

A large, three-dimensional red sign with white text is the central focus of the image. The sign is composed of several rectangular blocks stacked together, creating a sense of depth. The text is in a bold, sans-serif font. The background shows a modern exhibition space with a high ceiling, industrial-style lighting fixtures, and other red architectural elements. The overall aesthetic is clean and contemporary.

**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ**



NEXT GENERATION VUT: Zvyšování kvality a relevance vzdělávání na VUT CZ.02.02.XX/00/23_022/0009052

Elektřina

doc. RNDr. Milada Bartlová, Ph.D.,
doc. Ing. Vlasta Sedláková, Ph.D.,
Mgr. Naděžda Bogatyreva, Ph.D.



**Spolufinancováno
Evropskou unií**



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



Obsah

- **Elektrický náboj a zákony pro elektrický náboj**
- **Elektrické náboje v látkách**
- **Elektrické pole, Coulombův zákon**
- **Intenzita elektrického pole**
- **Vodič v elektrostatickém poli**
- **Elektrický potenciál, elektrické napětí**
- **Kondenzátor, kapacita kondenzátoru, zapojení kondenzátorů**
- **Elektrický proud**
- **Elektrický odpor, rezistor, zapojení rezistorů**
- **Ohmův zákon**
- **Příklady**

Elektrina

Název elektrina vznikl již ve starověku ze slova jantar (ήλεκτρον v řeckém překladu elektron), protože na něm byla poprvé objevena.

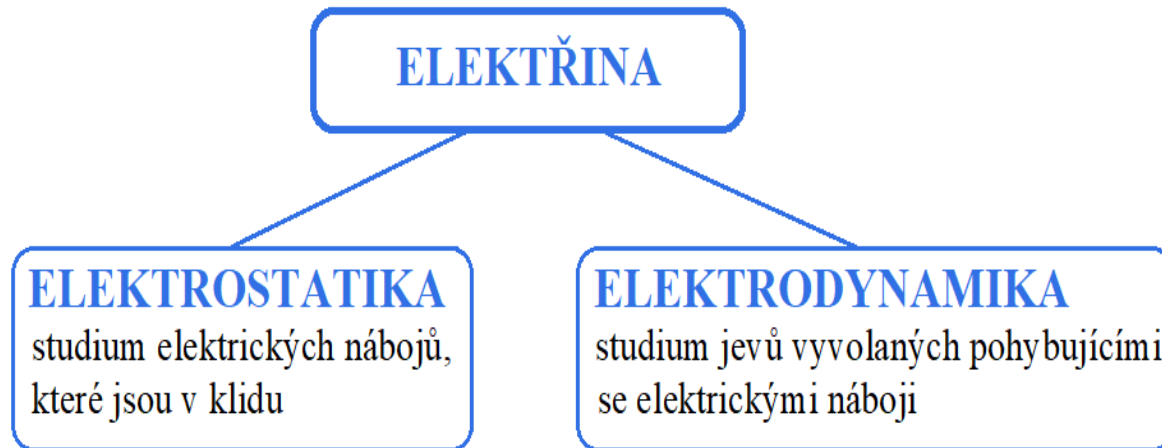
V Řecku se tenkrát používaly jantarové cívky k předení a stávalo se, že při navinování příze se její vlákna ježila.

Řekové také pozorovali, že některé přírodní „kameny“, např. minerál magnetovec, přitahují železo.

Za první vědecké dílo o elektrině je považován spis anglického lékaře Williama Gilberta “De magnete” z roku 1600, kde je také zaveden název elektrina.

Elektrina

Elektrina je také název oboru fyziky, který se zaměřuje na studium elektrických jevů.



Elektrina a magnetismus jako věda vznikla na přelomu 18. a 19. století. O jejich rozvoj se zasloužili například Luigi Galvani, Alessandro Volta, André Marie Ampère, Charles Auguste de Coulomb, Michael Faraday, James Clerk Maxwell a celá řada jiných významných fyziků tehdejší doby.

Elektrický náboj

Základní elektrickou vlastností těles je elektrický náboj.

Elektrický náboj je skalární fyzikální veličina, kterou označujeme Q , a jeho jednotkou je coulomb $[Q] = \text{C}$.

Nejmenším elektrickým nábojem je elementární náboj

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

Experimentálně bylo zjištěno, že existují 2 druhy náboje: kladný a záporný.

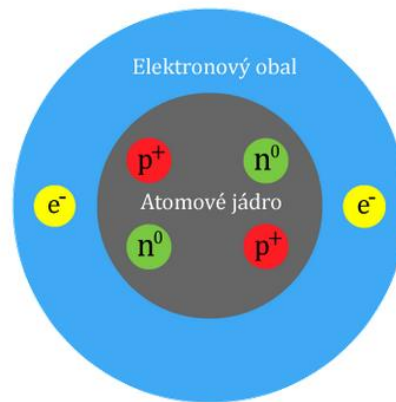
Elektrický náboj nemůže existovat samostatně a vždy má svůj nosič. Těleso s elektrickým nábojem se nazývá elektricky nabitě.

Elektrický náboj

Elektrické vlastnosti látek souvisejí se stavbou atomů, které jsou složeny z atomových jader a elektronových obalů.

Jádra jsou tvořena neutrony a protony. Neutrony jsou bez elektrického náboje. Protony a elektrony jsou nosiči elektrického náboje.

Elektron je částice, která je nosičem záporného elementárního náboje $-e$. Proton je nosič kladného elementárního náboje $+e$.



Vnitřní struktura atomu

Elektrický náboj

Za normálních podmínek se v látce počet protonů s kladným nábojem rovná počtu elektronů se záporným nábojem. Tím je zajištěna elektroneutralita.

Vnější působením se tato rovnováha může porušit a vzniká tak elektricky nabitě těleso, které je

- nabitě záporně, pokud převažují elektrony,
- nabitě kladně, pokud převažují protony.

Zákony pro elektrický náboj

Základní vlastnosti elektrických nábojů popisují:

- **Zákon zachování elektrického náboje** – hodnota celkového elektrického náboje v elektricky izolované soustavě je rovna algebraickému součtu všech nábojů v soustavě a je neměnná.

Elektrické náboje nevznikají ani nezanikají, jen se přemísťují z jednoho tělesa na druhé (tj. náboje se třením nevytvářejí, jen přemísťují).

Zákon lze dokázat pomocí pokusu s elektrickou indukcí (viz dále).

Zákony pro elektrický náboj

- **Zákon kvantování elektrického náboje** – všechny náboje jsou násobkem elementárního náboje.

Libovolný náboj $Q = n \cdot e$, kde n je přirozené číslo, e je elementární náboj.

V roce 1911 provedl Robert Andrews Millikan přímým pokusem důkaz tohoto zákona.

- **Zákon invariantnosti elektrického náboje** – hodnota elektrického náboje se při pohybu nemění.

Velikost náboje je nezávislá (invariantní) na rychlosti, jíž se pohybuje nosič náboje.

Elektrické náboje v látkách

Podle schopnosti těles udržet nahromaděný elektrický náboj na jednom místě nebo umožnit tomuto náboji rozšíření po tělese lze rozdělit látky na vodiče a nevodiče.

Vodiče jsou látky obsahující volný elektrický náboj. Vodiče vedou elektricky proud.

Volný elektrický náboj lze přenášet z jednoho tělesa na jiné a může se přemísťovat i v jednom tělese na makroskopické vzdálenosti.

Volný náboj nesou elektrony v kovech a polovodičích, ionty v plynech a kapalinách.

Nevodiče (izolanty, dielektrika) jsou látky, které neobsahují volný elektrický náboj a nevedou elektrický proud.

Vlastnosti látek vzhledem k elektrickému náboji:

- **Vodiče** – část nábojů se pohybuje značně volně.
Například: kov, pitná voda, živý organismus.
- **Nevodiče** – volně se nepohybuje prakticky žádný náboj.
Například: sklo, ebonit, destilovaná voda, dielektrika.
- **Polovodiče** – mezi vodiči a izolanty – liší se schopností uvolnit elektrony z atomů.
Například: křemík, germanium.
- **Supravodiče** – nulový odpor.

Elektrické pole

Elektrické pole je silové pole, v němž na tělesa nebo částice s elektrickým nábojem působí elektrická síla.

Elektrické pole existuje kolem každého elektricky nabitého tělesa nebo částice s elektrickým nábojem.

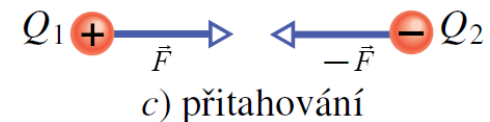
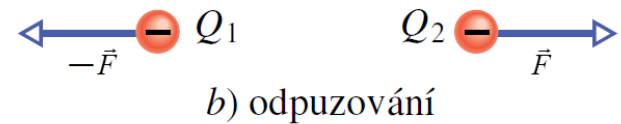
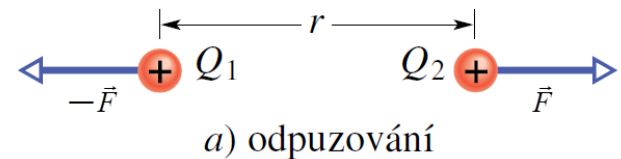
Pole se nazývá **elektrostatickým**, pokud částice, které ho vytváří, jsou v klidu vzhledem k pozorovací soustavě a **elektrodynamickým**, pokud se částice pohybují vzhledem k pozorovací soustavě.

Elektrodynamické pole obecně má dvě složky: elektrickou a magnetickou.

Elektrické pole

Elektrické náboje na sebe působí elektrickou silou \vec{F} , přitom

- **souhlasné** náboje, resp. souhlasně nabitá tělesa se **odpuzují**,
- **opačné** náboje, resp. nesouhlasně nabitá tělesa se **přitahují**.



Bodové náboje jsou elektrické náboje těles nebo částic, jejichž rozměry jsou značně menší než vzdálenosti mezi nimi, tj. jejich rozměry můžeme zanedbat.

Coulombův zákon

Elektrostatické silové působení mezi dvěma bodovými náboji lze popsat pomocí **Coulombova zákona**:

Velikost síly, kterou na sebe působí dva bodové náboje, je přímo úměrná součinu obou nábojů a nepřímo úměrná čtverci jejich vzdálenosti.

$$F = k \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}, \text{ kde } k = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \text{ N.m}^2.\text{C}^{-2}.$$

Q_1 a Q_2 jsou velikosti bodových nábojů, r je vzdálenost, ε je **permitivita prostředí**, kterou lze vyjádřit vztahem

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r,$$

kde $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ je **permitivita vakua**,

ε_r je **relativní permitivita**.

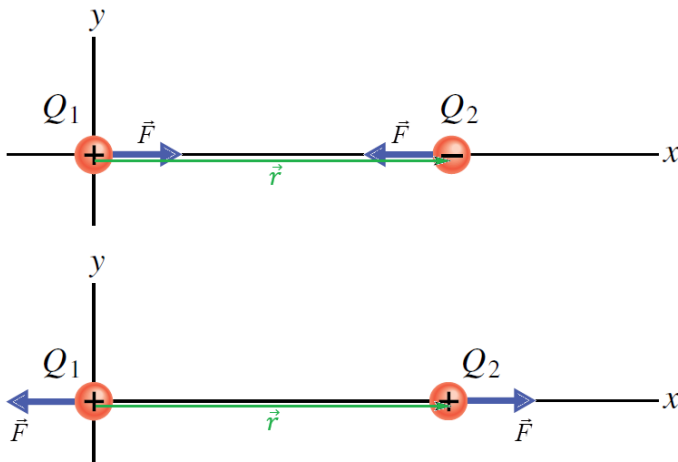
Coulombův zákon

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty relativní permitivity pro různá prostředí.

Vakuum	1	Olej silikonový	2,7
Vzduch	1,00054	Plexisklo	3,7
Slída	5,4	Parafin	1,7-2,3
Voda (20 °C)	80,4	Papír kondenzátorový	3,5

Vektorové vyjádření Coulombova zákona

Vektory \vec{F} a \vec{r} leží na stejné přímce a počátek soustavy je v jednom z nábojů.



Elektrostatická síla, kterou na sebe navzájem působí bodové náboje, má tvar:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \vec{r}^0 = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r},$$

$$\text{tedy } \vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^3} \vec{r}.$$

Zde $\vec{r}^0 = \frac{\vec{r}}{r}$ je jednotkový vektor vektoru \vec{r} ,

r je velikost vektoru \vec{r} , tj. vzdálenost mezi náboji.

Princip superpozice

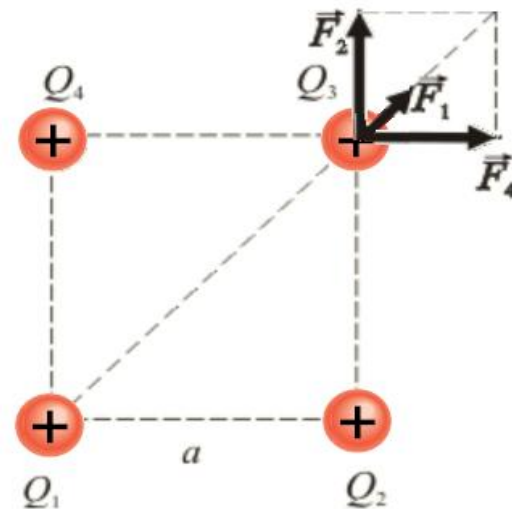
Pro n bodových nábojů platí princip superpozice – silové účinky všech nábojů se **vektorově sčítají**.

Je-li v soustavě n nabitých částic, síla působící na libovolnou z nich je součtem všech sil působících od ostatních částic.

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

Například:

Čtyři náboje jsou umístěny ve vrcholech čtverce. Výsledná síla působící na náboj Q_3 je znázorněna na obrázku.



Intenzita elektrického pole

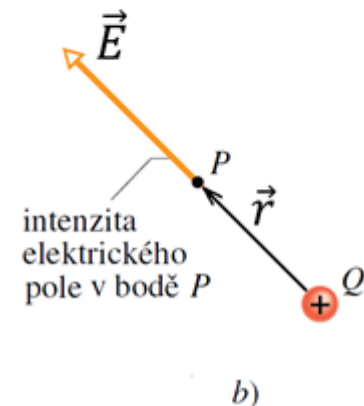
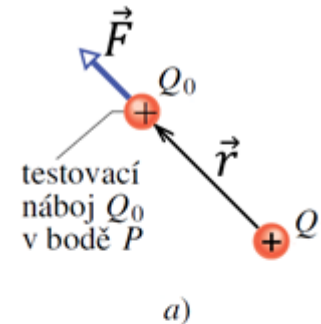
Vzájemné působení nábojů na dálku se realizuje prostřednictvím elektrického pole.

Elektrostatické pole charakterizujeme pomocí **intenzity elektrického pole**, která je definována vztahem

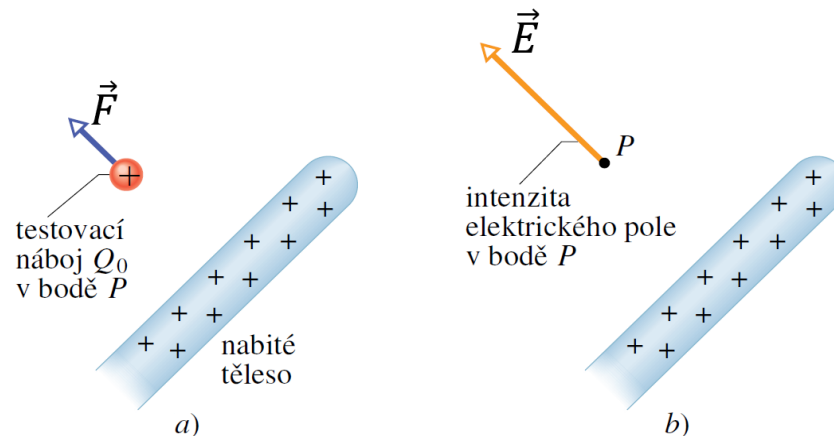
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0},$$

kde \vec{F} je síla, kterou působí elektrické pole v daném místě na kladný bodový testovací náboj Q_0 .

Intenzita elektrického pole (elektrická intenzita) je vektorová veličina a její jednotkou je $[E] = \text{N.C}^{-1} = \text{V.m}^{-1}$.



Intenzita elektrického pole



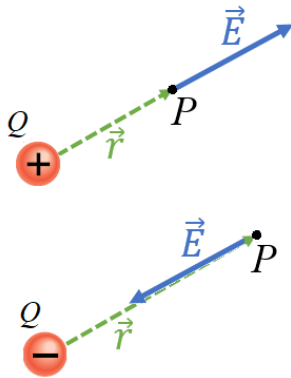
a) Kladný testovací náboj Q_0 umístěný do bodu P v blízkosti nabitého tělesa. Na testovací náboj působí elektrostatická síla \vec{F} .

b) Intenzita \vec{E} elektrického pole v bodě P , které je buzeno nabitým tělesem.

Elektrické pole bodového náboje

Velikost intenzity elektrického pole bodového náboje v bodě P je

$$E = \frac{F}{Q_0} = \frac{k \frac{|Q| \cdot Q_0}{r^2}}{Q_0} = k \frac{|Q|}{r^2} \text{ nebo } E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{|Q|}{r^2}.$$

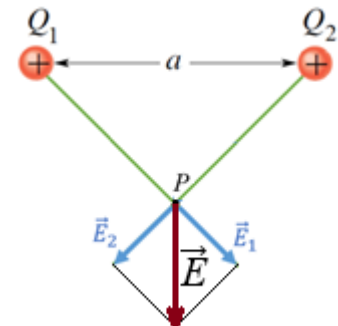


Vektorově lze intenzitu zapsat jako

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2} \vec{r}^0 = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^3} \vec{r}.$$

Je-li pole vybuzeveno více náboji, určíme výslednou intenzitu pomocí principu superpozice

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i.$$



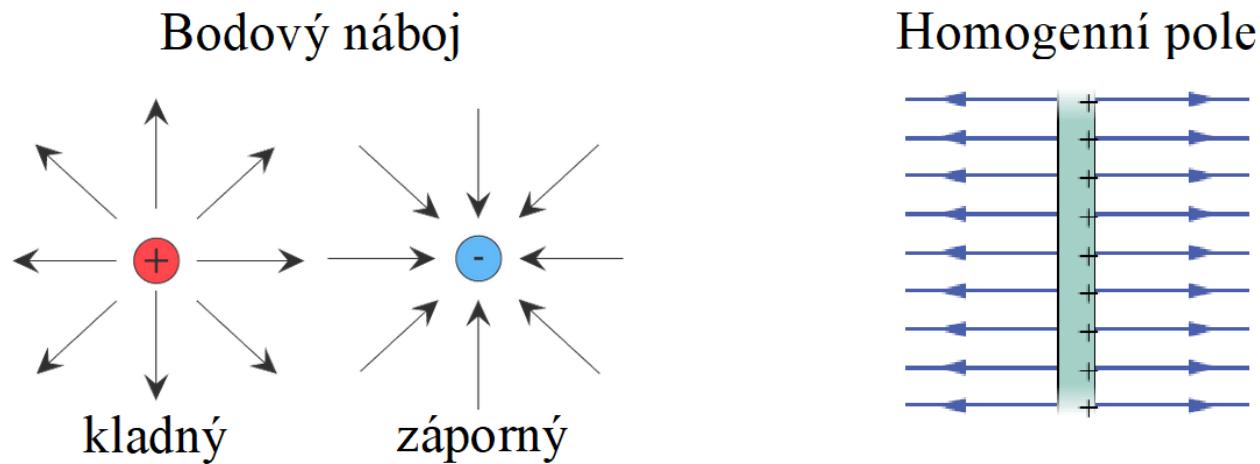
Elektrické siločáry

Elektrostatické pole můžeme graficky znázornit pomocí elektrických siločar. **Elektrické siločáry** jsou myšlené orientované křivky, které mají následující vlastnosti:

- Každým místem (bodem) prostoru (mimo vlastní bodový náboj) prochází jediná siločára – siločáry se tedy nemohou protínat.
- Orientovaná tečna každého bodu siločáry je určena směrem intenzity elektrického pole.
- Siločáry vycházejí z kladných nábojů a vstupují do nábojů záporných.
- Siločáry mohou také začínat a končit v nekonečnu.
- Hustota siločar je úměrná velikosti intenzity elektrického pole.

Elektrické siločáry

Jsou-li siločáry elektrostatičké pole navzájem rovnoběžné přímky a intenzita má ve všech bodech pole stejnou velikost, nazývá se pole **homogenním**.

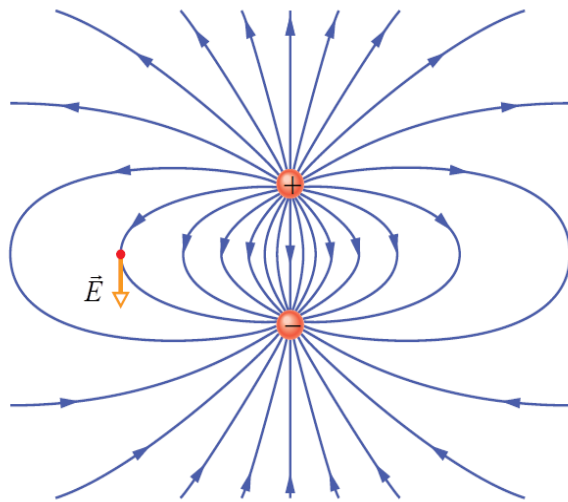


Siločáry elektrostatičké pole kolem bodových nábojů a v blízkosti nabitě roviny.

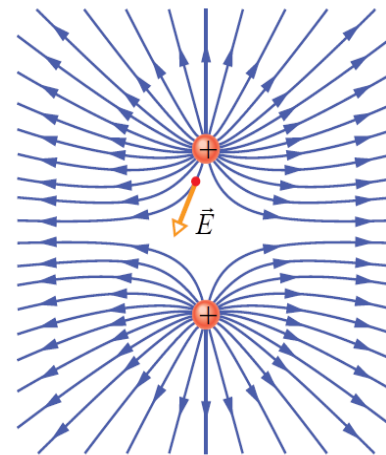
Elektrické siločáry

Nejjednodušším, ale důležitým případem soustavy bodových nábojů je dvojice stejně velikých nábojů opačného znaménka, jejichž vzdálenost d je malá ve srovnání se vzdáleností nábojů od bodů, v nichž určujeme intenzitu pole.

2 stejně velké bodové náboje



opačného znaménka



stejného znaménka

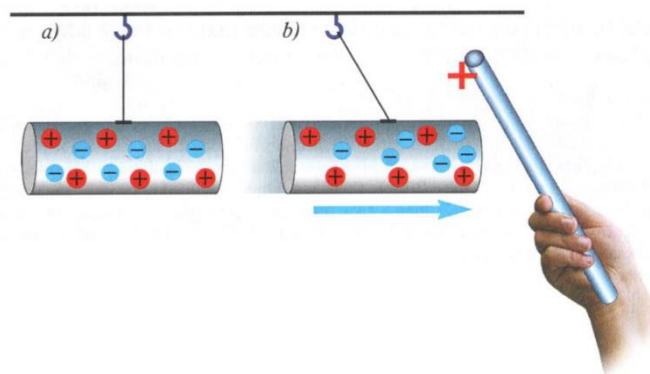
Siločáry pole dvou stejně velikých bodových nábojů.

Vodič v elektrostatickém poli

Vložíme-li do elektrického pole vodič, začnou v něm na volné elektrony působit síly vyvolané elektrickým polem.

Volné elektrony se přesunou ve vodiči tak, že na jednom konci bude převládat záporný náboj a na druhém konci kladný náboj.

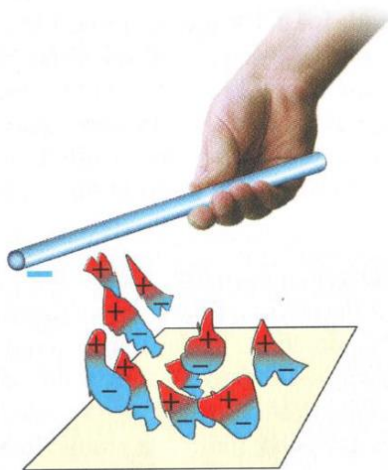
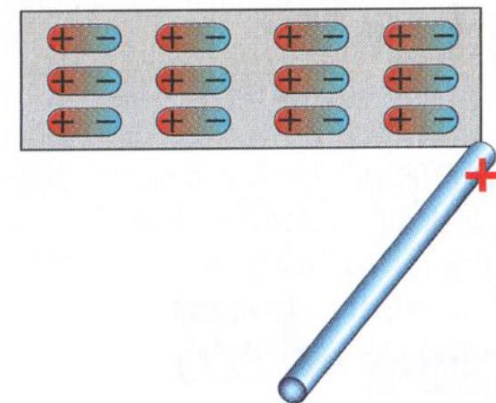
Tento jev se nazývá **elektrostatická indukce**.



Vodič v elektrostatickém poli

Vložíme-li těleso z izolantu do elektrického pole, přesunou se elektricky nabitě částice uvnitř atomů tak, že na jednom konci tělesa se projeví kladný náboj (pól) a na protilehlém konci záporný náboj (pól).

Tento jev se nazývá **polarizace dielektrika**.



Při obou těchto jevech se na straně tělesa, které je blíž k elektricky nabitému tělesu, projeví nesouhlasný náboj.

V důsledku těchto jevů může elektricky nabitě těleso přitahovat i elektricky nenabitá tělesa.

Elektrický potenciál

Náboj Q vytváří v prostoru kolem sebe elektrické pole. Při přemístování náboje Q v elektrickém poli o intenzitě \vec{E} je nutné překonávat sílu o velikosti $F = Q \cdot E$. Přitom se vykoná určitá práce a náboj získá potenciální energii.

Elektrický potenciál nebo potenciál elektrického pole v libovolném bodě je skalární veličina definovaná vztahem

$$\varphi = \frac{E_p}{Q_0},$$

kde E_p je potenciální energie kladného testovacího náboje Q_0 v daném bodě.

Jednotkou potenciálu je volt $[\varphi] = \text{V} = \text{J} \cdot \text{C}^{-1}$.

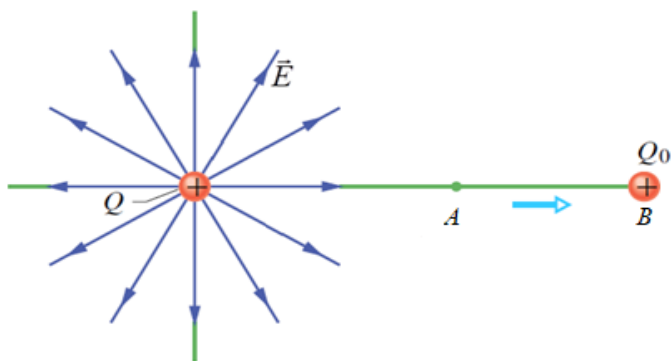
Je-li elektrostatické pole tvořeno soustavou n bodových nábojů, výsledný potenciál lze určit podle principu superpozice.

Elektrické napětí

Rozdíl potenciálů mezi dvěma libovolnými body elektrického pole nazýváme **elektrické napětí** mezi těmito body

$$U_{AB} = \Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B = \frac{W_{AB}}{Q_0},$$

kde W_{AB} je práce vykonaná elektrickou silou při přemístování kladného elektrického náboje Q_0 z bodu A do bodu B .



Napětí mezi dvěma body elektrického pole tedy odpovídá velikosti práce vykonané elektrostatickou silou při přemístění náboje jednotkové velikosti mezi těmito body.

Mezi dvěma body elektrostatického pole je napětí 1 V, jestliže při přemístění náboje 1 C z jednoho bodu do druhého vykonají síly pole práci 1 J.

Elektrické napětí

Elektrické napětí může být kladné, záporné, nebo nulové (záleží na znaménkách náboje Q a práce W).

Jednotkou elektrického napětí je volt [U] = V.

Často užívaná jednotka pro energii elektronů, děr, elementárních částic je **elektronvolt**.

$$1 \text{ eV} = e (1 \text{ V}) = (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (1 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1}) = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

Kondenzátor

Napnutím tětiny luku, natažením pružiny, stlačením plynu, zvednutím knihy a jinými podobnými úkony lze mechanickou energii akumulovat ve formě energie potenciální.

Také energii elektrického pole lze takto uchovat v kondenzátorech.

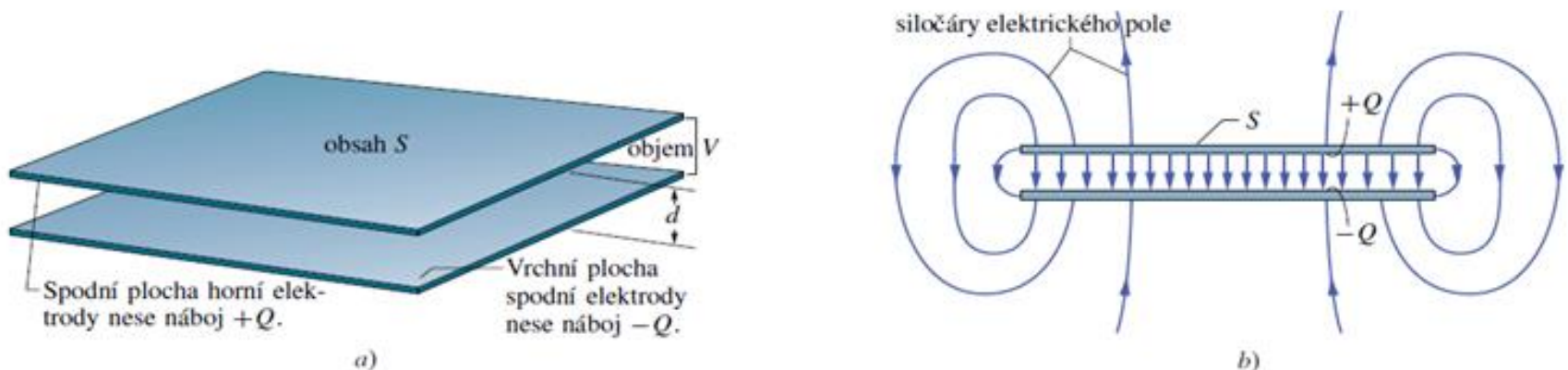


Kondenzátor lze obecně popsat jako dva vodiče, zvané **elektrody**, které jsou blízko u sebe, ale přitom jsou od sebe elektricky izolovány (odděleny). Někdy se jim říká „desky“, a to bez ohledu na jejich skutečný tvar.

Deskový kondenzátor

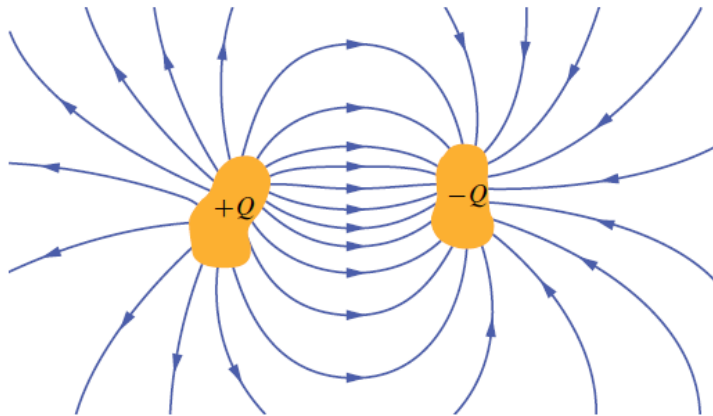
Deskový kondenzátor tvoří dva rovnoběžné rovinné vodiče ve vzdálenosti d , každý o obsahu S .

—||— Znak, kterým znázorňujeme kondenzátor ve schématech, je odvozen právě od tvaru deskového kondenzátoru (užívá se však pro kondenzátory všech geometrických tvarů).



Kondenzátor

Je-li kondenzátor nabitý, mají jeho elektrody stejně velké náboje, ale opačných znamének $+Q$ a $-Q$.



Mluvíme-li tedy o náboji Q kondenzátoru, rozumíme tím absolutní hodnotu náboje jedné z jeho elektrod, tedy $|Q|$, a nikoli celkový náboj, který je roven nule: $(+Q) + (-Q) = 0$.

Mezi oběma elektrodami nabitého kondenzátoru existuje potenciálový rozdíl neboli napětí. Neznáme-li pořadí elektrod, je přirozené brát tento rozdíl (napětí) kladný.

Kapacita kondenzátoru

Náboj Q a napětí U libovolného kondenzátoru jsou navzájem přímo úměrné. Platí tedy

$$Q = CU,$$

kde C je součinitel úměrnosti, který se nazývá **kapacita kondenzátoru**

$$C = \frac{Q}{U}.$$

Kapacita je číselně rovna náboji kondenzátoru při napětí 1 V mezi jeho elektrodami.

Kapacita je vždy kladná a její jednotkou je farad $[C] = \text{F} = \text{C} \cdot \text{V}^{-1}$.

Farad je jednotka pro praxi příliš velká. Častěji proto používáme jednotky menší, zvláště mikروفarad ($1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{F}$), nanofarad ($1 \text{nF} = 10^{-9} \text{F}$) a pikofarad ($1 \text{pF} = 10^{-12} \text{F}$).

Kapacita kondenzátoru

Vložíme-li mezi desky kondenzátoru dielektrikum, kapacita vzroste ε_r -krát, tedy platí

$$C = \varepsilon_r C_0,$$

kde ε_r je relativní permitivita, která charakterizuje dané dielektrikum a $\varepsilon_r \geq 1$.

V prostoru vyplněném dielektrikem platí všechny zákony a vztahy elektrostatiky pokud ε_0 nahradíme $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ (ε je permitivita prostředí).

Důsledek. Intenzita elektrického pole uvnitř dielektrika je ε_r -krát menší než ve vakuu, tedy dielektrikum zeslabuje vnější pole

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon_r}.$$

Kapacita kondenzátoru

Existují různé druhy kondenzátorů: deskový, válcový, kulový.

Pro libovolný kondenzátor je kapacita konstantní a závisí pouze na geometrii obou elektrod kondenzátoru (velikost, tvar, vzájemná vzdálenost) a jeho dielektriku.

Například:

Kapacita deskového vakuového kondenzátoru je

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}.$$

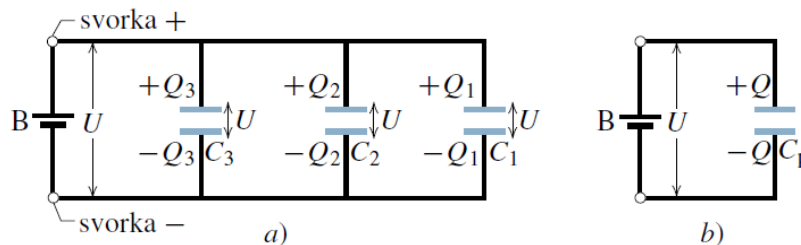
Pro deskový kondenzátor s dielektrikem je kapacita

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d}.$$

Zapojení kondenzátorů

Paralelní spojení (vedle sebe)

Při spojení kondenzátorů paralelně (vedle sebe) je napětí na celé skupině kondenzátorů stejné jako napětí na každém z nich.



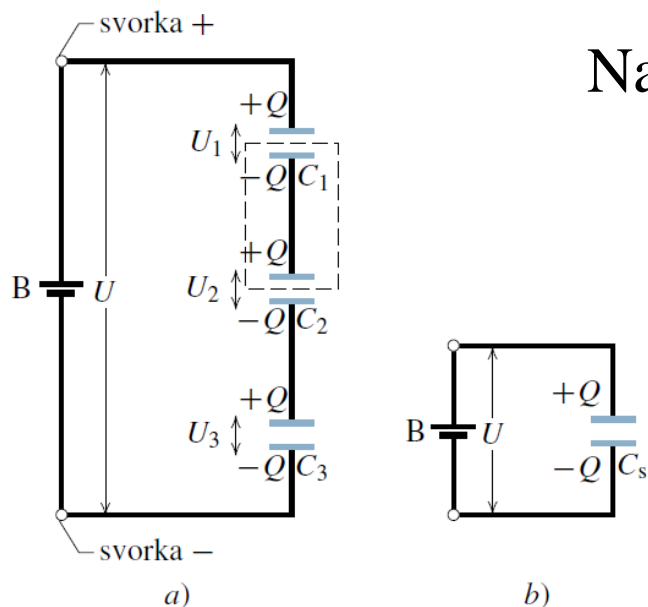
Kapacita soustavy je $C_p = \frac{Q}{U}$,

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_i = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Zapojení kondenzátorů

Sériové spojení (za sebou)

Při spojení kondenzátorů do série (za sebou) je napětí na celé skupině kondenzátorů rovno součtu napětí na jednotlivých kondenzátorech.



Na každém kondenzátoru je stejný náboj Q .

$$\text{Kapacita soustavy je } C_s = \frac{Q}{U},$$
$$\frac{1}{C_s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Elektrická energie nabitého kondenzátoru

Energie nabitého kondenzátoru je soustředěna v elektrickém poli mezi jeho elektrodami.

$$E_{\text{el}} = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}CU^2$$

Vztah platí nezávisle na geometrickém tvaru kondenzátoru.

Poznámka.

Elektrická intenzita \vec{E} je vektor a má velikost E (obojí je bez indexů).

Energie je skalár a má zde vždy nějaký index: E_p , $E_{p,i}$, $E_{p,f}$, E_{el} , $E_{\text{el},i}$, $E_{\text{el},f}$ atd.

Elektrický proud

Elektrické pole působí na nabitou částici elektrickou silou. Je-li částice volná, uvede ji síla do pohybu. Pohyb částic s elektrickým nábojem nazýváme **elektrickým proudem**.

Elektrické proudy se vyskytují všude kolem nás, od obrovských proudů při úderu blesku až k nepatrným proudům v nervových vláknech, které řídí pohyby našich svalů.

Směr proudu je podle dohody stanoven jako směr pohybu **nosičů kladného náboje**. Ve skutečnosti jsou nosiči náboje elektrony.

Elektrický proud je charakterizován skalární fyzikální veličinou stejného názvu, kterou označujeme I .

Elektrický proud

Je-li náboj ΔQ protékající průřezem vodiče za dobu Δt , pak je proud definován vztahem $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$.

Elektrický proud je číselně roven množství náboje, který proteče průřezem vodiče za 1 s.

Jednotkou proudu je základní jednotka SI – ampér $[I] = \text{A} = \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$.

Obecně je proud funkcí času $I = I(t)$. Jestliže velikost proudu je konstantní (nezávislá na čase), jde o stacionární (ustálený) proud.

Pak náboj, který proteče průřezem vodiče během časového intervalu od 0 do t ,

$$Q = I \cdot t.$$

Tedy proud je $I = \frac{Q}{t}$.

Elektrický odpor

Odpor (resistance) je veličina, která charakterizuje možnost průchodu proudu určitou látkou mezi dvěma jejími body, na něž je přiloženo napětí $R = \frac{U}{I}$.

Jednotkou elektrického odporu je ohm $[R] = \Omega = \text{V} \cdot \text{A}^{-1}$.

Pak též platí: $I = \frac{U}{R}$, $U = I \cdot R$.

Součástka, jejíž funkcí je vytvářet v elektrickém obvodu určitý odpor, se nazývá **rezistor** a ve schématech je znázorněna 

Velichina „odpor“ se udává pro konkrétní součástku nebo pro konkrétní uspořádání materiálu.

Vodivost (konduktance) je převrácená hodnota odporu $G = \frac{1}{R}$.

Jednotkou je siemens $[G] = \text{S} = \Omega^{-1}$.

Rezistivita

Rezistivita ρ (pro izotropní materiály) charakterizuje látku z hlediska její schopnosti klást proudu odpor.

Je to veličina lokální, v neizotropních materiálech může být v různých částech daného materiálu obecně rozdílná.

Jednotkou je $[\rho] = \text{V} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m} = \Omega \cdot \text{m}$.

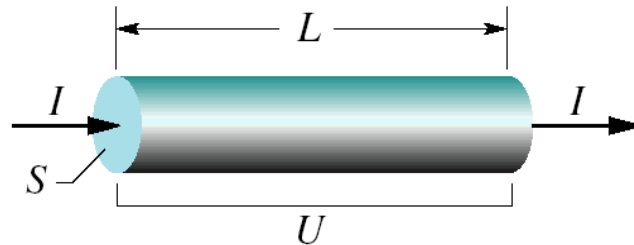
Konduktivita je definována jako převrácená hodnota rezistivity

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

Jednotkou je $[\sigma] = (\Omega \cdot \text{m})^{-1} = \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Výpočet odporu pomocí rezistivity

Odpor (neboli rezistance) je vlastnost objektu (vodiče, rezistoru).
Rezistivita je vlastnost materiálu.



Napětí U přiložené mezi konce vodiče o délce L a průřezu S způsobí, že vodičem prochází proud I .

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

Vztah lze používat pouze pro homogenní izotropní vodič konstantního průřezu.

Ohmův zákon

V současné době je označení “zákon” příliš silné. V době, kdy byl formulován, však povahu zákona měl (pouze homogenní vodivé materiály, nejčastěji kovové).

Odpor je vlastností součástky. Pro danou součástku je odpor konstantní a nezávisí na velikosti ani polaritě přiloženého napětí. Proud protékající součástkou je přiloženému napětí přímo úměrný.

Pro popis situace lze použít vztahy

$$R = \frac{U}{I}, I = \frac{U}{R}, U = I \cdot R.$$

Ohmův zákon je splněn pouze pro součástky vyrobené z homogenních materiálů (vodivých i polovodivých) a navíc jen v určitých rozmezech přiložených napětí či protékajících proudů.

Například: součástka se protékajícím proudem zahřeje a odpor se začne měnit v závislosti na teplotě.

Práce a výkon elektrického proudu

Napětí U na svorkách baterie je stejné jako napětí na svorkách součástky (spotřebiče).

Svorka a má vyšší potenciál než svorka b .

Napětí mezi body a , b je U .

Práce, kterou vykonají síly elektrického pole při přenesení náboje ΔQ spotřebičem, je rovna poklesu elektrické potenciální energie

$$\Delta W = \Delta E_p = U \cdot \Delta Q = U \cdot I \cdot \Delta t.$$

Výkon elektrického proudu se definuje jako rychlost přenosu elektrické energie

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\Delta E_p}{\Delta t} = U \cdot I.$$

Jednotkou je watt $[P] = \text{W} = \text{V} \cdot \text{A}$.

Práce a výkon elektrického proudu

Je-li spotřebičem rezistor o odporu R , přemění se práce ΔW v **Jouleovo teplo** ΔQ_J

$$\Delta Q_J = \Delta W = U \cdot I \cdot \Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t.$$

Rezistor zvyšuje teplotu a stává se tak zdrojem tepelného toku. Tento nevratný proces se nazývá **disipace energie**.

Disipovaný výkon je tedy rychlost disipace energie rezistorem

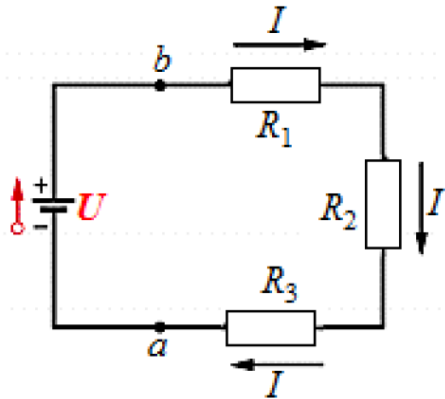
$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Poznámka. Q_J zde znamená fyzikální veličinu teplo, nikoli elektrický náboj.

Zapojení rezistorů

Sériové spojení (za sebou)

Rezistory teče **stejný proud**. Celkové napětí je rovno součtu napětí na jednotlivých rezistorech.



$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3,$$

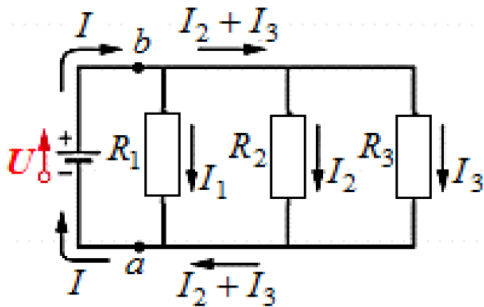
$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{U}{R_s}, \text{ tedy}$$

$$R_s = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Zapojení rezistorů

Paralelní (vedle sebe)

Na rezistorech je **stejné napětí**. Celkový proud je roven součtu proudů jednotlivými rezistory.



$$I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2}, I_3 = \frac{U}{R_3}.$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{U}{R_p},$$

tedy

$$\frac{1}{R_p} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Příklady

V příkladech byly použity tyto hodnoty fyzikálních konstant:

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

permitivita vakua $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$,

relativní permitivita vzduchu $\varepsilon_r \approx 1$.

Příklady

1. Dva elektrické náboje $Q_1 = 8 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ a $Q_2 = -4 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ jsou ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 20 cm. Určete:

- velikost a směr elektrické síly působící na náboj Q_2 ,
- velikost a směr intenzity elektrostatického pole v místě náboje Q_1 .

Řešení:

Na začátku musíme převést jednotky do základních jednotek systému SI: vzdálenost $r = 20 \text{ cm} = 20 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 0,2 \text{ m}$.

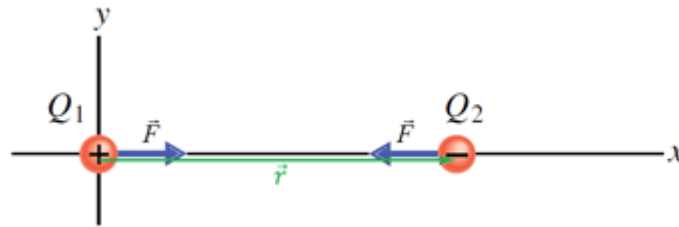
- Pro výpočet síly použijeme Coulombův zákon:

$$F = k \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}.$$

Příklady

Dosadíme zadané veličiny a konstanty:

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}} \frac{|8 \cdot 10^{-8}| |-4 \cdot 10^{-8}|}{0,2^2} \approx 7,19 \cdot 10^{-4} \text{ (N)}.$$



Náboje Q_1 a Q_2 jsou nesouhlasné – kladný a záporný – proto síla působící na náboje je přitažlivá.

Odpověď: a) Velikost síly, kterou na sebe navzájem působí dva bodové náboje, je $7,19 \cdot 10^{-4}$ N.

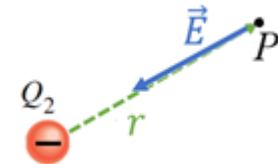
Síla působící na náboj Q_2 má směr k náboji Q_1 (bodové náboje se přitahují).

Příklady

b) Je potřeba určit intenzitu elektrostatického pole v místě náboje Q_1 , proto považujeme náboj Q_1 za testovací, tedy velikost náboje $Q_0 = |Q_1|$.

Podle definičního vztahu velikost intenzity je

$$E = \frac{F}{Q_0} = \frac{k \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}}{|Q_1|} = k \frac{|Q_2|}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_2|}{r^2}.$$



Dosadíme zadané veličiny a konstanty:

$$E = \frac{1}{4\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}} \frac{|-4 \cdot 10^{-8}|}{0,2^2} \approx 8987,74 \text{ (V/m)}.$$

Odpověď: b) Velikost intenzity elektrostatického pole v místě náboje Q_1 je $8987,74 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.

Směr vektoru intenzity elektrického pole buzeného záporným nábojem Q_2 v bodě P (v místě, kde se nachází náboj Q_1) je směrem k náboji Q_2 .

Příklady

2. Dva bodové elektrické náboje ve vzájemné vzdálenosti 11,0 cm působí na sebe ve vakuu stejnou silou jako v terpentýnu ve vzdálenosti 7,4 cm. Určete relativní permitivitu terpentýnu.

Řešení:

Převédeme jednotky zadaných veličin do základních jednotek systému SI:

$$r_1 = 11 \text{ cm} = 11 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 0,11 \text{ m},$$

$$r_2 = 7,4 \text{ cm} = 7,4 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 0,074 \text{ m}.$$

Pomocí Coulombova zákona zapíšeme působící síly:

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r_1^2} \quad \text{pro náboje ve vakuu a}$$

$$F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \frac{|Q_1||Q_2|}{r_2^2} \quad \text{pro náboje v terpentýnu.}$$

Příklady

Podle zadání úkolu náboje působí na sebe stejnou silou ve vakuu a v terpentýnu $F_1 = F_2$, tedy

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r_1^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \frac{|Q_1||Q_2|}{r_2^2}.$$

Po matematické úpravě dostaneme rovnici $\frac{1}{r_1^2} = \frac{1}{\epsilon_r} \frac{1}{r_2^2}$

a vyjádříme z toho permitivitu terpentýnu

$$\epsilon_r = \frac{r_1^2}{r_2^2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 = \left(\frac{0,11}{0,074}\right)^2 = \left(\frac{55}{37}\right)^2 \approx 2,21.$$

Relativní permitivita je bezrozměrná veličina.

Odpověď: Relativní permitivita terpentýnu je 2,21.

Neřešené příklady

3. Intenzita elektrického pole ve vakuu ve vzdálenosti 10 cm od bodového náboje má hodnotu $4 \cdot 10^{-5} \text{ V.m}^{-1}$. Určete:

a) velikost náboje,

b) hodnotu relativní permitivity oleje, v němž tentýž elektrický náboj vyvolá ve vzdálenosti 10 cm elektrické pole o intenzitě $2 \cdot 10^{-6} \text{ V.m}^{-1}$.

[a) $Q = 4,45 \cdot 10^{-17} \text{ C}$, b) $\epsilon_r = 20$]

4. Ve vzdálenosti 10 cm od náboje Q_1 působí na náboj $Q_2 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ síla $1 \cdot 10^{-2} \text{ N}$. Určete:

a) velikost intenzity elektrostatického pole v tomto místě,

b) velikost náboje Q_1 , který toto pole vytvořil.

[a) $E = 1 \cdot 10^6 \text{ V.m}^{-1}$, b) $Q_1 = 1,11 \cdot 10^{-6} \text{ C}$]

Neřešené příklady

5. Určete vzájemnou vzdálenost dvou bodových nábojů $10 \mu\text{C}$, které na sebe působí ve vakuu silou o velikosti 10 N .

[30 cm]

6. Určete velikost bodového náboje Q_1 , který působí na bodový náboj $Q_2 = 1 \mu\text{C}$ ve vzdálenosti 3 cm elektrickou silou o velikosti 1 N . Náboje jsou

a) ve vakuu,

b) v petroleji o relativní permitivitě $\epsilon_r = 2$.

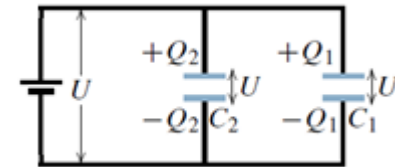
[a) $Q_1 = 0,1 \mu\text{C}$, b) $Q_1 = 0,2 \mu\text{C}$]

Příklady

7. Kondenzátory s kapacitou $C_1 = 2 \mu\text{F}$ a $C_2 = 3 \mu\text{F}$ jsou připojeny paralelně. Na kondenzátoru s kapacitou C_1 je náboj $Q_1 = 6 \mu\text{C}$.

Určete:

- výslednou kapacitu kondenzátorů,
- napětí a náboj na druhém kondenzátoru.



Řešení:

a) Při spojení kondenzátorů paralelně (vedle sebe) je napětí na celé skupině kondenzátorů stejné jako napětí na každém z nich.

Tedy výsledná kapacita je

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_i = C_1 + C_2 = 2 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ (F)}.$$

Příklady

b) Pro náboj na libovolném kondenzátoru platí vztah $Q = CU$, tedy $Q_1 = C_1U_1$ a $Q_2 = C_2U_2$.

Pak napětí na prvním kondenzátoru je

$$U_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{6 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}} = 3 \text{ (V)}.$$

Potom platí $U_1 = U_2 = 3 \text{ V}$.

Náboj na druhém kondenzátoru lze vypočítat

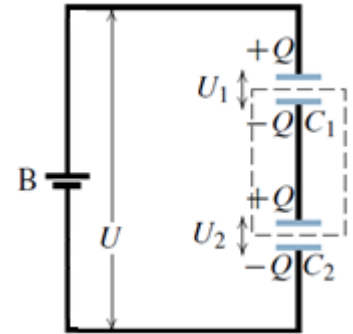
$$Q_2 = C_2U_2 = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 3 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ (C)}.$$

Odpověď: výsledná kapacita paralelně připojených kondenzátorů je $5 \mu\text{F}$, napětí na druhém kondenzátoru je 3 V , náboj na druhém kondenzátoru $9 \mu\text{C}$.

Příklady

8. Na zdroj stejnosměrného napětí 30 V jsou do série zapojeny dva kondenzátory s kapacitami 12 μF a 24 μF . Určete:

- výslednou kapacitu,
- náboje na deskách kondenzátorů,
- poměr napětí na jednotlivých kondenzátorech,
- celkovou energii elektrických polí kondenzátorů.



Řešení:

a) Při spojení kondenzátorů do série (za sebou) je napětí na celé skupině kondenzátorů rovno součtu napětí na jednotlivých kondenzátorech.

Tedy výsledná kapacita je
$$\frac{1}{C_s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{C_2 + C_1}{C_1 \cdot C_2}.$$

Příklady

$$\text{Potom } C_s = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot 24 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot 10^{-6} + 24 \cdot 10^{-6}} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ (F)}.$$

b) Na každém kondenzátoru je stejný náboj Q , proto náboje na deskách kondenzátorů určíme dosazením známých hodnot do vztahu:

$$Q = C_s U = 8 \cdot 10^{-6} \cdot 30 = 240 \cdot 10^{-6} \text{ (C)}.$$

c) Napětí na jednotlivých kondenzátorech:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{240 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot 10^{-6}} = 20 \text{ (V)},$$

$$U_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{240 \cdot 10^{-6}}{24 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ (V)}.$$

$$\text{Pak } \frac{U_1}{U_2} = \frac{20 \text{ V}}{10 \text{ V}} = 2:1.$$

Příklady

d) Celková energie elektrických polí kondenzátorů je

$$E_{\text{el}} = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}CU^2.$$

Dosadíme zadané veličiny

$$E_{\text{el}} = \frac{1}{2} \cdot 240 \cdot 10^{-6} \cdot 30 = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ (J)}.$$

Odpověď: a) výsledná kapacita sériově spojených kondenzátorů je 8 μF , b) náboje na deskách kondenzátorů jsou 240 μC , c) poměr napětí na jednotlivých kondenzátorech je 2:1, d) celková energie elektrických polí kondenzátorů je 3,6 mJ.

Příklady

9. Kondenzátory s kapacitami $6 \mu\text{F}$ a $4 \mu\text{F}$ jsou spojeny sériově a paralelně k nim je připojen kondenzátor s kapacitou $2 \mu\text{F}$. Určete jejich výslednou kapacitu.

Řešení:

Pro sériově spojené kondenzátory platí

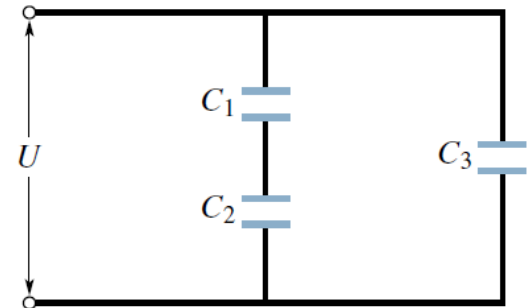
$$\frac{1}{C_s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{C_2 + C_1}{C_1 \cdot C_2}, \text{ tj.}$$

$$C_s = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{6 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-6}} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ (F).}$$

Pro paralelně spojené kondenzátory platí

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_i = C_s + C_3 = 2,4 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6} = 4,4 \cdot 10^{-6} \text{ (F).}$$

Odpověď: výsledná kapacita kondenzátorů je $4,4 \mu\text{F}$.



Příklady

10. Ke spotřebitelské síti 230 V je připojeno pět sériově spojených stejných žárovek. Určete:

- a) jaké napětí naměříme na každé z nich,
- b) jaký je celkový odpor žárovek, je-li odpor jedné žárovky 24Ω ,
- c) jak velký proud prochází tímto elektrickým obvodem.

Řešení:

a) Žárovky považujeme za rezistory, tj. použijeme vztah pro sériové zapojení rezistorů. Přitom platí, že všemi rezistory teče stejný proud a celkové napětí je rovno součtu napětí na jednotlivých rezistorech.

Tedy na každé z žárovek naměříme napětí

$$U^* = \frac{U}{n} = \frac{230}{5} = 46 \text{ (V)}.$$

Příklady

b) Celkový odpor sériově spojených žárovek je

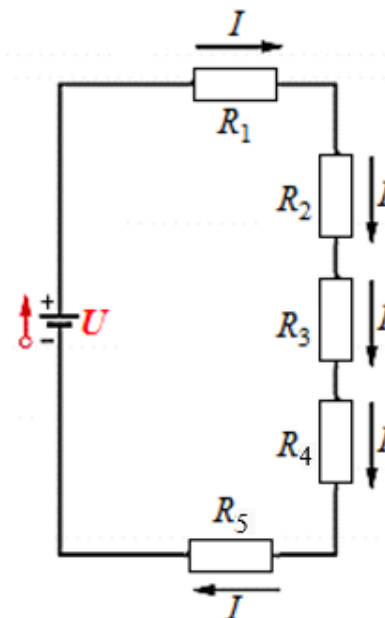
$$R_s = \sum_{i=1}^{n=5} R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_5,$$

Žárovky jsou stejné, tj. mají stejný odpor, takže

$$R_s = n \cdot R = 5 \cdot 24 = 120 \text{ } (\Omega).$$

c) Pomocí Ohmova zákona vypočítáme proud, který prochází elektrickým obvodem:

$$I = \frac{U}{R_s} = \frac{230}{120} \approx 1,92 \text{ (A)}.$$



Odpověď: a) napětí na každé žárovce je 46 V, b) celkový odpor žárovek zapojených do série je 120 Ω , c) proud v obvodu je 1,92 A.

Neřešené příklady

11. Dva kondenzátory s kapacitami $2,0 \mu\text{F}$ a $4,0 \mu\text{F}$ jsou připojeny paralelně ke zdroji napětí 300 V . Určete celkovou energii elektrických polí obou kondenzátorů.

[$0,27 \text{ J}$]

12. Čtyři rezistory o odporu $18,0 \Omega$ jsou připojeny paralelně k ideální $25,0 \text{ V}$ baterii. Určete, jak velký proud prochází baterií.

[$5,56 \text{ A}$]

13. Vodičem o odporu $7,5 \Omega$ prošel náboj 54 C za $1,5$ minuty. Určete napětí zdroje, k němuž byl vodič připojen.

[$4,5 \text{ V}$]

14. Dva kondenzátory o kapacitách $0,2 \mu\text{F}$ a $0,5 \mu\text{F}$ jsou připojeny ke zdroji napětí 1 kV a) sériově, b) paralelně. Určete energii soustav kondenzátorů při těchto zapojeních.

[a) $71,4 \text{ mJ}$, b) $0,35 \text{ J}$]

Literatura

1. Svoboda, E. a kolektiv. Přehled středoškolské fyziky. SPN, Praha, 1991.
2. Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. Fyzika, VUTIUM, Brno, 2000.
3. Uργοšik, B. Fyzika, STNL, Praha, 1987.
4. Lepil, O., Bednařik, M., Hýblová, R. Fyzika pro střední školy. Prometheus, Praha, 1993.
5. Lepil, O., Houdek, V., Pecho, A. Fyzika pro III. Ročník gymnázií, SPN, Praha, 1986.
6. Hradilová, E., Uhdeová, N. Fyzika Příjímací zkoušky na vysoké školy, VUT v Brně, Brno, 2003.
7. Mechlová, E., Košťál, K. a kol. Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz fyziky. Prometheus, Praha, 2001.

Děkujeme za pozornost



**Spolufinancováno
Evropskou unií**



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY