

Číslo úlohy: 8 Skupina: 2  
 Kruh: Čtvrtek Jméno: Denis Krapivin  
 Datum měření: 11.11.2021 Kolega: Kseniia Politskovaia  
 Klasifikace:

---

## 1 Pracovní úkoly

1. **DŮ:** Odvoďte kapacitu  $C$  deskového kondenzátoru.
2. **DŮ:** Pro deskový kondenzátor stanovte závislost poměru  $\frac{S}{d}$  plochy desek  $S$  a vzdálenosti  $d$  mezi nimi jako funkci náboje  $Q$  a napětí  $U$ . Následně spočítejte hodnotu poměru  $\frac{S}{d}$  pro vzduchový deskový kondenzátor s volbou  $Q = Q_{\max} = 50 \mu\text{C}$  a  $U = U_{\max} = 100 \text{ kV}$ .
3. Změřte průrazné napětí  $U_p$  mezi deskami kondenzátoru pro deset různých vzdáleností desek  $d$ . Náboj přivádějte až do průrazu mezi deskami kondenzátoru. Průrazné napětí  $U_p$  určete prostřednictvím silového působení na vahách ve chvíli průrazu a vztahu (3). Z naměřených hodnot průrazného napětí  $U_p$  pro různé vzdálenosti  $d$  určete následně dielektrickou pevnost vzduchu a porovnejte ji s tabulkovou hodnotou pro suchý vzduch. Diskutujte důvod případné odlišnosti hodnot.
4. Změřte přitažlivé síly mezi deskami kondenzátoru v závislosti na doskoku jiskřiště  $s$  pro tři různé vzdálenosti desek  $d$ . Náboj přivádějte až do průrazu na kulovém jiskřišti s mikrometrickým šroubem, paralelně připojenému k deskovému kondenzátoru. Ze silového působení spočítejte napětí a ze vztahu v poznámce se pokuste určit neznámou funkci  $f(\frac{s}{D})$  ze vztahu (4) vzhledem k podmínce  $f(0) = 1$  a monotónnosti funkce u doskoku  $s$ . Experimentální data a nalezenou funkci zpracujte do grafu.
5. Zvolte si dvě konfigurace elektrod, nastavte na nich napětí cca 10V a zmapujte potenciál v síti  $12 \times 12$  bodů. V domácím vyhodnocení proveďte grafické zpracování naměřených dat.

## 2 Pomůcky

Wimshurstova elektrika, váhy, deskový kondenzátor, podstavec, sada vodičů, zkratovač, posuvné měřítko, pravítko, kulové jiskřiště s mikrometrickým šroubem, regulovatelný zdroj stejnosměrného napětí, souprava pro mapování elektrostatického pole (sít bodů  $12 \times 12$ , Petriho miska, voda, elektrody), voltmetr.

## 3 Teorie

### 3.1 Průraz na deskách kondenzátoru

Uvažujeme deskový kondenzátor, který se skládá ze dvou elektrod ve tvaru disku. Jako prostředí mezi deskami uvažujeme vzduch o permitivitě  $\varepsilon$ . Uvnitř nabitého kondenzátoru vzniká potenciální elektrostatické pole s intenzitou  $\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi$ , kde  $\varphi$  je elektrostatický potenciál. Napětí mezi elektrodami  $U$  určeno rozdílem potenciálů mezi deskami. Pak pro deskový kondenzátor platí:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = Ed, \quad (1)$$

kde  $d$  je vzdálenost mezi deskami plošného kondenzátoru.

Dielektrická pevnost  $E_p$  je konstanta, která vyjadřuje odolnost dielektrika vůči elektrickému poli:

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (2)$$

kde  $U_p$  je průrazné napětí. Po dosažení intenzity pole  $E = E_p$  dochází k vodivosti dielektrika a tedy k průrazu.

Energie nahromaděná v kondenzátoru se spočítá z práce potřebné k jeho nabití, to znamená z práce potřebné k přenesení elementárního náboje  $q$  z jedné desky na druhou proti potenciálovému rozdílu  $U$ :

$$W = \int_0^Q U \, dq = \int_0^Q \frac{q}{C} \, dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C U^2,$$

kde  $C = \frac{Q}{U}$  je kapacita plošného kondenzátoru.

Přitažlivou sílu  $F$  mezi desky kondenzátoru odvodíme jako změnu energie kondenzátoru  $W$  při malé změně vzdálenosti desek  $d$ . Pomoci vztahu (1) a vzorců  $C = \varepsilon(S/d)$ , který jsme odvodili v domácí přípravě (viz Příloha. Domácí příprava) dostaneme:

$$F = \frac{dW}{dd} = \frac{d}{dd} \left( \frac{1}{2} C U^2 \right) = \frac{d}{dd} \left( \frac{1}{2} \varepsilon E^2 S d \right) = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 S = \frac{1}{2} \varepsilon \frac{U^2}{d^2} S.$$

Pak jednoduchými úpravami dostaneme vzorec pro napětí na kondenzátoru  $U$ :

$$U = d \sqrt{\frac{2F}{\varepsilon S}}. \quad (3)$$

### 3.2 Průraz na kulovém jiskřišti

Empirický vzorec pro průrazné napětí  $U$  [kV] na kulovém jiskřišti složené ze dvou stejně velkých koulí průměru  $D$  [cm] ve vzdálenosti  $s$  [cm] od sebe je

$$U = 27,75 \left( 1 + \frac{0,757}{\sqrt{\delta D}} \right) \delta \frac{s}{f\left(\frac{s}{D}\right)}, \quad \delta = \frac{b}{760} \frac{273 + 20}{273 + t}, \quad (4)$$

kde  $\delta$  korekční faktor na hustotu vzduchu,  $b$  barometrický tlak [Torr],  $t$  teplota [°C] [1].

Jednoduchými úpravami dostaneme vzorec pro funkci  $f$  závislou na poměru  $s/D$  a geometrické pravidelnosti pole:

$$f\left(\frac{s}{D}\right) = 27,75 \left( 1 + \frac{0,757}{\sqrt{\delta D}} \right) s \delta U^{-1}. \quad (5)$$

Pro  $s/D = 0$  je  $f = 1$ , se vzrůstajícím doskokem  $s$  je funkce  $f$  rostoucí.

### 3.3 Mapování elektrostatického pole

Pro mapování elektrostatického pole použijeme nepřímé metody stanovením pole z ekvipotenciálních ploch. Všimneme si, že elektrostatické pole je potenciální, to dovoluje nám zavést skalární elektrostatický potenciál  $\varphi$  vztahem  $\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi$ . Stačí nám pak pouze měřit potenciálový rozdíl  $\Delta\varphi = U$ , protože intenzitu elektrostatického pole můžeme získat jako záporně vzatý gradient potenciálu.

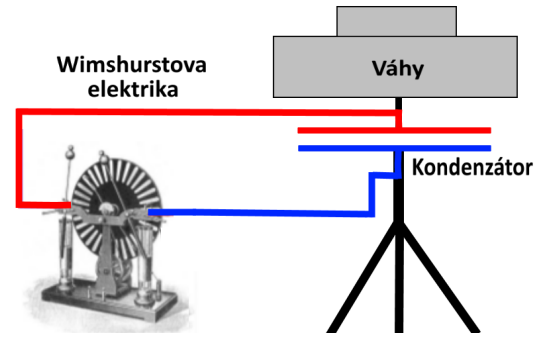
## 4 Postup měření

### 4.1 Průraz na deskách kondenzátoru

Pro nalezení veličiny průrazného napětí  $U$  na deskách kondenzátoru v závislosti na vzdálenosti mezi deskami  $d$  budeme měřit přitažlivou sílu  $F$  mezi deskami kondenzátoru. Pro měření se používá uspořádání na Obr. 1.

Nejdřív pomocí posuvného měřítka změříme poloměr spodní desky  $R$  (považujeme poloměry obou desek za stejné). Měření provádíme několikrát. Pak umístíme dolní desku pod horní. Desky kondenzátoru musí být vůči sobě umístěny paralelně. Vyrovnání provádíme prostřednictvím malých závaží na vrchní desce. Následně k elektrodám Wimshurstovy elektriky připojíme paralelně deskový kondenzátor. Nastavením pozice spodní desky volíme vzájemnou vzdálenost mezi deskami  $d$ . Tuto vzdálenost měříme posuvným měřítkem. Vzdálenost volíme co nejmenší, abychom zmenšili vliv rušivých okrajových jevů.

Odečteme původní hodnotu na stupnici vah. Pak začneme pomalu otáčet klikou Wimshurstovy elektriky. Při otáčení klikou Wimshurstovy elektriky se na každé desce bude akumulovat náboj opačného znaménka, čímž mezi nimi začne působit přitažlivá síla. V moment průrazu odečteme hodnotu na stupnici vah. Měření provedeme několikrát pro různé hodnoty vzdálenost mezi deskami  $d$ .



Obr. 1: Experimentální zapojení kondenzátoru, vah a Wimshurstové elektriky při měření průrazu na deskách plošného kondenzátoru.

## 4.2 Průraz na kulovém jiskřišti

Nejdřív pomocí mikrometrického šroubu změříme průměr koulí  $D$  kulového jiskřiště a teplotu v místnosti  $t$ .

Připojíme kulové jiskřiště v zapojení na Obr. 1 paralelně kondenzátoru. Nastavíme vzdálenost  $d$  mezi jeho deskami a nastavíme veličinu doskoku  $s$ , t.j. vzdálenost mezi kuličkami. Jako v minulé úloze odečteme původní hodnotu na stupnici vah. Pak pomocí Wimshurstovy elektriky nabijeme kuličky až do průrazu na kulovém jiskřišti. Stejně množství náboje bude se akumulovat i na deskách kondenzátoru, kde způsobuje přitažlivou sílu  $F$ . Odečteme hodnotu na stupnici vah v moment průrazu na kulovém jiskřišti. Je důležité, aby průraz vznikl na kulovém jiskřišti, ale ne mezi deskami kondenzátoru.

Měření opakujeme pro každou vzdálenost  $d$  desetkrát. Měření provádíme pro tři různé vzdálenosti  $d$ .

## 4.3 Mapování elektrostatického pole

Mapování budeme provádět měřením hodnoty napětí v bodech mřížky o rozsahu  $12 \times 12$ .

Naplníme Petriho misku vodou a umístíme na papír s nakreslenou sítí  $12 \times 12$  bodů. Ponoříme do vody dvě elektrody různého tvaru, připojíme elektrody k regulovatelnému zdroji stejnosměrného napětí a nastavíme přibližně 10 V.

Napětí měříme digitálním voltmetrem tak, že jednu měřicí elektrodu voltmetru trvale připojíme na elektrodu se záporným potenciálem. Tímto je nastavena hladina nulového potenciálu. Druhou elektrodou voltmetru měříme napětí v každém ze 144 bodů.

Měření provedeme pro katodu ve tvaru prstenců a anodu ve tvaru kladívka (konfigurace prstenec-kladívko) a pro katodu ve tvaru tyčky a anodu ve tvaru kladívka (konfigurace tyčka-kladívko).

# 5 Zpracování dat

## 5.1 Průraz na deskách kondenzátoru

Nejdřív jsme změřili poloměr disků pravítkem s chybou 0,5 mm, pak plochu desky kondenzátoru spočítáme jako  $S = \pi R^2$ . Chybu nalezení hodnoty plochy desky kondenzátoru spočítáme jako chybu nepřímého měření [2]. Hodnoty tíhového zrychlení  $g$  [3], relativní permitivity vzduchu  $\epsilon_r$  [4] a absolutní permitivity vakua  $\epsilon_0$  [5] považujeme ve výpočtech za přesné (tj. s nulovou chybou). Absolutní permitivitu vzduchu  $\epsilon$  najdeme jako  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ .

Z rozdílů hodnot na stupnici vah do nabití desek kondenzátoru a v moment průrazu  $m$  pro různé vzdálenosti desek  $d$  jsme našli hodnotu síly  $F$  působící mezi deskami jako  $F = gm$ . Pak ze vztahu (3) jsme vypočetli průrazné

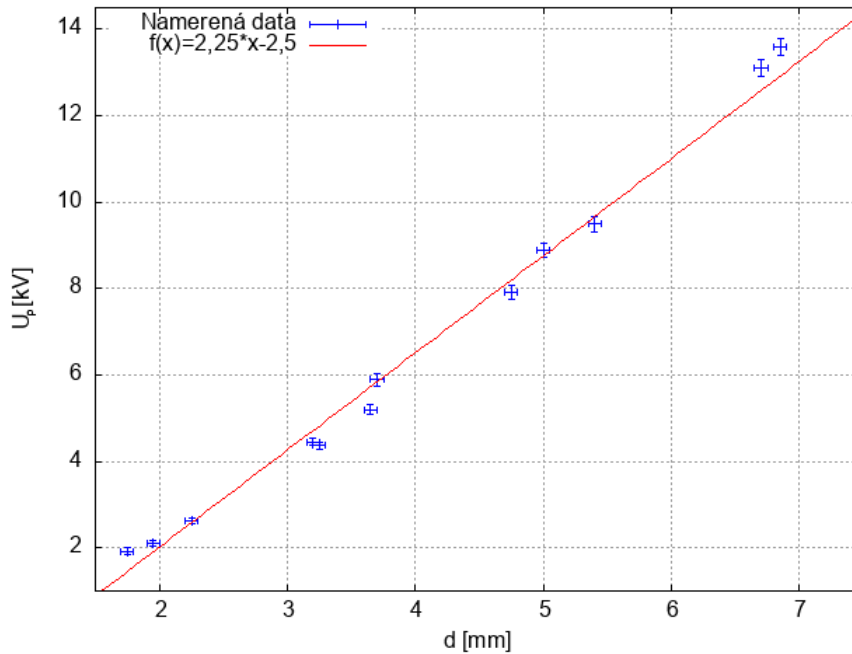
$$\begin{array}{ll}
R &= (8,20 \pm 0,05) \text{ cm} & S &= (212 \pm 3) \text{ cm}^2 \\
g &= (9,81049 \pm 0,5) \text{ m s}^{-1} & \varepsilon_r &= 1,00059 \\
\varepsilon_0 &= 8,81254 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1} & \varepsilon &= 8,859 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}
\end{array}$$

napětí  $U_p$  pro každou vzdálenost  $d$ . Chyba měření  $d$  je 0,05 mm.

Naměřená data a vypočtené hodnoty jsou v Tab. 1. Hodnoty chyb  $\sigma_m$  jsme se snažili odhadnout během měření, hodnoty chyb  $\sigma_F$  a  $\sigma_{U_p}$  jsme našli podle vzorců pro chybu nepřímého měření.

$d[\text{mm}]$	$m[\text{g}]$	$\sigma_m[\text{g}]$	$F[\text{N}]$	$\sigma_F[\text{N}]$	$U_p[\text{kV}]$	$\sigma_{U_p}[\text{kV}]$
1,75	11,6	0,5	0,114	0,003	1,92	0,07
3,70	24,5	1,0	0,240	0,010	5,89	0,14
5,00	30,5	1,0	0,300	0,010	8,89	0,17
6,70	37,0	1,0	0,360	0,010	13,10	0,20
6,85	37,9	1,0	0,370	0,010	13,60	0,20
5,40	29,9	1,0	0,290	0,010	9,50	0,18
4,75	26,8	1,0	0,260	0,010	7,91	0,17
3,65	19,9	0,5	0,195	0,005	5,20	0,10
3,25	17,4	0,5	0,171	0,005	4,36	0,09
2,25	13,15	0,3	0,129	0,003	2,63	0,06
1,95	11,15	0,3	0,110	0,003	2,10	0,06
3,20	18,7	0,5	0,183	0,003	4,45	0,09

Tab. 1: Naměřená data a vypočtené hodnoty při průrazu na deskovém kondenzátoru.  $d$  je vzdálenost desek s chybou 0,05 mm,  $m$  je rozdíl hodnot na stupnici vah do nabití desek kondenzátoru a v moment průrazu vyjádřený v jednotkách hmotnosti,  $\sigma_m$  je chyba tohoto rozdílu,  $F$  je síla působící mezi deskami s chybou  $\sigma_F$  a  $U_p$  je napětí na kondenzátoru ve chvíli průrazu s příslušnou chybou  $\sigma_{U_p}$ .



Obr. 2: Naměřené hodnoty průrazného napětí  $U_p$  na kondenzátoru pro různé vzdálenosti  $d$  desek kondenzátoru a proložení dat lineární funkcí ve tvaru  $f(x)$ .

Fitováním v programu GNUplot lineární funkcí závislosti  $U_p = E_p d$  (2) jsme dostali hodnotu dielektrické pevnosti vzduchu  $E_p$  s příslušnou chybou:

$$E_p = (2,25 \pm 0,08) \text{ MV m}^{-1}.$$

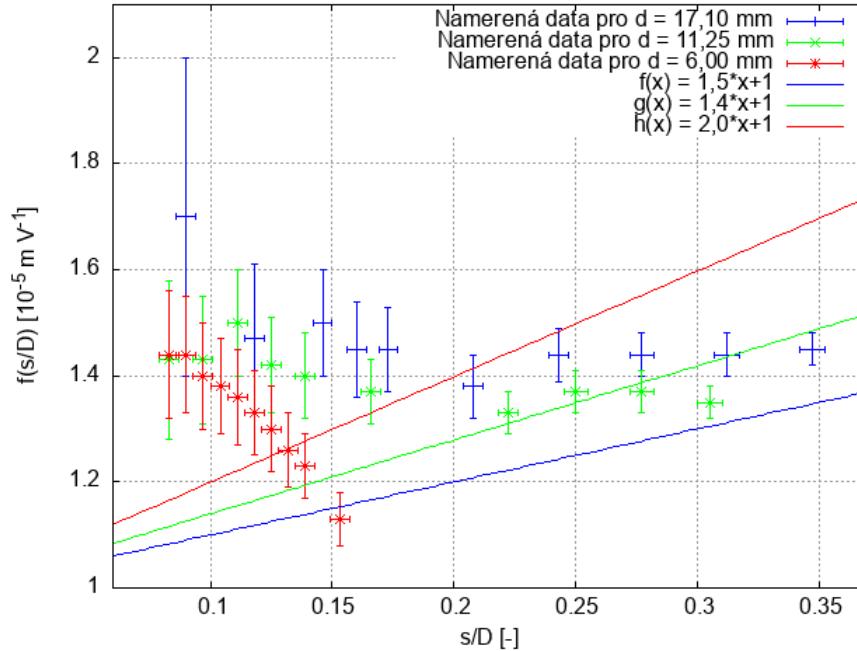
## 5.2 Průraz na kulovém jiskřišti

Nejdřív jsme změřili teplotu v místnosti  $\theta$  a průměr koulí  $D$  jiskřiště. Hodnotu atmosférické tlaku  $\rho_a$  [6] jsme převedli na barometrický  $\beta$ :

$$\begin{aligned} \theta &= (22,9 \pm 0,1) ^\circ\text{C} & D &= (14,42 \pm 0,05) \text{ mm} \\ \rho_a &= 102400 \text{ Pa} & \beta &= 768,065 \text{ Torr} \end{aligned}$$

Ze změřených hodnot pomocí (3) najdeme hodnoty napětí  $U$  na kondenzátoru v moment průrazu na jiskřišti. Podle (5) najdeme hodnotu hledané funkce  $f(s/D)$  pro různé body. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou znázorněny v Tab. 4.

Funkce  $f(s/D)$  je ze vztahu (5) jsme proložili rostoucí lineární funkcí procházející bodem  $(0,1)$  pro každou ze tří vzdáleností  $d$ . Proložení jsou na obrázku Obr. 3.



Obr. 3: Naměřené hodnoty neznámé funkce  $f(s/D)$  v závislosti na poměru doskoku  $s$  a průměru  $D$  koulí jiskřiště pro tři různé hodnoty vzdálenosti  $d$  desek kondenzátoru, proložení naměřených hodnot lineárními rostoucími funkcemi ve tvaru  $f(x)$ ,  $g(x)$  a  $h(x)$  procházejícími bodem  $(0,1)$ .

Fitováním dat jsme dostali tři funkce pro tři vzdálenosti  $d$ , výsledky jsou v Tab. 2.

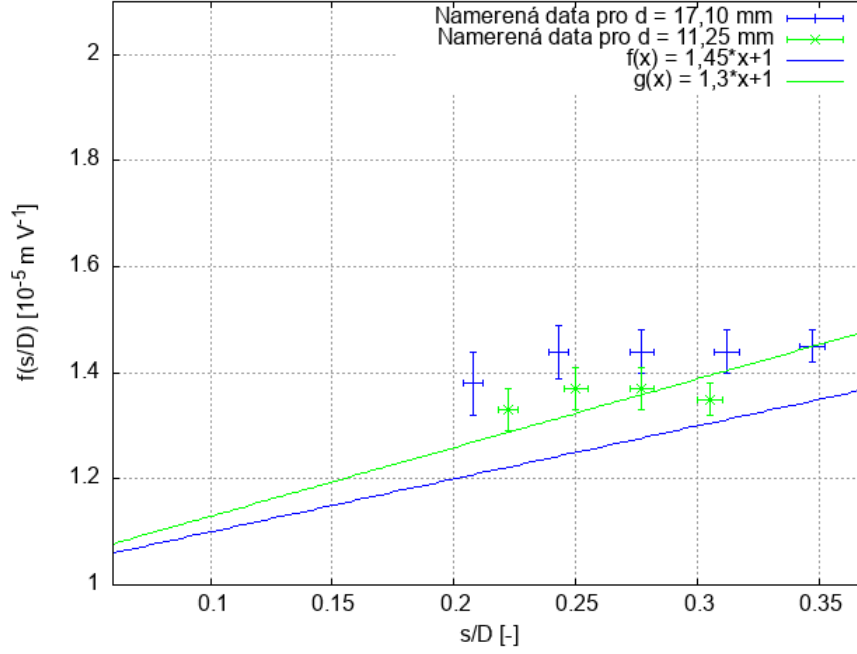
$d = (17,10 \pm 0,05) \text{ mm}$	$d = (11,25 \pm 0,05) \text{ mm}$	$d = (6,00 \pm 0,05) \text{ mm}$
$f_1(x) = (1,50 \pm 0,12)x + 1$	$f_2(x) = (1,40 \pm 0,15)x + 1$	$f_3(x) = (2,00 \pm 0,4)x + 1$

Tab. 2: Funkce  $f_i(x)$ , kterými jsme proložili vypočtené hodnoty neznámé funkce  $f(s/D)$  v závislosti na poměru doskoku  $s$  a průměru  $D$  koulí jiskřiště pro tři různé hodnoty vzdálenosti  $d$  desek kondenzátoru.

Pak najdeme výslednou funkci skládáním měření s různou přesností [2]:

$$f\left(\frac{s}{D}\right) = (1,5 \pm 0,2) \frac{s}{D} + 1$$

Ovšem je vidět, že hodnoty funkcí  $f(s/D)$  neodpovídají rostoucí funkce pro hodnoty  $(s/D) < 0,2$ , proto zkusím vyloučit tyto hodnoty a zase proložit lineární rostoucí funkcí procházející bodem  $(0,1)$ . Proložení jsou na Obr. 4. Fitováním dat jsme dostali dvě nové funkce pro dvě vzdálenosti  $d$ , výsledky jsou v Tab. 3.



Obr. 4: Naměřené hodnoty neznámé funkce  $f(s/D)$  v závislosti na poměru doskoku  $s$  a průměru  $D$  koulí jiskřiště pro dvě různé hodnoty vzdálenosti  $d$  desek kondenzátoru po vyloučení bodů  $(s/D) < 0,2$ , proložení naměřených hodnot lineárními rostoucími funkcemi ve tvaru  $f(x)$  a  $g(x)$  procházejícími bodem  $(0,1)$ .

$d = (17,10 \pm 0,05) \text{ mm}$	$d = (11,25 \pm 0,05) \text{ mm}$
$f_1(x) = (1,44 \pm 0,09)x + 1$	$f_2(x) = (1,30 \pm 0,09)(x) + 1$

Tab. 3: Funkce  $f_i(x)$ , kterými jsme proložili vypočtené hodnoty neznámé funkce  $f(s/D)$  v závislosti na poměru doskoku  $s$  a průměru  $D$  koulí jiskřiště pro dvě různé hodnoty vzdálenosti  $d$  desek kondenzátoru.

Pak najdeme výslednou funkci jako aritmetický průměr:

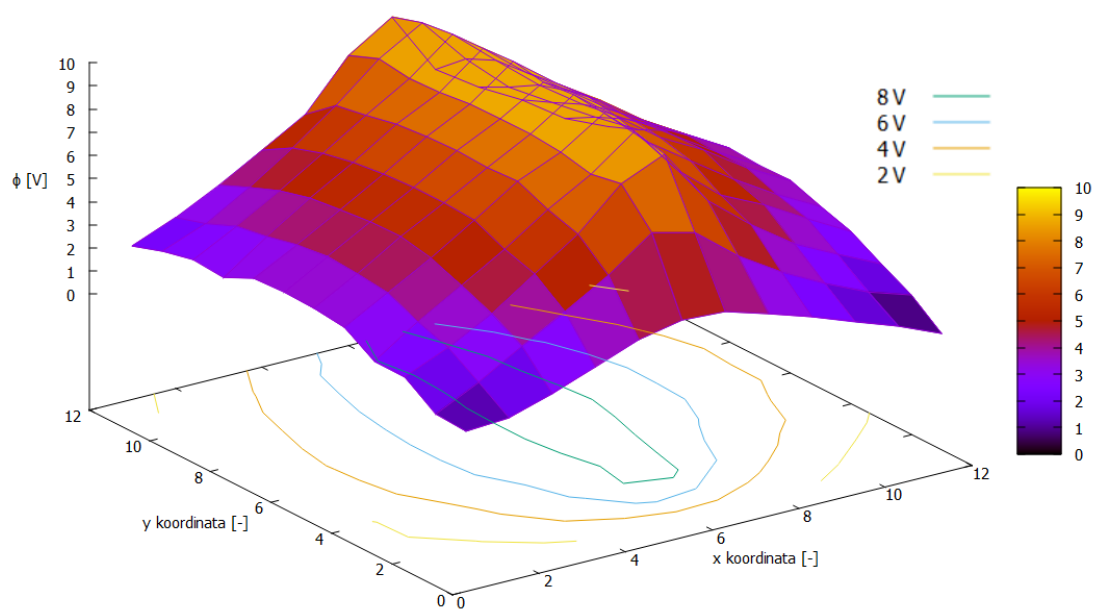
$$f\left(\frac{s}{D}\right) = (1,37 \pm 0,13) \frac{s}{D} + 1$$

### 5.3 Mapování elektrostatického pole

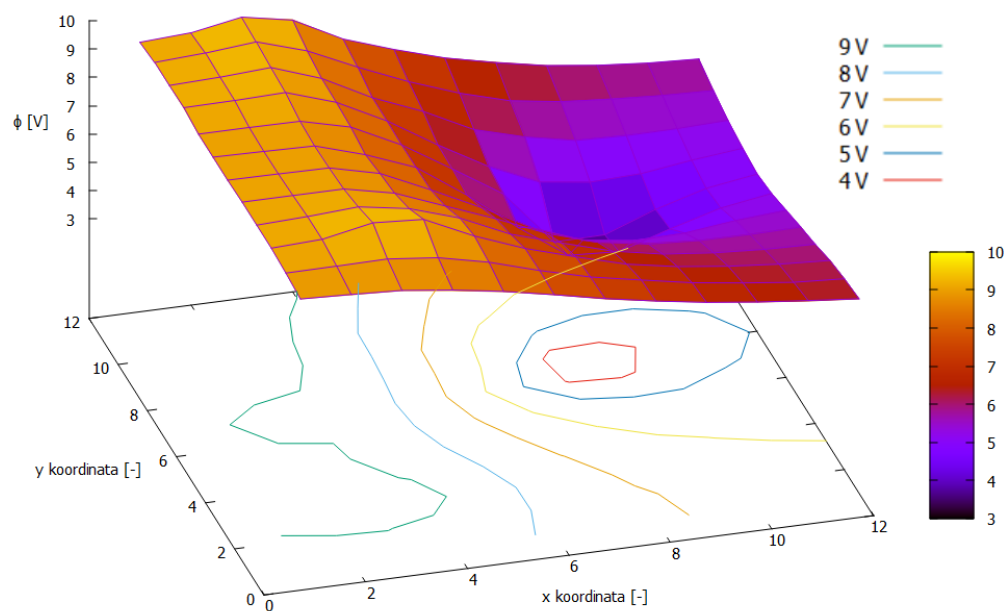
Mapovali jsme elektrostatického pole pro dvě různé konfigurace elektrod. Pro obě dvě konfigurace jsme nastavili zdroj napětí na 10 V.

Naměřena data pro konfiguraci prstenec-kladívko jsou v Tab. 5, potenciálová mapa pro toto uspořádání je na Obr. 5.

Naměřena data pro druhé uspořádání tyčka-kladívko jsou v Tab. 6, potenciálová mapa pro toto uspořádání je na Obr. 6.



Obr. 5: Naměřené hodnoty potenciálu v okolí dvou elektrod ve tvaru prstence (katoda) a kladívka (anoda).



Obr. 6: Naměřené hodnoty potenciálu v okolí dvou elektrod ve tvaru tyčky (katoda) a kladívka (anoda).

## 6 Diskuze

### 6.1 Průraz na deskách kondenzátoru

Fitováním jsme stanovili hodnotu dielektrické pevnosti vzduchu  $E_p = (2,25 \pm 0,08) \text{ MV m}^{-1}$  s relativně malou chybou cca 4%. Při srovnání s tabulkovou hodnotou dielektrické pevnosti  $E_{\text{tab}} = 3 \text{ MV m}^{-1}$  [7] je vidět, že relativní chyba činí 25% a hodnoty od sebe vzdáleny  $\geq 9\sigma$ , tím pádem hodnoty nemůžeme považovat za shodné.

Nesoulad s tabulkovou hodnotou je pravděpodobně způsoben okrajovými jevy. Vztah (3) platí pro ideální „nekonečný“ deskový kondenzátor. Hustota náboje desek reálného kondenzátoru se zvyšuje v blízkosti jeho okrajů, tím pádem elektrické pole uvnitř kondenzátoru není homogenní. Jedním z důvodů by také mohl být mimovolný posun desek kondenzátoru během experimentu, v důsledku toho by se mohl změnit úhel sklonu spodní desky vůči horní.

Dalším důvodem je to, že tabulková hodnota byla vypočtena pro čistý suchý vzduch, vlhkost nebo prach ve vzduchu by mohl mít vliv na experiment.

### 6.2 Průraz na kulovém jiskřišti

Fitováním jsme našli tři funkce pro tři různé hodnoty vzdálenosti mezi deskami (Tab. 2), hodnota redukovaného  $\chi^2$  pro  $f_1$  je rovna 2, pro  $f_2$  je 5,4, pro  $f_3$  je 4, což ukazuje na nesprávnou volbu fitovací funkce. Jiné zvolené funkce nedávají lepší výsledky.

Z grafu na Obr.3 je vidět, že všechny tři funkce procházející naměřenými body by měli mít lokální minimum resp. nespojitost někde v okolí bodu  $(s/D) = 0,2$ . Pro body  $(s/D) < 0,2$  můžeme proložit naměřená data kvadratickými funkcemi (Obr. 7). Zbývající data jsme proložili lineární funkcí splňující podmínku  $f(0) = 1$  Tab. 3. Vniklé funkce také mají velkou hodnotu redukovaného  $\chi^2$  (1,54 pro první a 2,16 pro druhou), ale dal už nic pro zpřesnění udělat nemůžeme kvůli malému počtu zbývajících dat. Výslednou funkci jsme našli jako aritmetický průměr.

Nečekané chování funkce pro  $(s/D) < 0,2$  je pravděpodobně způsobeno nějakými jevy vznikajícími při malém doskoku  $s$  (menší než 3 mm pro náš případ).

Rozhodně by šlo odhadnout funkci mnohem lépe při větším počtu měření pro vzdálenosti  $(s/D) > 0,2$ .

### 6.3 Mapování elektrostatického pole

Pro obě konfigurace elektrod jsme dostali výsledek odpovídající našim představám o elektrostatickém poli. Pro konfiguraci elektrod prstenec-kladívko je vidět ze grafu na Obr. 6, že potenciálové hladiny jsou opravdu kružnice.

Z grafu pro druhou konfiguraci tyčka-kladívko v oblasti vpravo od anody nepozorujeme žádný potenciálový rozdíl, stejně i v oblasti vlevo od katody, ale mezi katodou a anodou vidíme rozdíl potenciálu. Z projekce ekvipotenciálních ploch je krásně vidět, že pro bodovou katodu potenciálové hladiny jsou kružnice.

## 7 Závěr

Změřili jsme hodnotu průrazného napětí  $U_p$  mezi deskami kondenzátoru pro různé vzdálenosti desek  $d$ . Stanovili jsme hodnotu dielektrické pevnosti vzduchu jako veličinu intenzity pole mezi deskami kondenzátoru při kterém dochází k vodivosti dielektrika  $E_p = (2,25 \pm 0,08) \text{ MV m}^{-1}$ . Porovnáním s tabulkovou hodnotou jsme zjistili, že hodnoty nemůžeme považovat za shodné.

Změřili jsme přitažlivé síly mezi deskami kondenzátoru v závislosti na doskoku jiskřiště  $s$  pro tři různé vzdálenosti desek  $d$  a pokusili jsme se určit neznámou funkci  $f(\frac{s}{D})$  ze vztahu (4) vzhledem k podmínce  $f(0) = 1$  a monotónnosti funkce:

$$f\left(\frac{s}{D}\right) = (1,37 \pm 0,13) \frac{s}{D} + 1$$

Experimentální data a nalezenou funkci jsme zpracovali do grafu na Obr. 4.



Zvolili jsme si dvě konfigurace elektrod, a pro napětí 10 V jsme zmapovali potenciál v síti  $12 \times 12$  bodů. Potenciálová mapa pro uspořádání prstenec-kladívko je na Obr. 5, mapa pro uspořádání tyč-kladívko je na Obr. 6.

## Literatura

- [1] Návod - Kondenzátor, mapování elektrostatického pole - [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/435372/mod\\_resource/content/3/Kondenzator\\_181008.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/435372/mod_resource/content/3/Kondenzator_181008.pdf) [cit.14.11.2021]
- [2] Základy fyzikálních měření, prezentace - <https://people.fjfi.cvut.cz/chalopet/ZFM/ZFM.pdf> [cit.14.11.2021]
- [3] WolframAlpha - <https://www.wolframalpha.com/input/?i=gravitation+acceleration+in+prague> [cit.14.11.2021]
- [4] Hector, L. G.; Schultz, H. L. (1936). "The Dielectric Constant of Air at Radiofrequencies". - *Physics*. 7 (4): 133–136.
- [5] WolframAlpha - <https://www.wolframalpha.com/input/?i=permittivity+of+vacuum> [cit.14.11.2021]
- [6] WolframAlpha - <https://www.wolframalpha.com/input/?i=atmospheric+pressure+prague> [cit.14.11.2021]
- [7] Tipler, Paul A. College Physics. Worth, 1987: 467. - Dielectric Strength of Air

# Příloha

## 8 Tabulky a grafy

$d[\text{mm}]$	$s[\text{mm}]$	$m[\text{g}]$	$\sigma_m[\text{g}]$	$U[\text{kV}]$	$\sigma_U[\text{kV}]$	$s/D[-]$	$\sigma_{s/D}[-]$	$f(s/D)[\text{cm/kV}]$	$\sigma_{f(s/D)}[\text{cm/kV}]$
17,10	3,0	3,2	0,1	9,80	0,20	0,208	0,004	1,38	0,06
17,10	4,0	5,2	0,1	12,55	0,18	0,277	0,005	1,44	0,04
17,10	5,0	8,1	0,1	15,66	0,15	0,347	0,005	1,45	0,03
17,10	1,3	0,4	0,1	3,50	0,60	0,090	0,004	1,70	0,30
17,10	1,7	0,9	0,1	5,20	0,40	0,118	0,004	1,47	0,14
17,10	2,1	1,4	0,1	6,50	0,30	0,146	0,004	1,50	0,10
17,10	2,3	1,7	0,1	7,20	0,30	0,160	0,004	1,45	0,09
17,10	2,5	2,0	0,1	7,80	0,30	0,173	0,004	1,45	0,08
17,10	3,5	4,0	0,1	11,00	0,20	0,243	0,004	1,44	0,05
17,10	4,5	6,6	0,1	14,14	0,16	0,312	0,005	1,44	0,04
11,25	1,6	1,9	0,1	5,00	0,19	0,111	0,004	1,50	0,10
11,25	1,4	1,5	0,1	4,40	0,20	0,097	0,004	1,43	0,12
11,25	1,8	2,5	0,1	5,72	0,16	0,125	0,004	1,42	0,09
11,25	2,4	4,8	0,1	7,93	0,12	0,166	0,004	1,37	0,06
11,25	3,2	9,0	0,1	10,90	0,10	0,222	0,004	1,33	0,04
11,25	3,6	10,8	0,2	11,90	0,18	0,250	0,005	1,37	0,04
11,25	4,0	13,4	0,2	13,25	0,16	0,277	0,005	1,37	0,04
11,25	4,4	16,6	0,2	14,75	0,15	0,305	0,005	1,35	0,03
11,25	1,2	1,1	0,1	3,80	0,20	0,083	0,004	1,43	0,15
11,25	2,0	3,2	0,1	6,48	0,15	0,139	0,004	1,40	0,08
6,00	1,2	3,8	0,1	3,76	0,08	0,083	0,004	1,44	0,12
6,00	1,3	4,5	0,1	4,10	0,07	0,090	0,004	1,44	0,11
6,00	1,4	5,6	0,1	4,57	0,07	0,097	0,004	1,40	0,10
6,00	1,5	6,5	0,1	4,92	0,07	0,104	0,004	1,38	0,09
6,00	1,6	7,6	0,1	5,32	0,07	0,111	0,004	1,36	0,09
6,00	1,7	9,0	0,1	5,79	0,07	0,118	0,004	1,33	0,08
6,00	1,8	10,5	0,2	6,30	0,10	0,125	0,004	1,30	0,08
6,00	1,9	12,4	0,2	6,80	0,10	0,132	0,004	1,26	0,07
6,00	2,0	14,6	0,2	7,40	0,10	0,139	0,004	1,23	0,06
6,00	2,2	20,9	0,2	8,80	0,10	0,153	0,004	1,13	0,05

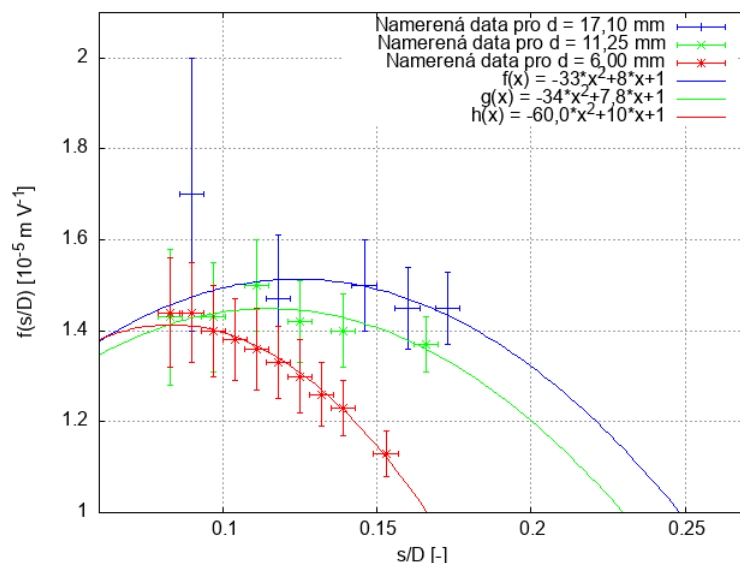
Tab. 4: Naměřená data a vypočtené hodnoty při průrazu na kulovém jiskřišti pro tři různé vzdálenosti  $d$  desek kondenzátoru s chybou 0,05 mm.  $s$  je vzdálenost mezi kuličkami jiskřiště,  $m$  je rozdíl hodnot na stupnici vah do nabití desek kondenzátoru a v moment průrazu vyjádřený v jednotkách hmotnosti,  $\sigma_m$  je chyba tohoto rozdílu,  $F$  je síla působící mezi deskami s chybou  $\sigma_F$  a  $U_p$  je napětí na kondenzátoru ve chvíli průrazu s příslušnou chybou  $\sigma_{U_p}$ ,  $s/D$  je poměr doskoku  $s$  a průměru  $D$  koulí jiskřiště s příslušnou chybou  $\sigma_{s/D}$  a  $f(s/D)$  je funkce ze vztahu (5) s chybou  $\sigma_{f(s/D)}$ .

	X											
Y	1,62	2,38	3,32	4,36	5,45	7,52	8,71	5,99	4,76	3,74	2,47	1,65
	2,06	2,78	3,88	5,12	6,48	8,04	9,13	7,11	5,42	4,29	3,19	2,18
	2,36	3,34	4,40	5,55	6,73	7,85	9,30	7,71	6,18	4,88	3,78	2,82
	2,25	3,56	4,75	5,83	7,01	7,92	9,36	7,85	6,58	5,28	4,18	3,14
	2,88	3,87	4,91	5,99	7,14	8,08	9,46	8,05	6,84	5,52	4,43	3,38
	2,95	4,02	5,06	6,08	7,20	8,11	9,22	8,18	6,75	5,54	4,36	3,30
	2,91	3,94	5,09	6,08	7,13	8,12	9,35	7,93	6,57	5,57	4,33	3,32
	2,75	3,78	4,83	5,99	7,21	8,00	9,22	7,51	6,23	4,96	3,84	2,86
	1,95	3,20	4,30	5,40	6,65	7,71	9,09	6,95	5,41	4,53	3,46	2,45
	1,94	2,74	3,74	5,00	6,26	7,96	8,78	6,30	4,80	3,50	2,59	1,71
	1,01	1,92	3,00	4,02	5,13	6,51	6,05	4,58	3,41	2,46	1,62	1,03
	0,94	1,04	1,63	2,30	3,02	3,40	3,30	2,74	2,15	1,48	0,81	0,03

Tab. 5: Naměřené hodnoty napětí  $U$  [V] v bodech mřížky  $12 \times 12$  pro uspořádání prstenec-kladívko.

	X											
Y	9,00	9,10	9,42	9,08	8,18	7,58	7,05	6,65	6,31	6,09	5,94	5,85
	9,10	9,20	9,36	8,81	8,00	7,26	6,62	6,12	5,86	5,71	5,61	5,55
	9,10	9,16	9,27	8,65	7,74	7,02	6,15	5,66	5,30	5,24	5,25	5,31
	9,13	9,15	9,20	8,62	7,73	6,65	5,66	4,88	4,64	4,71	4,95	5,14
	9,01	9,01	9,00	8,56	7,70	6,62	5,51	3,58	3,60	4,26	4,77	5,04
	9,01	8,98	8,94	8,40	7,72	6,51	5,14	3,92	3,82	4,39	4,89	5,17
	9,01	9,00	8,98	8,55	7,74	6,88	5,94	5,27	5,01	5,05	5,26	5,39
	9,05	9,05	9,05	8,67	7,98	7,30	6,55	6,01	5,71	5,60	5,58	5,61
	9,05	9,12	9,23	8,94	8,37	7,57	7,03	6,51	6,17	5,98	5,87	5,82
	9,05	9,13	9,48	9,37	8,55	7,88	7,35	6,86	6,54	6,32	6,16	6,06
	8,98	9,00	9,02	8,83	8,44	7,91	7,45	7,11	6,78	6,54	6,33	6,22
	8,88	8,81	8,72	8,50	8,22	7,87	7,50	7,18	6,90	6,68	6,50	6,33

Tab. 6: Naměřené hodnoty napětí  $U$  [V] v bodech mřížky  $12 \times 12$  pro uspořádání tyčka-kladívko.



Obr. 7: Naměřené hodnoty neznámé funkce  $f(s/D)$  v závislosti na poměru doskoku  $s$  a průměru  $D$  koulí jiskřiště pro dvě různé hodnoty vzdálenosti  $d$  desek kondenzátoru pro body  $(s/D) < 0,2$ , proložení naměřených hodnot kvadratickými funkcemi ve tvaru  $f(x)$ ,  $g(x)$  a  $h(x)$  procházejícími bodem  $(0,1)$ .

## 9 Domácí příprava

1) Gaussův zákon:  $\oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon}$   $\Rightarrow$  pro plošný  $\Rightarrow ES = \frac{Q}{\epsilon}$   
 Pro deskový kondenzátor  
 platí:  $U = Ed \Rightarrow E = \frac{U}{d} = \frac{Q}{S\epsilon} \Rightarrow \frac{Q}{U} = \epsilon \frac{S}{d} \Rightarrow \boxed{C = \frac{Q}{U} = \epsilon \frac{S}{d}}$

2)  $E = \frac{U}{d} = \frac{Q}{S\epsilon} \Rightarrow \epsilon = \frac{Qd}{US} \Rightarrow \boxed{\frac{S}{d} = \frac{Q}{U\epsilon}}$

Nechť  $Q_{\max} = 50 \mu C$ ,  $U_{\max} = 100 \text{ kV}$ ,  $\epsilon = 8,859 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

Pak  $\frac{S}{d} = \frac{Q_{\max}}{U_{\max} \cdot \epsilon} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^3 \cdot 8,859 \cdot 10^{-12}} \approx 56,4 \text{ m}$

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
 Fyzikální praktikum I - zimní semestr

*Šubert*