Laboratorní úloha

Měření permitivity dielektrik

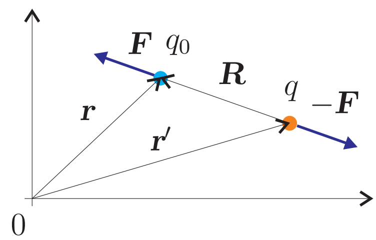
1.1 Úkol měření

- Změřte relativní permitivitu jednoho, nebo dvou dielektrických vzorků.
- Pro každý vzorek (pokaždé do jednoho grafu) vyneste závislost náboje kondenzátoru na napětí v případě, kdy mezi deskami kondenzátoru je a není umístěn dielektrický vzorek.

1.2 Teoretický úvod

1.2.1 Coulombův zákon

Nechť se ve vakuu v místě s polohovým vektorem $\boldsymbol{r}'$ nachází (zdrojová) bodová částice s elektrickým nábojem q a v místě s polohovým vektorem $\boldsymbol{r}$ jiná (testovací) bodová částice s nábojem q_0. Podle Coulombova zákona na testovací částici působí elektrostatická síla



$$\boldsymbol{F} = \frac{q_0 q}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\boldsymbol{R}}{|\boldsymbol{R}|^3}, \tag{1.1}$$

kde $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}'$ je polohový vektor testovacího náboje vzhledem k náboji zdrojovému. V soustavě SI je jednotkou náboje coulomb (C), veličina ε_0 se nazývá elektrická konstanta (permitivita vakua) a platí pro ni

$$\varepsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi\{c\}^2} \mathrm{C^2N^{-1}m^{-2}} = 8{,}854\cdots \times 10^{-12}\,\mathrm{C^2N^{-1}m^{-2}},$$

kde $\{c\}$ je číselná hodnota rychlosti světla ve vakuu v metrech za sekundu[1]. V případě, že oba náboje mají stejné znaménko, míří vektory $\boldsymbol{F}$ a $\boldsymbol{R}$ stejným směrem (náboje se odpuzují), v případě, kdy náboje mají různá znaménka, míří vektory $\boldsymbol{F}$ a $\boldsymbol{R}$ směrem opačným a náboje se navzájem přitahují. Podle zákona akce a reakce na částici s nábojem q působí síla $-\boldsymbol{F}$.

Budeme-li nyní měnit polohu testovacího náboje v prostoru (změnou polohového vektoru $\boldsymbol{r}$), bude se měnit i velikost a směr síly na něj působící. Velikost a směr této síly rovněž souvisí s velikostí a znaménkem testovacího náboje q_0. Abychom mohli jednoduše popsat silové působení na jakýkoliv testovací náboj, zavádíme tzv. intenzitu elektrického pole definičním vztahem

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q_0},$$

[1]Rychlost světla ve vakuu je *definována* přesnou hodnotou $c = 299\,792\,458\,\mathrm{m\,s^{-1}}$.

která se tedy číselně rovná síle působící na jednotkový náboj[2]. Vektor $\boldsymbol{E}$ má stejný směr, jako síla $\boldsymbol{F}$ působící na kladný náboj q_0. Říkáme pak, že náboj q kolem sebe vytváří elektrostatické pole s intenzitou $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r})$. V případě jediného zdrojového náboje dosazením do vzorce (1.1) dostaneme

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'}{|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'|^3}.$$

Pokud by zdrojových bodových nábojů bylo v prostoru rozloženo více, můžeme pro intenzitu elektrického pole, které ve svém okolí vytváří, podle principu superpozice psát

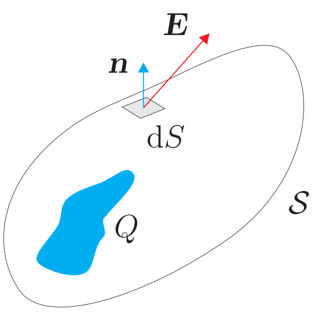
$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{N}\frac{q_i\cdot(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'_i)}{|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'_i|^3}, \tag{1.2}$$

kde $\boldsymbol{r}'_i$ jsou polohové vektory jednotlivých nábojů q_i.

V mnoha praktických případech[3] jsou náboje rozmístěny v prostoru tak hustě, že jejich příspěvky není možné sčítat pomocí sumy. V těchto případech zavádíme tzv. hustotu náboje (délkovou, plošnou, objemovou) a „sčítáme“ pomocí integrálu, jako by byl náboj spojitou veličinou. Uveďme příklad. Nechť se náboje nacházejí na nějaké ploše $\mathcal{S}$. Tuto plochu rozdělíme na jednotlivé elementární plošky $\mathrm{d}S'$, kde každá bude mít elementární náboj $\mathrm{d}q = \sigma\mathrm{d}S'$, kde $\sigma = \sigma(\boldsymbol{r}')$ je plošná hustota náboje (náboj vztažený na jednotku plochy). Pro intenzitu elektrického pole v místě $\boldsymbol{r}$ pak dostaneme

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\iint_{\mathcal{S}}\frac{\sigma(\boldsymbol{r}')\cdot(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}')}{|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'|^3}\mathrm{d}S'. \tag{1.3}$$

1.2.2 Gaussův zákon

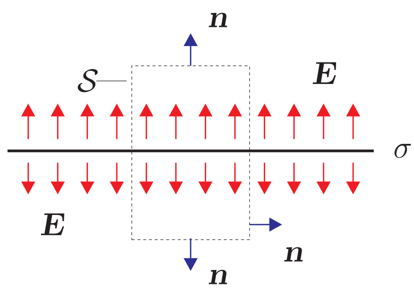


Výpočet integrálů typu (1.3) může být v mnoha případech dosti komplikovaný. Někdy však lze k vypočtu intenzity elektrického pole využít Gaussova zákona, který má tvar

$$\oiint_{\mathcal{S}}\boldsymbol{E}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S} = \frac{Q}{\varepsilon_0}. \tag{1.4}$$

Vzorec (1.4) říká, že tok vektoru intenzity elektrického pole libovolnou uzavřenou (Gaussovou) plochou $\mathcal{S}$ je roven podílu celkového náboje Q uvnitř této plochy a elektrické konstanty. Elementární vektor $\mathrm{d}\boldsymbol{S} = \boldsymbol{n}\,\mathrm{d}S$ je orientovaný jednotkovým vektorem $\boldsymbol{n}$ kolmým k plošce $\mathrm{d}S$ směrem ven z uzavřené plochy $\mathcal{S}$.

Gaussův zákon je pro elektrostatické úlohy ekvivalentní k zákonu Coulombovu. K výpočtu intenzity elektrického pole jej lze pohodlně využít v případech, kdy rozložení náboje vykazuje symetrii (rovinnou, válcovou, nebo kulovou). Uveďme dva jednoduché příklady.



Uvažujme nekonečnou, rovnoměrně nabitou rovinnou plochu s plošnou hustotou náboje $\sigma > 0$. Význačným směrem k rovinné ploše je kolmice k ní, takže vektor intenzity elektrického pole musí

[2] Z definičního vztahu vyplývá, že jednotkou intenzity el. pole v soustavě SI je newton na coulomb ($\mathrm{N\,C^{-1}}$), častěji se však používá volt na metr ($\mathrm{V\,m^{-1}}$), který má stejnou velikost ($1\,\mathrm{N\,C^{-1}} = 1\,\mathrm{V\,m^{-1}}$).

[3] Přesněji řečeno, v drtivé většině případů…

mířit kolmo k rovinné ploše. Jelikož je nabita kladně, bude jistě mířit směrem od ní. Za Gaussovu integrační plochu si zvolíme povrch válce, který rovina protíná a jehož podstavy jsou rovnoběžné s nabitou rovinou. Jestliže plocha podstavy tohoto válce je ΔS, pro celkový náboj uzavřený integrační plochou platí $Q = \sigma \Delta S$. Pro plošný integrál ve vzorci (1.4) můžeme psát

$$\oiint_{\mathcal{S}} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \iint_{\text{podstavy}} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} + \iint_{\text{plášť}} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}. \tag{1.5}$$

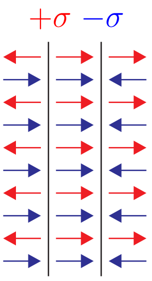
Jelikož na plášti všude platí $\boldsymbol{E} \perp (\boldsymbol{n}\,\mathrm{d}S)$, je druhý z integrálů (1.5) nulový. Na podstavách má vektor intenzity elektrického pole směr vnější normály a (z důvodu symetrie) je jeho velikost konstantní, takže platí

$$\oiint_{\mathcal{S}} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \iint_{\text{podstavy}} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \iint_{\text{podstavy}} E \mathrm{d}S = E \iint_{\text{podstavy}} \mathrm{d}S = 2E\Delta S.$$

Dosazením do Gaussova zákona tak dostaneme

$$2E\Delta S = \frac{\sigma \Delta S}{\varepsilon_0} \qquad \Rightarrow \qquad E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}. \tag{1.6}$$

Velikost vektoru intenzity elektrického pole je tedy konstantní, se vzdáleností od nabité roviny neklesá. Tento výsledek může ne první pohled vypadat paradoxně, je zapříčiněn skutečností, že uvažujeme nekonečnou rovinu (snekonečným nábojem). V realističtějším případě, kdy bychom uvažovali omezenou rovinnou plochu, by výsledek (1.6) platil přibližně pouze v její těsné blízkosti.

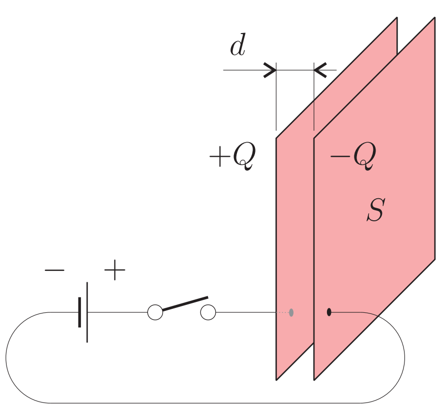


Uvažujme nyní případ dvou planparalelních rovin, které jsou rovnoměrně nabity plošnými hustotami náboje stejné velikosti, ale opačného znaménka. Každá z rovin ve svém okolí vytváří intenzitu elektrického pole, jejíž velikost je dána vztahem (1.6), v případě kladně nabité roviny míří vektor intenzity od roviny, v případě záporně nabité roviny míří směrem k ní. To znamená (viz obrázek), že mezi rovinami se příspěvky navzájem sčítají a vně odečítají. Mezi rovinami pro velikost intenzity elektrického pole platí

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}, \tag{1.7}$$

vně je nulová.

1.2.3 Kondenzátor, kapacita



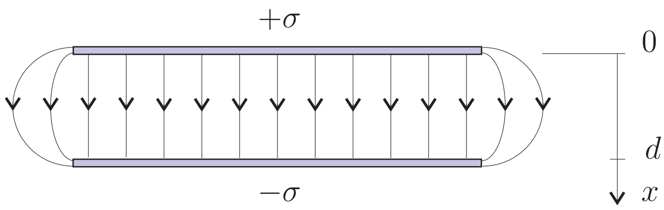
Kondenzátor je elektronická součástka, ve které je možné uchovávat energii ve formě elektrického pole. V praxi se nejčastěji sestává ze dvou vodičů (elektrod), které jsou umístěny blízko sebe, ale jsou navzájem izolovány. Může se jednat o dvě planparalelní desky o ploše S umístěné ve vzájemné vzdálenosti d, viz obrázek, pak hovoříme o tzv. deskovém kondenzátoru.

Připojíme-li k takovéto soustavě baterii, viz obrázek, volné nosiče náboje (záporně nabité elektrony) jsou přitahovány ke kladné svorce baterie a jsou tak odčerpávány z levé desky kondenzátoru, kde zůstávají kladně nabité ionty krystalové mříže, ta se tak oproti pravé desce začne kladně nabíjet. Tím v kondenzátoru začíná vznikat elektrostatické pole, které k pravé desce přitahuje elektrony ze záporné svorky baterie. Celý proces probíhá tak dlouho, dokud se kondenzátor nenabije na napětí baterie U. Na levé desce je pak nahromaděný kladný náboj Q, na pravé pak záporný náboj $-Q$. Charakteristickou vlastností kondenzátoru je kapacita, která udává vzájemnou souvislost napětí a náboje nahromaděného na kondenzátoru[4]. Vyšetříme ji pro případ výše zmíněného deskového kondenzátoru.

Bude-li vzdálenost nabitých desek vzhledem k jejich rozměrům velmi malá, dá se předpokládat, že náboj se na nich rozmístí víceméně rovnoměrně, čímž mezi deskami vznikne víceméně homogenní elektrostatické pole, pro velikost jeho intenzity bude zhruba platit vztah (1.7).

Elektrické napětí (mezi body A a B) je definováno tak, že se číselně rovná práci, kterou vykoná elektrostatické pole při přemístění jednotkového náboje z bodu A do bodu B a platí pro něj

$$U = \int_{\boldsymbol{r}_\mathrm{A},\mathcal{L}}^{\boldsymbol{r}_\mathrm{B}} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r}. \tag{1.8}$$



Jelikož elektrostatické pole je pole konzervativní, nezávisí vykonaná práce na konkrétní trajektorii $\mathcal{L}$. Integrál (1.8) tedy budeme počítat podél silokřivky od kladně nabité elektrody k elektrodě záporně nabité, takže dostaneme

$$U = \int_0^d E\,\mathrm{d}x = \int_0^d \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\,\mathrm{d}x = \frac{\sigma d}{\varepsilon_0} = \frac{d}{\varepsilon_0 S} Q, \tag{1.9}$$

kde jsme využili vztahu pro plošnou hustotu náboje $\sigma = Q/S$. Ze vzorce (1.9) je patrné, že mezi napětím mezi elektrodami a nahromaděným nábojem je přímá úměra. Konstantě úměrnosti říkáme kapacita kondenzátoru, zavádíme ji definičním vztahem

$$C = \frac{Q}{U} \tag{1.10}$$

a číselně se tedy jedná o náboj nahromaděný na kondenzátoru při potenciálovém rozdílu 1 V mezi elektrodami. Jednotkou kapacity je farad = coulomb/volt (F). V případě deskového kondenzátoru tedy platí

$$C_\mathrm{vak} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}, \tag{1.11}$$

kde index „vak“ naznačuje, že mezi elektrodami uvažujeme bezmateriálové prostředí (vakuum). Kapacita deskového kondenzátoru je tedy tím větší, čím větší plochu mají elektrody a čím jsou k sobě blíž. Vzorec (1.11) platí jen přibližně, při jeho odvození bylo využito předpokladu, že náboj na deskách je rozložen rovnoměrně a že elektrické pole mezi nimi je homogenní. Ve skutečnosti na okrajích desek dochází k tzv. rozptylovým jevům, vzorec (1.11) platí s přesností cca 20 % pokud $d/\sqrt{S} \sim 0{,}1$ a s přesností cca 2 % pokud $d/\sqrt{S} \sim 0{,}01$.

Kapacitu kondenzátoru lze kromě geometrického uspořádání ovlivňovat vložením vhodného nevodivého materiálu mezi jeho elektrody.

1.2.4 Dielektrika

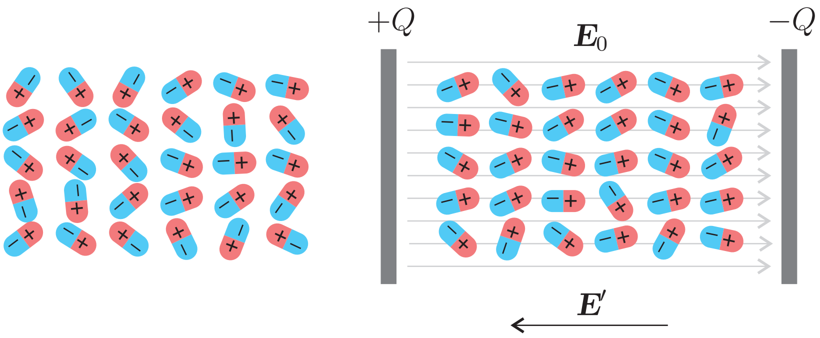
Dielektrikum je nevodič[5], který má schopnost polarizace. Z hlediska atomové či molekulární struktury můžeme dielektrika rozdělit do dvou typů.

[4] Pozornému čtenáři asi neuniklo, že celkový náboj kondenzátoru je nulový, neboť $Q + (-Q) = 0$. V tomto případě se nábojem kondenzátoru myslí absolutní hodnota náboje na jedné z desek.

[5] Díky materiálové struktuře se v něm nemohou volné nosiče náboje pod vlivem elektrického pole pohybovat na příliš velké vzdálenosti.

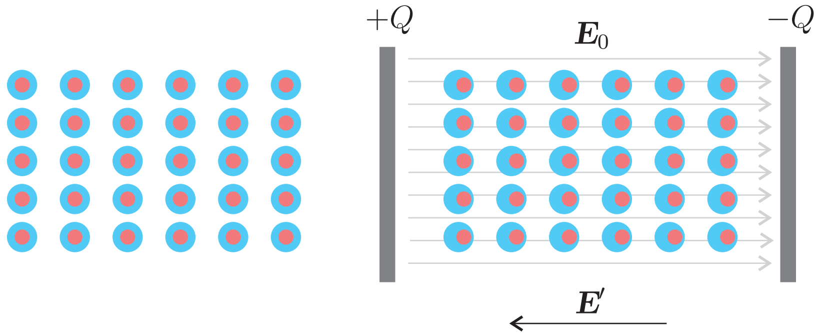
Polární dielektrika

Molekuly polárních dielektrik se vyznačují tím, že i bez přítomnosti vnějšího elektrického pole mají nenulový elektrický dipólový moment. To znamená, že i když je molekula celkově elektricky neutrální, kladný a záporný náboj je v ní rozmístěn nesymetricky, molekula je na jednom konci „kladněji“ a na druhém „záporněji“ nabita. Typickým představitelem polárního dielektrika je voda. Bez přítomnosti vnějšího elektrického pole jsou jednotlivé molekuly orientovány zcela náhodně. Přiložením vnějšího elektrického pole s intenzitou $\boldsymbol{E}_0$ dochází k jejich natáčení ve směru vnějšího pole. Protože molekuly vykonávají neustálý tepelný pohyb, nejsou orientovány zcela, orientace je tím úplnější, čím silnější je vnější elektrické pole a čím nižší je teplota dielektrika. Uspořádané molekuly v dielektriku vytváří přídavné elektrické pole $\boldsymbol{E}'$, které u izotropních dielektrik míří opačným směrem, nežli pole vnější. Pro celkové elektrické pole v dielektriku pak platí $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 + \boldsymbol{E}'$.



Nepolární dielektrika

Bez ohledu na to, zda mají či nemají vlastní nenulový dipólový moment, získávají atomy a molekuly dielektrika ve vnějším elektrickém poli indukovaný dipólový moment. Ten vzniká posunutím středu oblasti kladného náboje ve směru vnějšího elektrického pole a středu oblasti náboje záporného ve směru opačném. Tím opět v dielektriku vzniká přídavné elektrické pole o intenzitě $\boldsymbol{E}'$, které míří opačným směrem nežli pole vnější o intenzitě $\boldsymbol{E}_0$ a pro celkové pole tak opět platí $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 + \boldsymbol{E}'$. Projevy indukovaných dipólových momentů jsou oproti projevům dipólových momentů vlastních výrazně slabší. Typickým představitelem nepolárních dielektrik jsou inertní plyny, nebo například H_2, O_2.



1.2.5 Kondenzátor s dielektrikem

Vložíme-li mezi elektrody kondenzátoru dielektrikum, dojde po jeho nabití k polarizaci dielektrika. Díky zpolarizování nemá intenzita elektrického pole velikost E_0, ale $E = E_0 - E'$. Pro dielektrika zavádíme relativní permitivitu ε_r jako podíl

$$\varepsilon_\mathrm{r} = \frac{E_0}{E} = \frac{E_0}{E_0 - E'},$$

vyjadřující, kolikrát klesne velikost intenzity elektrického pole přítomností dielektrika oproti případu bezmateriálového prostředí (vakua).

Provedeme-li výpočet napětí mezi deskami kondenzátoru (1.9) s dielektrikem (kam místo E dosadíme E/ε_r), dostaneme

$$U = \frac{d}{\varepsilon_0 \varepsilon_\mathrm{r} S} Q,$$

pro kapacitu tak platí

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\mathrm{r} S}{d}. \tag{1.12}$$

Veličinu $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_\mathrm{r}$ nazýváme absolutní permitivitou dielektrika. Pro mnoho dielektrik a nepříliš silná elektrická pole je velikost intenzity E' přímo úměrná velikosti intenzity E_0 a relativní permitivita je materiálovou konstantou[6]. Porovnáním vzorců (1.11) a (1.12) vidíme, že platí

$$C = \varepsilon_\mathrm{r} C_\mathrm{vak}, \tag{1.13}$$

vložením dielektrika se kapacita kondenzátoru oproti případu bezmateriálového prostředí zvětšuje ε_r-krát.

Materiál	ε_r [–]
vakuum	(přesně) 1
vzduch	1,000 54
polystyren	2,3–2,5
teflon	2–2,2
plexisklo	2,8–3,2
PVC	3,4–4
sklo	4–8
slída	6–7
křemík	11,7
voda (20 °C)	80,4

Tabulka 1.1: Relativní permitivity některých látek.

1.3 Experiment

1.3.1 Experimentální sestava

Obrázek 1.1: Uspořádání experimentu: $\boxed{1}$ – voltmetr, $\boxed{2}$ – referenční kondenzátor, $\boxed{3}$ – měřicí zesilovač, $\boxed{4}$ – měřicí deskový kondenzátor (s vloženým dielektrickým vzorkem), $\boxed{5}$ – zdroj vysokého napětí, $\boxed{6}$ – ochranný rezistor.

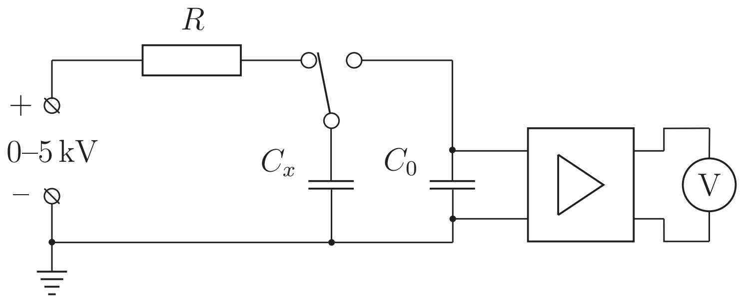
Experimentální sestava je znázorněna na obrázku 1.1. Relativní permitivita se určuje tak, že měřený vzorek se vkládá do měřicího kondenzátoru $\boxed{4}$, změří se jeho kapacita, poté se změří kapacita ještě bez vzorku a k výpočtu se použije vztah (1.13)[7]. Kapacitu kondenzátoru (ať už se vzorkem nebo bez), je možné určit proměřením lineární závislosti mezi nahromaděným nábojem a napětím na elektrodách, kapacita je směrnice závislosti $Q(U)$, kde napětí U se nastavuje na VN zdroji $\boxed{5}$. Princip určení náboje je schematicky naznačen na obrázku 1.2.

[6] V případě střídavých elektrických polí je třeba brát v úvahu, že relativní permitivita je funkcí kmitočtu.

[7] Relativní permitivita vzduchu (viz tabulka 1.1) je blízká jedné, náhrada bezmateriálového prostředí vzduchem v rámci tohoto experimentu nezpůsobuje měřitelnou systematickou chybu.

Nejprve se měřicí kondenzátor o neznámé kapacitě C_x nabije přes ochranný rezistor s odporem $10\,\mathrm{M\Omega}$ na požadované napětí U (nastavené na zdroji). Tím se na něm nahromadí (zatím neznámý) náboj

$$Q = C_x U. \tag{1.14}$$



Obrázek 1.2: Uspořádání experimentu (schematicky).

Poté se přepnutím přepínače měřený kondenzátor odpojí od zdroje VN a připojí se paralelně k referenčnímu kondenzátoru o známé kapacitě $C_0 = 216\,\mathrm{nF}$. Tím se náboj Q přerozdělí mezi oba kondenzátory, takže na nich bude napětí U_x, pro které platí

$$Q = (C_0 + C_x)U_x. \tag{1.15}$$

Napětí U_x se měří voltmetrem připojeným přes měřicí zesilovač s vysokým vstupním odporem (aby se kondenzátory příliš rychle nevybíjely). Kombinací vzorců (1.14) a (1.15) dostaneme vztah mezi nábojem Q a naměřeným napětím U_x ve tvaru[8]

$$Q = C_0 \frac{U U_x}{U - U_x}, \tag{1.16}$$

případně pokud $U_x \ll U$ jednodušeji jako

$$Q \approx C_0 U_x. \tag{1.17}$$

Neznámou kapacitu C_x pak lze určit metodou nejmenších čtverců[9] proložením závislosti $Q(U)$ přímkou.

1.3.2 Bezpečnost při měření

Úlohu zapíná a vypíná vyučující. Neměňte zapojení experimentu, ani jej nerozpojujte. Při měření se pracuje s napětím až 5 kV. Při měření musí být v živém výstupu VN zdroje předřazen ochranný rezistor $10\,\mathrm{M\Omega}$, který omezuje maximální výstupní proud na 0,5 mA. Norma[10] stanoví maximální výstupní proud zdroje na 10 mA nebo 3 mA, je-li nutno se za provozu dotýkat zařízení rukou.

Před manipulací s měřicím kondenzátorem (výměna dielektrického vzorku) nastavte výstupní napětí na nulovou hodnotu. V průběhu měření se na měřicím kondenzátoru bude hromadit náboj v řádu jednotek μC. Norma stanoví, že nahromaděný náboj mezi současně přístupnými částmi zařízení nesmí být větší než $50\,\mu$C.

Z výše uvedeného vyplývá, že při provádění experimentu podle návodu vám nehrozí žádné nebezpečí.

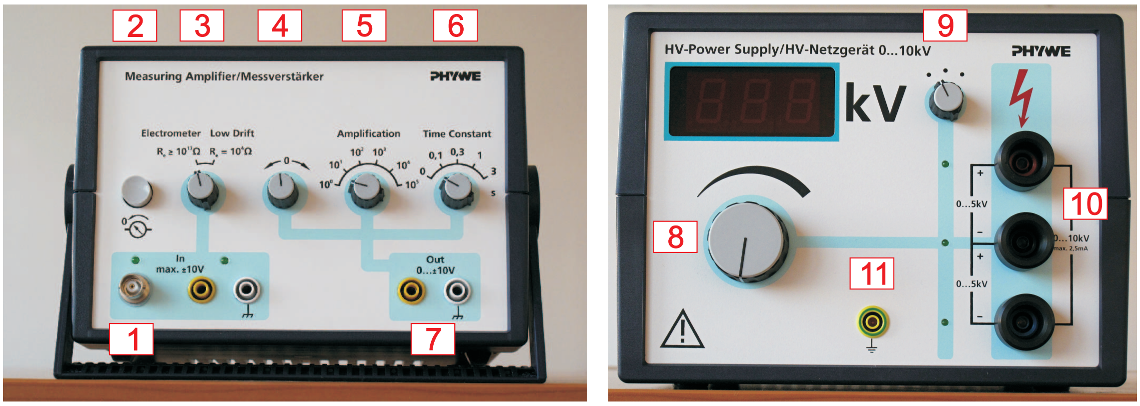
Poznámka

Elektrická pevnost vzduchu je cca $3\,\mathrm{MV\,m^{-1}}$, pokud přiblížíte desky kondenzátoru příliš blízko k sobě, může dojít k průrazu a vzniku jiskření. Zařízení se tím nepoškozuje.

[8] Vnímavého čtenáře jistě napadne, že kombinací vztahů (1.14) a (1.15) lze eliminovat náboj Q a přímo vypočítat kapacitu C_x. To je pravda, ale naším záměrem zde je i ověřit, že mezi nastaveným napětím U a změřeným nábojem Q platí přímá úměra (vztah (1.14)).

[9] Například na severu *http://herodes.feld.cvut.cz/mereni/ — Univerzální nástroj pro kreslení grafů.*

[10] Jedná se o normu ČSN 33 2000-4-41.



Obrázek 1.3: Měřicí zesilovač (nalevo), VN zdroj (napravo), $\boxed{1}$ – vysokoimpedanční vstup ($R = 10\,\mathrm{T}\Omega$, vstupní rozsah $\pm 10\,\mathrm{V}$), $\boxed{2}$ – tlačítko pro vybíjení kondenzátoru, $\boxed{3}$ – přepínač vstupu zesilovače (přepnout do polohy „Electrometer“), $\boxed{4}$ – potenciometr pro nulování výstupního napětí, $\boxed{5}$ – nastavení zesílení zesilovače, $\boxed{6}$ – časová konstanta dolní propusti (přepnout do polohy 0), $\boxed{7}$ – výstupní svorky pro připojení voltmetru (max. výstupní napětí $\pm 10\,\mathrm{V}$), $\boxed{8}$ – potenciometr pro nastavení výstupního napětí, $\boxed{9}$ – přepínač režimu zdroje (přepnout do levé polohy – horní větev, 0–5 kV), $\boxed{10}$ – výstupní svorky 0–5 kV, $\boxed{11}$ – zemnicí svorka.

1.3.3 Postup měření

1. Požádejte vyučujícího o zapnutí úlohy (ten předtím zkontroluje, zda je zdroj VN nastaven na minimální výstupní napětí, je připojen k měřicímu kondenzátoru, zda ten není zkratován a zda je referenční kondenzátor připojen k měřicímu zesilovači).

2. Výstupní napětí VN zdroje nastavte na nulovou hodnotu, mezi desky měřicího kondenzátoru vložte dielektrický vzorek a pomocí plastového otočného prvku nastavte vzdálenost desek tak, aby mezi vzorkem a deskami nebyla vzduchová mezera.

3. Pomocí přepínače na jedné z desek připojte kondenzátor ke zdroji VN. Pomocí potenciometru zvyšte napětí VN o 500 V.

4. Tlačítkem na měřicím zesilovači vybijte referenční kondenzátor. Voltmetr by měl ukazovat nulové napětí, pokud tomu tak není, příslušným potenciometrem na zesilovači jej nastavte.

5. Přepínačem na desce měřicího kondenzátoru jej připojte ke kondenzátoru referenčnímu, na voltmetru odečtěte napětí U_x. Pokud voltmetr ukazuje napětí větší[11] než 10 V, případně příliš malé napětí, upravte zesílení měřicího zesilovače, případně rozsah voltmetru a měření zopakujte.

6. Pokračujte bodem 3 až do napětí 5 kV.

7. Napětí VN zdroje nastavte na nulu, povolte desky měřicího kondenzátoru, vyjměte dielektrický vzorek a desky vraťte do původní vzdálenosti.

8. Celé měření zopakujte bez dielektrického vzorku.

9. Do jednoho grafu vyneste obě závislosti $Q(U)$, vypočítejte relativní permitivitu vzorku (a její nejistotu).

[11] Maximální výstupní napětí měřicího zesilovače je právě 10 V.

10. Zbude-li vám čas, proveďte měření pro druhý dielektrický vzorek.

11. Napětí VN zdroje nastavte na nulovou hodnotu, vyjměte dielektrický vzorek a požádejte vyučujícího o zkontrolování a vypnutí úlohy.

1.4 Použitá literatura

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker: *Fyzika – Elektřina a magnetismus*, VUTIUM Brno a PROMETHEUS Praha, 2001.

2. B. Sedlák, I. Štoll: *Elektřina a magnetismus*, Academia, Praha, 2002.

3. David J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, Prentice Hall, New Yersey, 1999.

29. ledna 2013, Milan Červenka, *milan.cervenka@fel.cvut.cz*