

MAPOVANIE ELEKTROSTATICKÉHO POĽA

Úlohy

A. Mapovanie elektrostatického poľa voltmetrom a grafické znázornenie ekvipotenciálnych čiar

Teoretický úvod

Elektrický náboj je základná vlastnosť hmoty (niektorých elementárnych častíc) vyjadrujúca schopnosť vytvárať vo svojom okolí elektromagnetické pole. Elektrický náboj je skalárna fyzikálna veličina, ktorú označujeme písmenom Q a jeho jednotka v sústave SI je coulomb (C), $1\text{C} = 1\text{A} \cdot \text{s}$. Poznáme kladný a záporný elektrický náboj.

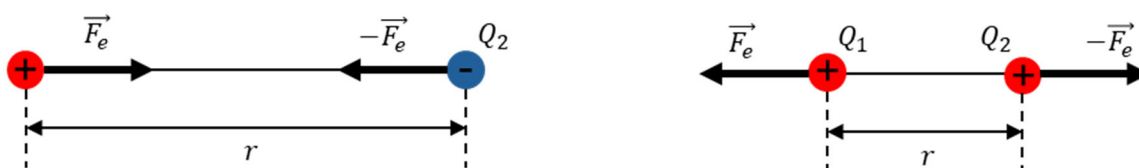
Ak v telesách prevláda jeden z týchto dvoch nábojov, hovoríme, že teleso je elektricky nabité (kladne alebo záporne). Ak je v telese množstvo náboja oboch polarít rovnaké, teleso sa navonok prejavuje ako elektricky neutrálne. V okolí elektricky nabitých telies a častíc existuje elektrické pole. Podobne ako gravitačné pole a ostatné druhy fyzikálnych polí je aj elektrické pole jednou z dvoch základných foriem hmoty.

Bodový elektrický náboj je myslený elektrický náboj sústredený do jedného bodu a je obdobou hmotného bodu používaného v mechanike. Mierou vzájomného pôsobenia elektricky nabitých telies je elektrická sila F_e , ktorej veľkosť definuje **Coulombov zákon**:

Dva bodové náboje Q_1, Q_2 , ktoré sú v inerciálnej vzťažnej sústave v pokoji, na seba navzájom pôsobia elektrickými silami rovnakej veľkosti, ktoré sú opačne orientované. Veľkosť elektrickej sily F_e je priamo úmerná absolútnej hodnote súčinu nábojov Q_1, Q_2 a nepriamo úmerná druhej mocnine ich vzdialenosti r a platí

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2}. \quad (1)$$

Vo vzťahu (1) r je vzdialenosť nábojov, ϵ je **permitivita prostredia**, v ktorom sa náboja nachádzajú. Permitivita prostredia závisí od permitivity vákua $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{A}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^4$ a relatívnej permitivity prostredia ϵ_r , ($\epsilon_r = 1$ pre vákuum), pričom pre permitivitu platí $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$. Vektor elektrickej sily F_e leží na spojnici nábojov Q_1, Q_2 . Ak sú náboje nesúhlasné, sila je príťažlivá, ak sú náboje súhlasné, sila je odpudivá (Obr. 1).

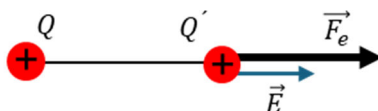


Obr. 1. Vzájomné silové pôsobenie medzi bodovými elektrickými nábojmi

Pole prislúchajúce náboju, ktorý má konštantnú polohu v sústave, v ktorej ho pozorujeme a v ktorej náboj meriame nazývame **elektrostatické pole**. Inak povedané, náboj v pokoji je zdrojom elektrostatického poľa.

Na popis elektrického (elektrostatického) poľa sa zavádzajú dve fyzikálne veličiny: vektorová veličina intenzita elektrického poľa $\vec{E}$ a skalárna veličina elektrický potenciál φ .

Intenzita elektrického poľa $\vec{E}$ je vektorová fyzikálna veličina, ktorá charakterizuje elektrické pole okolo každého elektricky nabitého telesa.



Obr. 2. K pojmu intenzita elektrického poľa

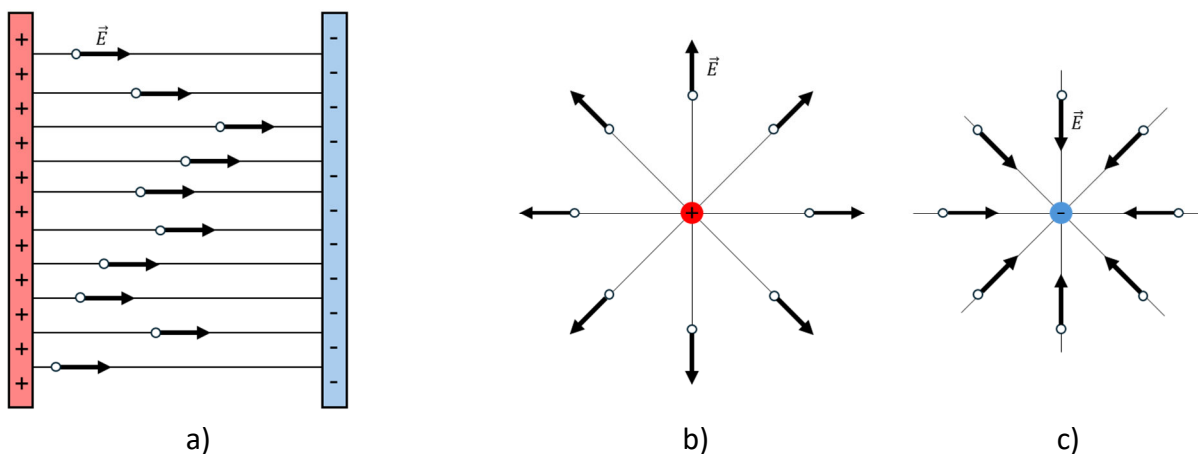
Ak vložíme do určitého miesta elektrického poľa vytvoreného nábojom Q iný bodový náboj Q' , pôsobí naň sila $\vec{F}_e$. Intenzita elektrického poľa je určená podielom sily $\vec{F}_e$ pôsobiacej v danom mieste poľa na kladný bodový náboj Q' a veľkosti tohto náboja Q' a teda platí

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{Q'}. \quad (2)$$

Jednotkou intenzity elektrického poľa je $\text{N} \cdot \text{C}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$. Dosadením za silu vo vzťahu (2) vyjadrenú z Coulombovho zákona je možné vyjadriť veľkosť intenzity elektrického poľa vo vzdialenosti r od bodového náboja Q nasledovne

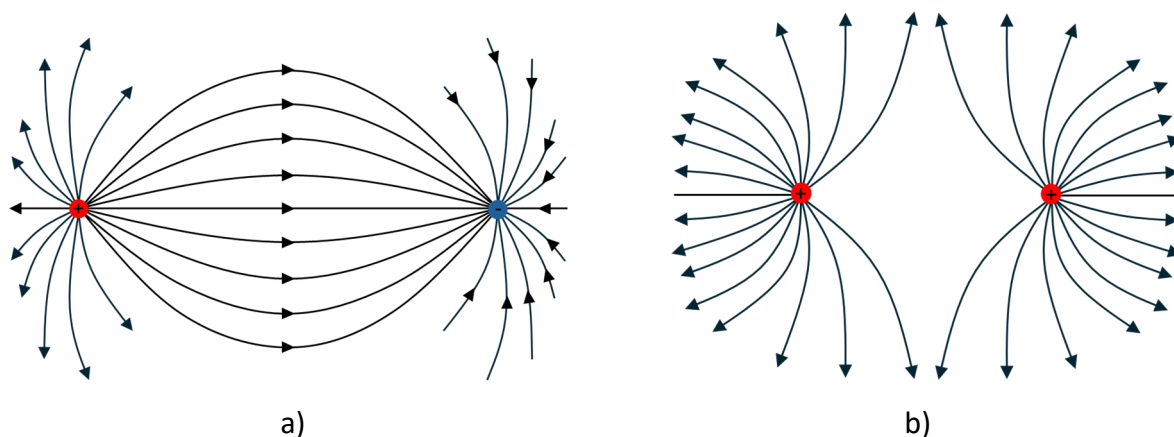
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{|Q|}{r^2}. \quad (3)$$

Smer vektora intenzity elektrického poľa $\vec{E}$ je rovnaký ako smer sily $\vec{F}_e$. Ak má vektor intenzity $\vec{E}$ vo všetkých miestach elektrického poľa rovnaký smer a veľkosť, hovoríme o **homogénnom elektrickom poli** (napríklad medzi dvoma nesúhlasne nabitými rovnobežnými doskami, Obr. 3a). V okolí bodových nábojov je **radiálne elektrické pole**. Ak pole vytvára kladný náboj, intenzita má smer polpriamky vychádzajúcej z náboja (Obr. 3b), ak je pole vytvárané záporným nábojom, polpriamka vstupuje do náboja (Obr. 3c). V prípade, že elektrické pole je vytvorené niekoľkými zdrojmi, niekoľkými nábojmi $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ výsledná intenzita elektrického poľa je určená vektorovým súčtom intenzít elektrických polí $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$.



Obr. 3. a) Homogénne elektrické pole, b) Radiálne elektrické pole kladného náboja, c) radiálne elektrické pole záporného náboja

Názorným modelom elektrického (elektrostatického) poľa je siločiarový model, kedy znázorňujeme pole pomocou siločiar. **Siločiar** v elektrickom (elektrostatickom) poli je myslená čiara, ktorá je v každom svojom bode súhlasne rovnobežná so smerom intenzity elektrického poľa $\vec{E}$, t. j. jej dotyčnica určuje v každom bode poľa smer jeho intenzity. Je dohodnuté, že siločiar y vychádzajú vždy z kladného náboja a končia v zápornom náboji (Obr. 4). Siločiar y homogénneho poľa vidíme na obr. 3a), radiálneho poľa na obr. 3b), 3c), elektrického poľa dvoch bodových nábojov na obr. 4.



Obr. 4. a) Elektrické pole dvoch nesúhlasných nábojov, b) Elektrické pole dvoch súhlasných nábojov

Elektrická potenciálna energia E_p náboja Q v danom mieste poľa je rovná práci W , ktorú vykoná elektrická sila $\vec{F}_e$ pri premiestnení náboja z daného miesta na povrch Zeme (povrch Zeme je miesto s nulovým potenciálom), t. j. $E_p = W$. Podiel elektrickej potenciálnej energie kladného elektrického náboja Q v danom mieste poľa, respektíve práce, ktorú vykonajú sily elektrického poľa pri premiestňovaní kladného bodového náboja Q' z bodu A do miesta nulovej intenzity a veľkosti tohto náboja definuje fyzikálnu veličinu **elektrický potenciál** φ_A v bode A elektrického poľa v okolí náboja Q' .

$$\varphi_A = \frac{W}{Q}. \quad (4)$$

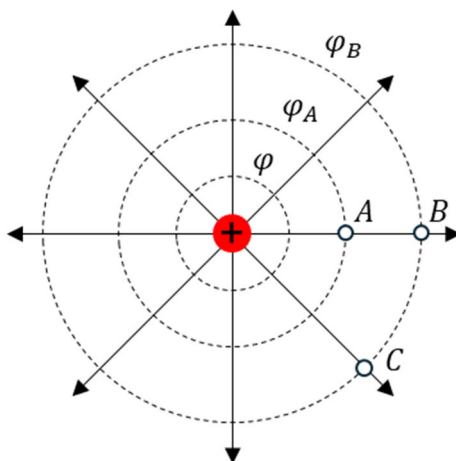
Jednotkou elektrického potenciálu je volt (V), $1 \text{ V} = 1 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$. Množina bodov, ktoré majú v elektrickom poli rovnaký elektrický potenciál φ , tvorí hladinu potenciálu alebo ekvipotenciálnu plochu (plochu rovnakého potenciálu). Spojnice bodov, ktoré majú rovnaký potenciál sa nazývajú **ekvipotenciálne čiary (hladiny)**. Tieto čiary môžeme sledovať orientačne alebo príslušné polohy bodov zaznamenávame a vykreslíme graficky. Siločiar sú v každom bode poľa kolmé na ekvipotenciálne hladiny, čo vyplýva zo vzájomného vzťahu intenzity a potenciálu

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi. \quad (5)$$

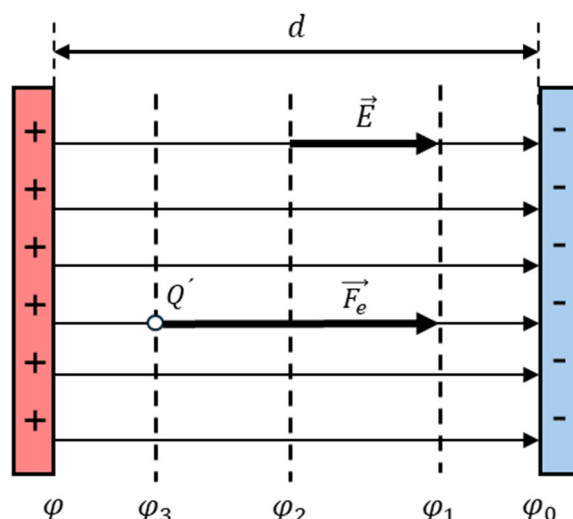
Ak je hustota siločiar prechádzajúcich ekvipotenciálnou plochou veľká, tak je veľká aj intenzita elektrostatického poľa. Rozloženie siločiar, resp. ekvipotenciálnych hladín dáva obraz o elektrostatickom poli. Mapovanie elektrostatického poľa spočíva preto v zásade na experimentálnom určení rozloženia ekvipotenciálnych čiar alebo siločiar.

Graficky sa elektrické (elektrostatické) pole zobrazuje pomocou sústavy siločiar alebo pomocou ekvipotenciálnych hladín. Príklad znázornenia elektrického poľa pomocou siločiar a ekvipotenciálnych hladín v okolí dipólu je na obr. 4a.

V prípade radiálneho poľa bodového náboja alebo náboja rovnomerne rozloženého na guľovom vodiči tvoria ekvipotenciálne plochy sústredné guľové plochy (Obr. 5). Pre guľový vodič je najvyšší potenciál na jeho povrchu.



Obr. 5. Ekvipotenciálne plochy radiálneho elektrického poľa



Obr. 6. Ekvipotenciálne plochy homogénneho elektrického poľa

Ekvipotenciálne plochy v homogénnom poli medzi dvoma rovnobežnými kovovými doskami sú roviny s týmito doskami rovnobežné (Obr. 6). Ak je jedna doska kladne nabitá a druhá uzemnená, je hladina najvyššieho potenciálu φ na kladnej doske a hladina nulového potenciálu φ_0 na uzemnenej doske.

Ak je v bode A elektrického poľa potenciál φ_A , v bode B potenciál φ_B , potom absolútna hodnota rozdielu potenciálov dvoch bodov elektrického poľa určuje **elektrické napätie** U medzi týmito bodmi

$$U = |\varphi_A - \varphi_B|. \quad (6)$$

Elektrické napätie meriame v rovnakých jednotkách ako potenciál. Ak pôsobením sily $F_e = QE$ na kladný elektrický náboj Q' nachádzajúci sa v homogénnom elektrickom poli, prejde náboj Q' v smere intenzity elektrického poľa E dráhu d , elektrické pole prenesením elektrického náboja vykoná prácu

$$W = F_e d = Q' E d = Q' U. \quad (7)$$

Pretože potenciál kladnej dosky je

$$\varphi = \frac{W}{Q'} = \frac{Q' E d}{Q'} = E d \quad (8)$$

a potenciál uzemnenej dosky je $\varphi_0 = 0$, pre elektrické napätie medzi doskami platí $U = |\varphi - \varphi_0| = E d - 0 = E d$ a pre homogénne elektrické pole teda platí

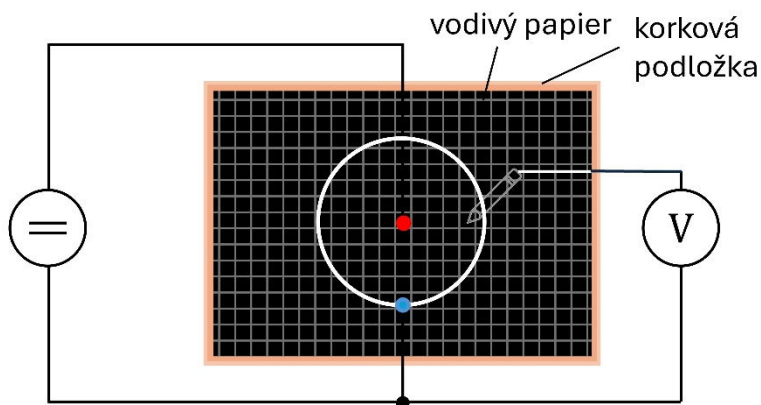
$$U = \frac{W}{Q'} = E d. \quad (9)$$

A. Mapovanie elektrostatického poľa voltmetrom a grafické znázornenie ekvipotenciálnych čiar

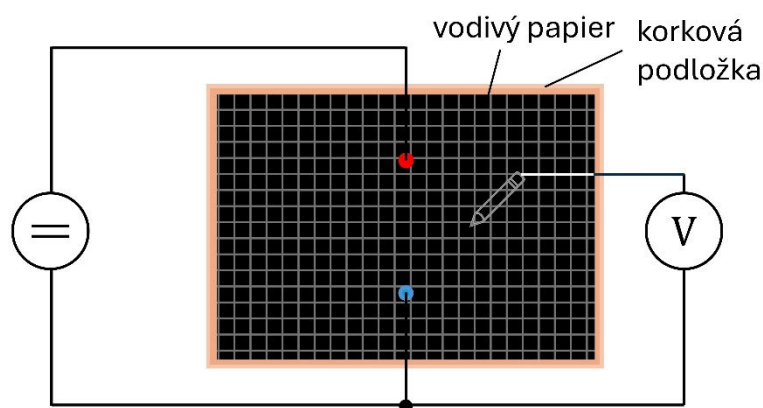
Meracia zostava pozostáva z dvoch základných prvkov. Prvý je uhlíkom impregnovaný papier, ktorý predstavuje vodivé médium. Druhým prvkom je vodivý atrament dávkovaný z pera. Na mapovanie ekvipotenciálov budeme potrebovať voltmeter a na vykreslenie použijeme grafický program (napr. Excel).

Pomôcky

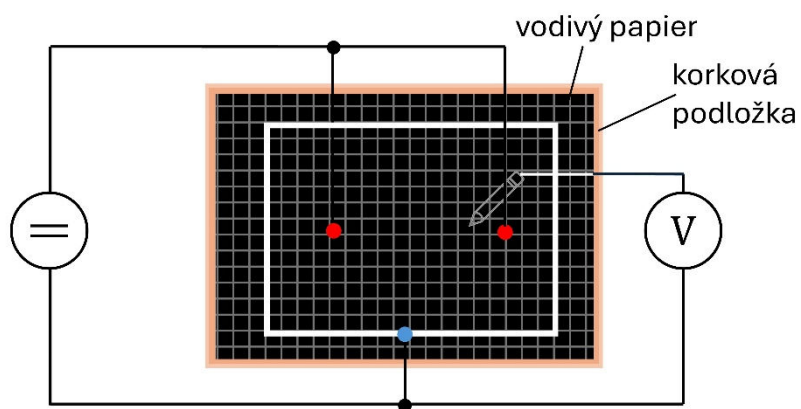
Pracovná plocha z korkovej dosky, čierny vodivý papier s mriežkou, čierny vodivý papier bez mriežky, kruhová šablóna na kreslenie vodivých dráh, vodivé špendlíky a špendlíky na pripevnenie papiera, pero s vodivým atramentom, vodiče, voltmeter alebo digitálny multimeter, zdroj napätia, pravítko.



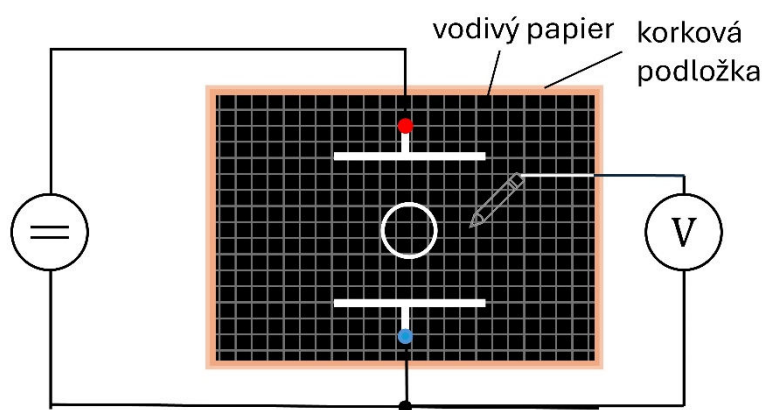
Obr. 7. Schéma zapojenia pre mapovanie elektrostatického poľa v okolí bodového náboj, ktorý sa nachádza vo vnútri plochy ohraničenej vodivou uzavretou krivkou



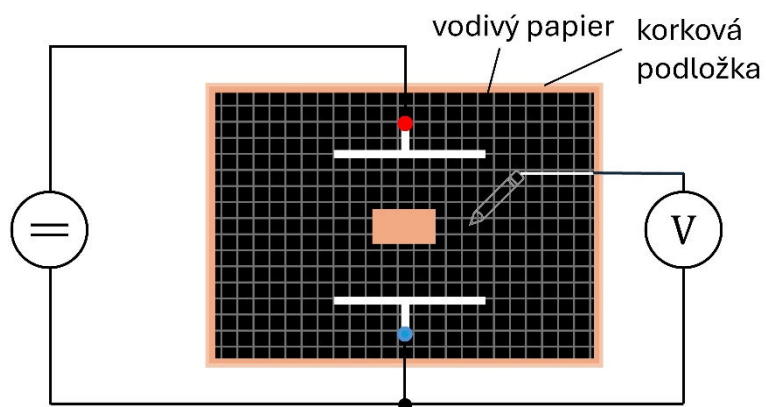
Obr. 8. Schéma zapojenia pre mapovanie elektrostatického poľa v okolí dipólu



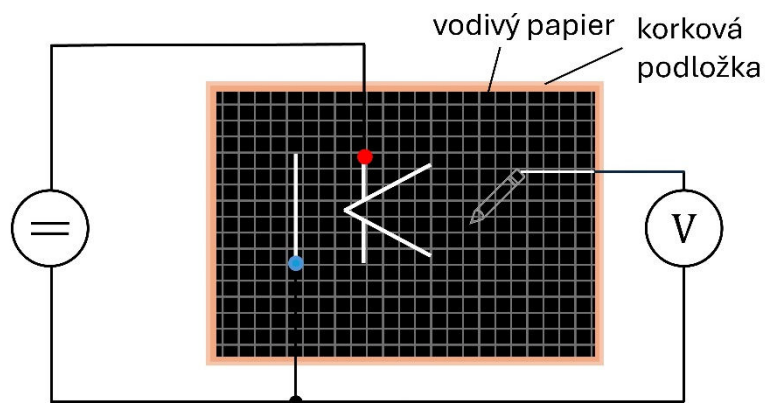
Obr. 9. Schéma zapojenia pre mapovanie elektrostatičného poľa v okolí dvoch súhlasne nabitých bodových nábojov



Obr. 10. Schéma zapojenia pre mapovanie elektrostatičného poľa v okolí vodivej uzavretej krivky umiestnenej medzi rovinnými elektródami



Obr. 11. Schéma zapojenia pre mapovanie elektrostatičného poľa v okolí obdĺžnikového izolátora umiestneného medzi rovinnými elektródami

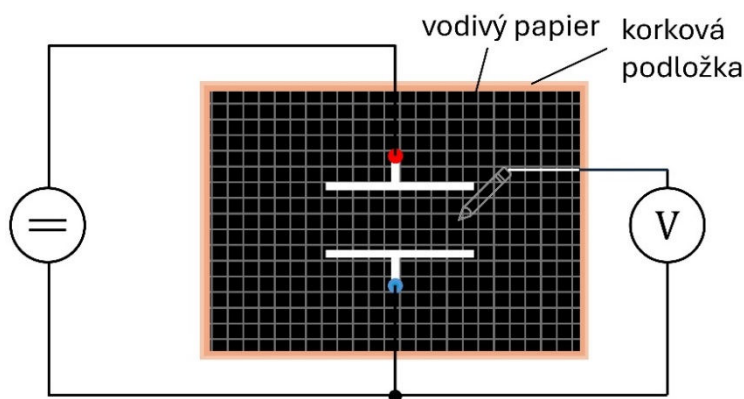


Obr. 12. Schéma zapojenia pre mapovanie elektrostatického poľa v okolí elektródy špeciálneho tvaru

Postup merania

1. Na vodivý papier nakreslíme vodivé dráhy (elektródy).

Pozn.: Vodivý atrament dosahuje svoju maximálnu vodivosť približne po 20 minútach schnutia. Môžete si najskôr na obyčajný papier načrtnúť rozloženie, veľkosť, tvar vodivých čiar, ktoré sa budú používať na meranie. Tieto čiary môžu mať ľubovoľný tvar (rovné alebo zakrivené čiary, kružnice, bodky, štvorčky, ...). Podľa náčrtku potom nakreslite elektródy na čierny vodivý papier tak, že papier umiestnite na hladký tvrdý povrch. Nekreslite elektródy keď je papier na korkovej podložke. Môžete použiť aj plastovú šablónu na nakreslenie kružníc.



Obr. 13. Schéma zapojenia pre mapovanie elektrostatického poľa medzi dvomi paralelnými elektródami

2. Pripevníme pripravený vodivý papier pomocou špendlíkov v každom rohu na korkovú dosku, ktorá slúži ako pracovná podložka.
3. Zostavíme si meraciu aparatúru podľa schémy (Obr. 13) podľa nasledujúcich krokov.
4. Pomocou vodičov pripojíme elektródy ku zdroju jednosmerného napätia s rozsahom od 5V do 20 V. Zdroj by mal byť schopný dodávať prúd v rozsahu 1 mA až 1 A.

5. Svorku vodiča pripevníme na vodivý špendlík umiestnený na vodivom papieri. Druhú svorku vodiča pripojíme k zdroju.
6. Ekvipotenciály budú zaznamenávané pomocou voltmetra alebo digitálneho multimetra. Záporný vstup voltmetra spojíme vodičom priamo so zápornou svorkou zdroja. Druhý vodič z voltmetra (sonda) sa používa na meranie napätia medzi zvoleným bodom na vodivom papieri a zápornou svorkou zdroja jednoduchým dotykom sondy a vodivého papiera v danom bode.
7. Na mapovanie ekvipotenciálu pohybujeme sondou po vodivom papieri, a hľadáme miesta, v ktorých nameriame rovnakú hodnotu napätia. Hodnotu napätia zaznamenáme do tabuľky. Pre miesta s rovnakou hodnotou napätia si do tabuľky 1 zaznamenávame súradnice udávajúce polohy týchto miest. Pre správnosť merania je nevyhnutné si pred meraním stanoviť vhodný začiatok súradnicového systému.
8. Pokračujeme v pohybe sondy v okolí paralelných elektród a hľadáme miesta, v ktorých voltmeter ukazuje, rovnakú hodnotu napätia. Postupne zaznamenávame súradnice týchto miest.
9. Počet bodov potrebných na grafické znázornenie jednej potenciálnej hladiny by nemal byť menší ako 10.
10. Postupne si volíme rôzne typy schém (Obr. 7. až Obr. 13.), ktoré máme k dispozícii a mapujeme príslušné elektrostatické pole.

Tabuľka 1

i	$U_1 = \dots V$		$U_2 = \dots V$		$U_j = \dots V$	
	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
1						
2						
⋮						
n						

Vyhodnotenie merania

1. Do grafu zakreslíme umiestnenie jednotlivých elektród.
2. Zaznamenané polohy miest, v ktorých boli namerané rovnaké hodnoty napätia, znázorníme graficky značkami v Exceli alebo inom vhodnom programe. Pospájaním značiek zostrojíme ekvipotenciálne čiary.
3. Postupne vykreslíme ekvipotenciálne čiary vyšetřovaného elektrostatického poľa pre nami zvolené typy schém.
4. Priestorové rozloženie ekvipotenciál porovnáme s teoretickým predpokladom resp. simuláciou.