \cong 213 \text{ A}$$

1.12 Ohmov zákon

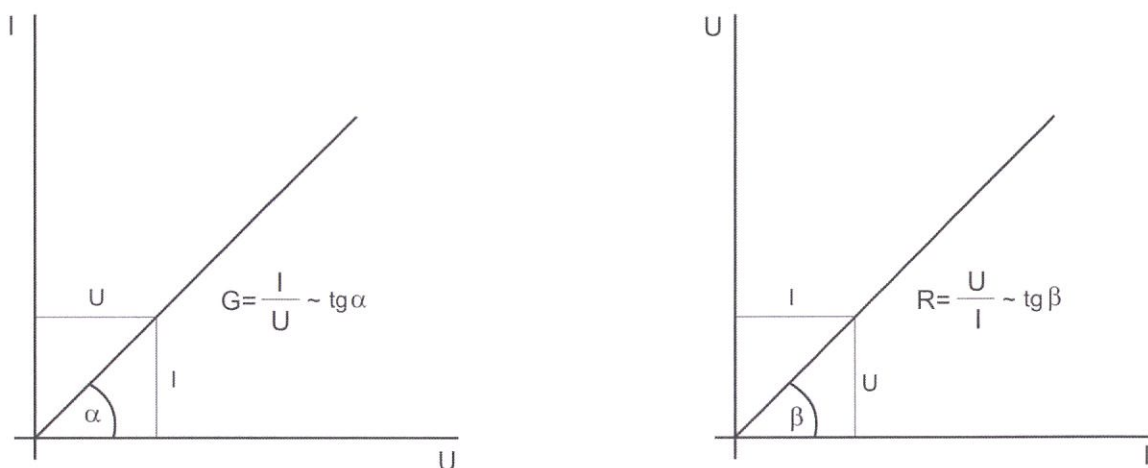
Ohmov zákon je jedným zo základných zákonov elektrotechniky a vyjadruje vzťah medzi elektrickým prúdom a elektrickým napätím, pričom koeficientom úmernosti je elektrický odpor (resp. vodivosť). Môžeme ho definovať nasledovne:

Veľkosť elektrického prúdu je priamo úmerná veľkosti elektrického napätia a nepriamo úmerná veľkosti elektrického odporu.

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.33)$$

Z uvedeného vzťahu môžeme vypočítať ľubovoľnú z veličín ak poznáme zvyšné dve – napr. ak poznáme veľkosť elektrického odporu rezistora a prúd, ktorý ním prechádza, môžeme určiť napätie na tomto rezistore.

Grafické znázornenie tohto vzťahu označujeme **voltampérová (V-A) charakteristika**. Na Obr.1.14 je príklad takejto charakteristiky v dvoch formách – v prípade, že na os x je napätie a na osi y prúd nazývame charakteristiku ampérvoltová (A-V) charakteristika, v opačnom prípade ide o V-A charakteristiku. U A-V charakteristiky je koeficientom úmernosti vodivosť (G), u V-A charakteristiky je koeficientom úmernosti elektrický odpor (R), čo znamená, že väčšie hodnoty vodivosti znamenajú väčšiu hodnotu uhla α na A-V charakteristike a menšiu hodnotu uhla β na V-A charakteristike a naopak.



Obr.1.14 A-V a V-A charakteristika rezistora



Zhrnutie

1. *Elektrický náboj je fyzikálna vlastnosť hmoty, ktorá spôsobuje vytvorenie silového pôsobenia v elektromagnetickom poli. Môže byť kladný alebo záporný, pričom telesá (častice) s rovnakým nábojom sa priťahujú a s opačným sa odpudzujú. Najmenšia možná veľkosť elektrického náboja (elementárny náboj) je $1,602 \cdot 10^{-19}$ C, pričom všetky hodnoty nábojov sú násobkom tejto hodnoty.*
2. *Coulombov zákon charakterizuje silové pôsobenie medzi dvoma nábojmi a hovorí, že veľkosť sily je priamo úmerná veľkosti oboch nábojov a nepriamo úmerná druhej mocnici ich vzdialenosti, pričom závisí aj od prostredia. Veličina, ktorá charakterizuje silové pôsobenie elektrostatického poľa v danom bode sa nazýva intenzita elektrického poľa E (jednotkou je volt na meter).*
3. *Potenciál ϕ (jednotkou je volt) je veličinou, ktorá vyjadruje prácu, ktorá sa vykoná pri presune náboja z určitého bodu do nekonečna a charakterizuje potenciálnu energiu elektrostatického poľa v tomto bode. Rozdiel potenciálov v dvoch bodoch sa nazýva elektrické napätie (jednotkou je tiež volt) – odpovedá veľkosti práce, ktorá sa vykoná pri presune náboja z jedného bodu do druhého. Množina bodov nachádzajúca sa v rovnakej*

vzdialenosti od náboja sa nazýva ekvipotenciálna plocha a napätie medzi ľubovoľnými bodmi na tejto ploche je nulové (pretože majú rovnaký potenciál).

4. Schopnosť telies akumulovať elektrický náboj charakterizujeme pomocou veličiny nazývanej kapacita C (jednotkou je farad). V praxi používame pre akumuláciu elektrického náboja sústavu dvoch vodičov (napr. vo forme dosiek), ktoré potom vytvárajú súčiastku nazývanú kondenzátor. Veľkosť kapacity doskového kondenzátora je priamo úmerná ploche dosák, nepriamo úmerná ich vzdialenosti a závisí tiež od materiálu dielektrika.
5. Materiály delíme z hľadiska ich vodivosti (schopnosti viesť elektrický prúd) na vodiče (1. a 2. druhu), izolanty a polovodiče. Pre konštrukciu praktických vodičov sa najčastejšie využíva hliník a meď. Elektrický prúd I (jednotkou je ampér) je veličina, ktorú definujeme ako množstvo náboja, ktoré prejde prierezom vodiča za jednotku času.
6. Elektrický odpor R (jednotkou je ohm) je veličina charakterizujúca schopnosť materiálov brániť prietoku elektrického prúdu a vyjadruje premenu elektrickej energie na tepelnú. Jej prevrátenou hodnotou je vodivosť G (jednotkou je siemens). Elektrický odpor vodiča je priamo úmerný jeho dĺžke a nepriamo úmerný ploche jeho prierezu, pričom závisí aj od typu materiálu (merný elektrický odpor).
7. Výkon je vo fyzike vyjadrením množstva práce vykonanej za určitý čas. Ak uvážime, že prúd vyjadruje množstvo náboja, ktoré prejde prierezom vodiča za jednotku času a že napätie vyjadruje prácu, ktorá sa vykoná pri presune náboja z jedného bodu do druhého, môžeme elektrický výkon P (jednotka watt) vyjadriť ako súčin napätia a prúdu.
8. Ohmov zákon vyjadruje vzťah medzi napätím, prúdom a elektrickým odporom pričom hovorí, že veľkosť elektrického prúdu je priamo úmerná veľkosti napätia a nepriamo úmerná veľkosti elektrického odporu. Grafickým znázornením tohto vzťahu je voltampérová charakteristika, ktorá má pre rezistor s konštantnou hodnotou elektrického odporu podobu priamky so smernicou určenou veľkosťou odporu (čím väčší odpor, tým väčší sklon V - A charakteristiky).