



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Studijní program: **P2612** **Elektrotechnika a Informatika**
Studijní obor: **3901V55** **Aplikované vědy v inženýrství**

Vliv mechanických veličin na síly působící v kondenzátorech s asymetrickými elektrodami

**The influence of mechanical parameters on forces
affecting a capacitor with asymmetrical electrodes**

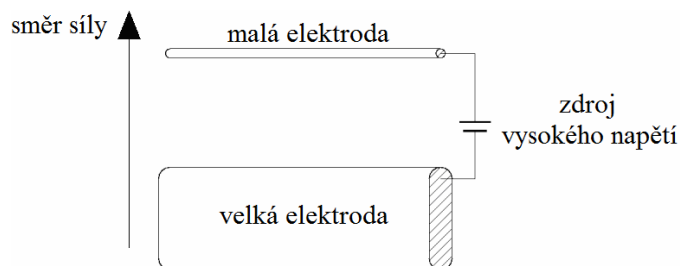
**AUTOREFERÁT
DISERTAČNÍ PRÁCE**

Autor: Ing. Bc. Michal Malík

Školitel: Doc. Ing. Miroslav Svoboda

Úvod a současný stav

Existuje jev, při kterém po připojení vysokého stejnosměrného napětí na výrazně asymetrický kondenzátor dojde ke vzniku síly (v řádu mN) působící v jednom směru na celý kondenzátor. Tento jev byl objeven na začátku 20. století, kdy si jej nechal patentovat T. T. Brown [2]. Ten se jevem zabýval společně s Dr. P. A. Biefeldem následujících téměř 40 let. Jejich výzkum prokázal, že směr síly je vždy od větší elektrody k menší. (viz obr. 1).



Obr. 1: Schéma kondenzátoru a směr vznikající síly – upraveno z [1]

V současné době se jev opět dostává do popředí odborného zájmu. Ovšem z článků, patentů a studií, které vznikají, je možné se dočíst velice málo nového kromě konstatování, že jev opravdu existuje. Výzkumníci (lze zmínit např. J. Campbella [3], T. Bahdera [4] nebo F. Canninga [5]) se spokojují s tímto konstatováním a případné změny v designu asymetrického kondenzátoru, na kterých svá měření prováděli, nejsou nijak diskutovány ani zdůvodněny. Jednou z nových skutečností, které je možné se dočíst, je existence sekundárního jevu – proudění vzduchu vznikajícího okolo kondenzátoru – jako přímého důsledku vzniku síly. Stále však probíhají diskuze, zda a jak je možné toto proudění využít [6].

Ačkoliv je tento jev známý již téměř 90 let, faktory, které ovlivňují vznikající sílu, okolní proudění vzduchu a tedy i možnosti využití, nebyly zatím nikde podrobně popsány. Tato práce se proto zaměří právě na část výzkumu, který byl zatím výrazně opomíjen – totiž na vliv mechanických vlastností, tedy tvaru, velikosti a struktury elektrod asymetrického kondenzátoru na velikost generované síly.

Jako východisko pro tuto práci posloužily teoretické předpoklady v [7], kde je podrobně popsán princip vzniku síly. Zároveň je zde odvozen vzorec popisující velikost síly.

$$F_E = I \cdot \frac{d}{k}, \quad (1)$$

kde F_E je vznikající síla, I procházející proud, d je vzdálenost mezi elektrodami a k je konstanta pohyblivosti iontů.

1. Příprava měření

Před vlastním měřením bylo nutné provést několik kroků. Mezi ně patří výběr vhodné metody měření a stavba základního modelu kondenzátoru, na kterém budou následující měření prováděna.

1. 1. Metoda měření

Jako metoda měření bylo nakonec vybráno vážení přesnou digitální váhou. Kondenzátor bude na váze umístěn do vertikální polohy a měřit budeme změnu hmotnosti kondenzátoru (rozdíl hmotností před a po připojení vysokého napětí). Díky vertikálnímu směru působení vznikající síly ji můžeme získat jednoduchým přepočtem z hmotnosti:

$$F = g \cdot (m - m_0) = g \cdot \Delta m, \quad (2)$$

kde F je síla vznikající na kondenzátoru, g je konstanta gravitačního zrychlení (pro jednoduchost uvažujeme $g = 9,81$), Δm je změna hmotnosti, tj. rozdíl naměřené hmotnosti v klidovém stavu m_0 a hmotnosti po připojení vysokého napětí m . Protože nám digitální váha umožní vynulovat hodnotu m_0 , budeme opravdu měřit pouze jednu hodnotu – tedy Δm .

1. 2. Vybraný asymetrický kondenzátor

Protože je mým úkolem v této práci popsat závislost mezi mechanickými změnami kondenzátoru s asymetrickými elektrodami a silou na něm vznikající, je potřeba vybrat základní tvar kondenzátoru tak, aby na něm bylo možné snadno měnit zvolené parametry. Je nutné zajistit, aby při změně jednoho parametru nedošlo ke změně parametrů dalších. Tím by byly jakékoliv pozorované závislosti téměř nezhodnotitelné.

Za základní tvar bude tedy považován design kondenzátoru, ve kterém malou elektrodu tvoří tenký měděný drát napnutý nad polystyrénovým (z důvodu malé hmotnosti a relativně snadné výroby) kvádrem potaženým aluminiovou folií, který tak tvoří elektrodu velkou. Pro tento typ kondenzátoru se při experimentech vžil termín *element*. Jedná se totiž o základní stavební jednotku většiny obecně používaných modelů asymetrických kondenzátorů.



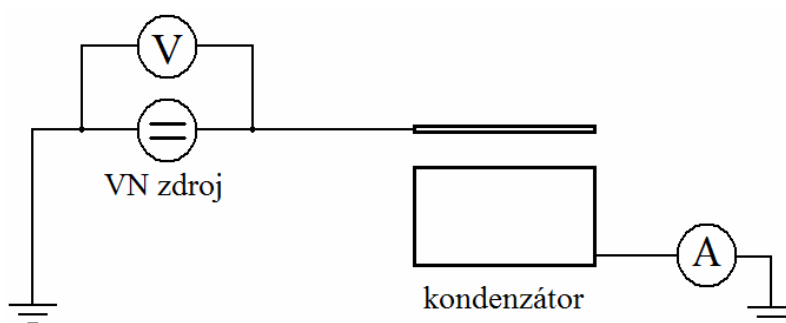
Obr. 2: Základní design kondenzátoru - element

Tabulka 1: Výchozí parametry elementu

	základní rozměr [mm]	značka
průměr malé elektrody	0,1	p
vzdálenost elektrod	30	d
délka velké elektrody	100	a
výška velké elektrody	50	b
šířka velké elektrody	10	c

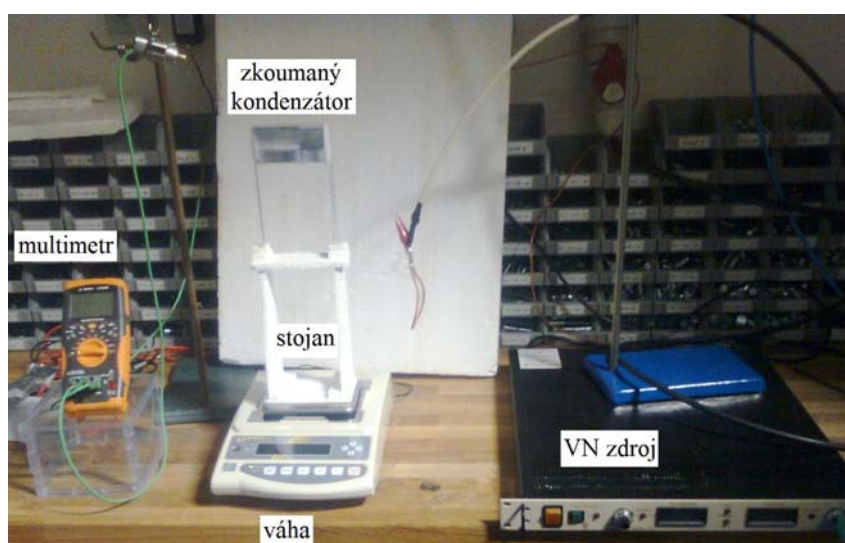
1. 3. Měřicí sestava a postup měření

Ačkoliv je cílem této práce popsat vliv mechanických veličin na vznikající sílu, pro potřeby měření je nutné měřit jak protékající proud, tak napětí na elektrodách kondenzátoru. Měřicí sestava kolem asymetrického kondenzátoru je tedy zapojena jako velice jednoduchý elektrický obvod (viz obr. 3). Protože cílem této práce není popsat elektrické závislosti ani elektrické parametry, které mohou mít vliv na vznikající sílu, toto zapojení (samozřejmě s výjimkou vlastního kondenzátoru) zůstane nezměněno pro všechna prováděná měření.



Obr. 3: Schéma elektrického zapojení asymetrického kondenzátoru v průběhu měření

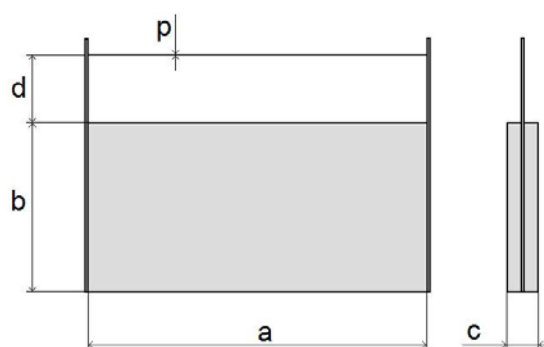
Zdroj vysokého napětí je připojen na malou elektrodu, přičemž napětí na něm je měřeno paralelně připojeným voltmetrem. Velká elektroda je naopak uzemněná a uzavírá tak obvod. Procházející proud je měřen až v uzemněné části za velkou elektrodou kondenzátoru proto, aby byl ampérmetr ochráněn před vysokým napětím. Tím je také zajištěno, že bude změřen opravdu jen proud, který projde asymetrickým kondenzátorem. Celý měřicí setup lze vidět na obr. 4. Aby byla ochráněna citlivá elektronika digitální váhy od vysokého napětí přítomného na váženém kondenzátoru, byl použit polystyrenový stojan, který stojí na misce váhy a nese měřený kondenzátor. Orientace asymetrického kondenzátoru byla zvolena tak, aby měřicí sestava nebránila průchodu proudění vzduchu, který vzniká v okolí kondenzátoru současně s měřenou silou.



Obr. 4: Fotografie použitého měřicího vybavení

2. Vliv rozměrů elementu

V této kapitole budou analyzovány vlivy změn jednotlivých rozměrů (a , b , c , d , p) na elementu (viz obr. 5), tedy kondenzátoru, který jsme si v minulé kapitole zvolili za základní.



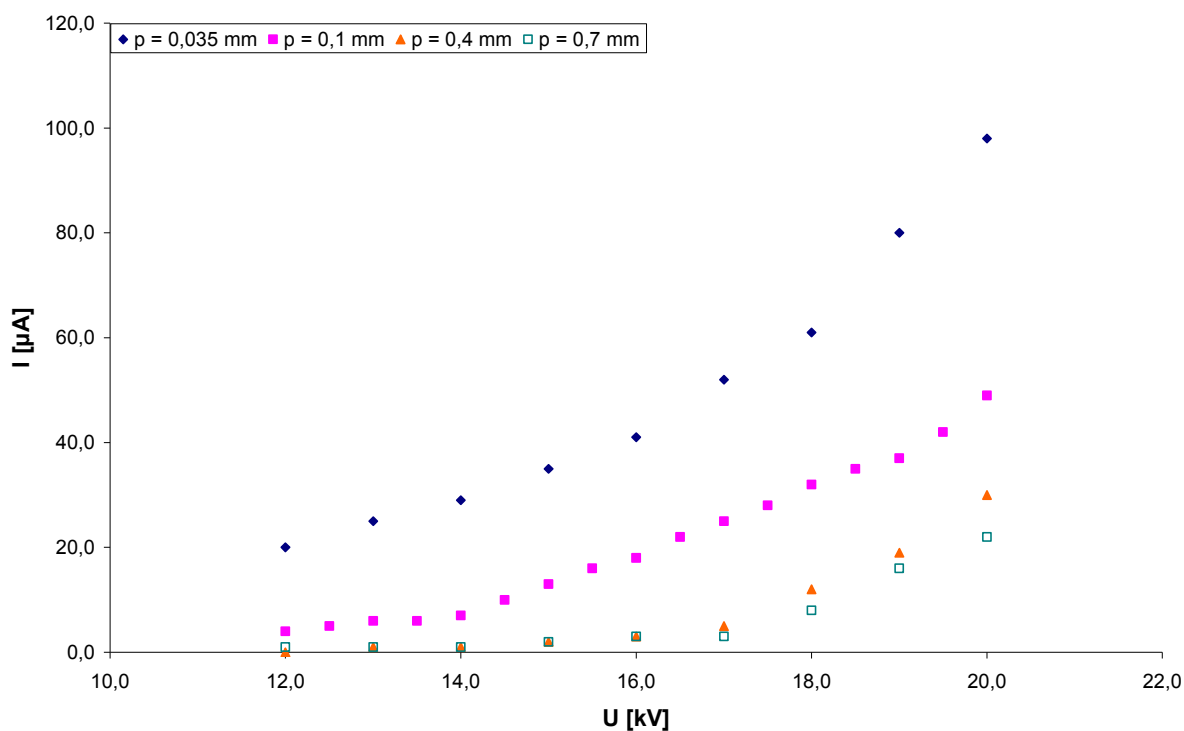
Obr. 5: Schéma elementu s vyznačenými rozměry

Změny jednotlivých rozměrů budou prováděny v okolí hodnot zvolených za základní (viz tabulka 1).

2. 1. Průměr malé elektrody

Z teorie předpokládáme [7], že účelem asymetrie kondenzátoru je primárně zajistit přítomnost nabitých částic v okolí kondenzátoru a zároveň zachovat pouze jeden preferovaný směr, kterým se budou v prostoru mezi elektrodami pohybovat. V jednoduchosti to tedy znamená, že chceme, aby nabitě částice vznikaly pouze kolem jedné elektrody a pohybovaly se ke druhé díky elektrickému poli mezi elektrodami.

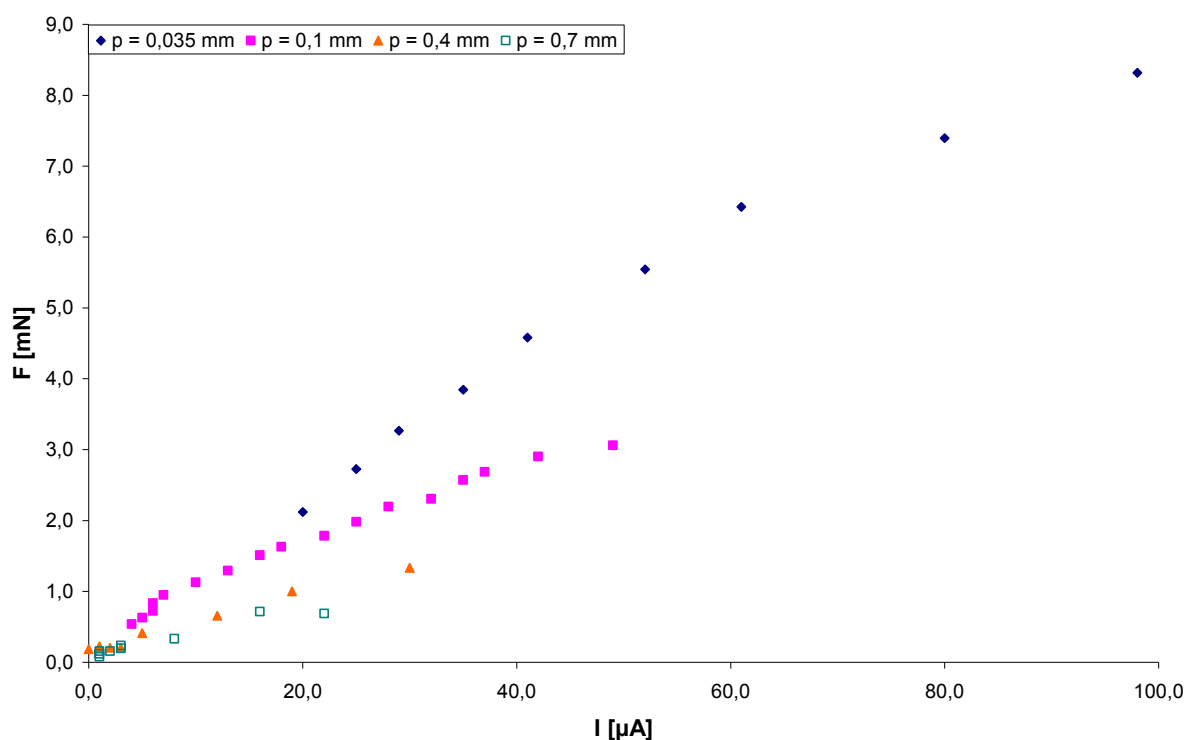
Z toho tedy vyplývá požadavek na co nejvyšší intenzitu elektrického pole kolem malé elektrody jakožto zdroje ionizace a iontů. Protože víme, že vysoké intenzity elektrického pole lze dosáhnout pomocí zmenšení poloměru křivosti např. hran a hrotů, můžeme zajistit vysokou intenzitu kolem malé drátové elektrody tak, že snížíme její průměr.



Graf 1: Závislost procházejícího proudu I na připojeném napětí U v rozsahu 12 kV – 20 kV pro různé průměry drátu malé elektrody

Při měření byla na kondenzátoru vyměřována pouze malá elektroda při zachování totožné velké elektrody a stejné vzdálenosti elektrod.

Z grafu 1 je zřejmé, že při stejných hodnotách napětí je pro menší průměr drátové elektrody hodnota procházejícího proudu větší. To potvrzuje hypotézu, že kolem tenčího drátu bude větší intenzita elektrického pole, které způsobí silnější ionizaci, a tedy vznik více nabitých částic přenášejících náboj mezi elektrodami (elektrický proud). S větším počtem pohybujících se nabitých částic vzroste také vznikající síla, která je tímto pohybem generována.



Graf 2: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro různé průměry drátu malé elektrody při použitém napětí 12 kV – 20 kV

Zatím jsme rozdíly naměřené pro různé průměry malých elektrod přikládali pouze rozdílu v počtu nabitých částic vznikajících kolem malé elektrody. Ovšem z grafu 2 je zřejmé, že kondenzátory vykazují pro stejné hodnoty proudu různou sílu. Opět zde platí, že čím nižší průměr malé elektrody, tím vyšší síla na daném kondenzátoru vznikne. Tuto závislost lze snadno vysvětlit tak, že zvýšená intenzita elektrického pole pro menší průměry malé elektrody nezpůsobí pouze nárůst počtu nabitých částic, ale zvýší také silové působení, kterým jsou tyto částice ovlivňovány v elektrickém poli. To lze ukázat na známém základním vzorci:

$$\vec{F}_e = Q \cdot \vec{E}, \quad (3)$$

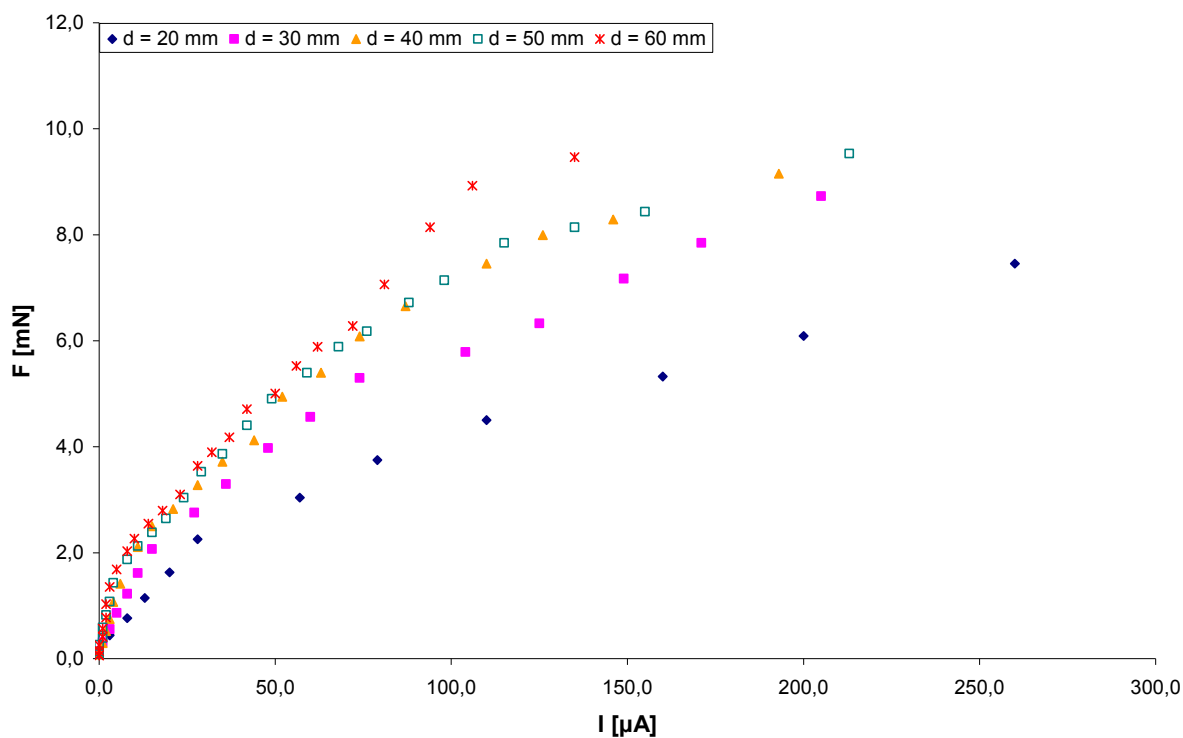
kde F_e je elektrická síla působící na částici s nábojem Q v elektrickém poli o intenzitě E .

Lze tedy říci, že účinek změny průměru malé elektrody je trojí. Zmenšení průměru malé elektrody způsobí:

1. zvýšení počtu nabitých částic pohybujících se mezi elektrodami, a tedy přímo úměrně zvětší vznikající sílu.
2. zvětšení intenzity elektrického pole kolem elektrody, čímž se zvýší silový příspěvek jednotlivých nabitých částic na kondenzátor.
3. snížení hodnoty napětí potřebné pro začátek vzniku síly (lze vidět z VA charakteristiky - viz graf 1).

2. 2. Vzdálenost elektrod

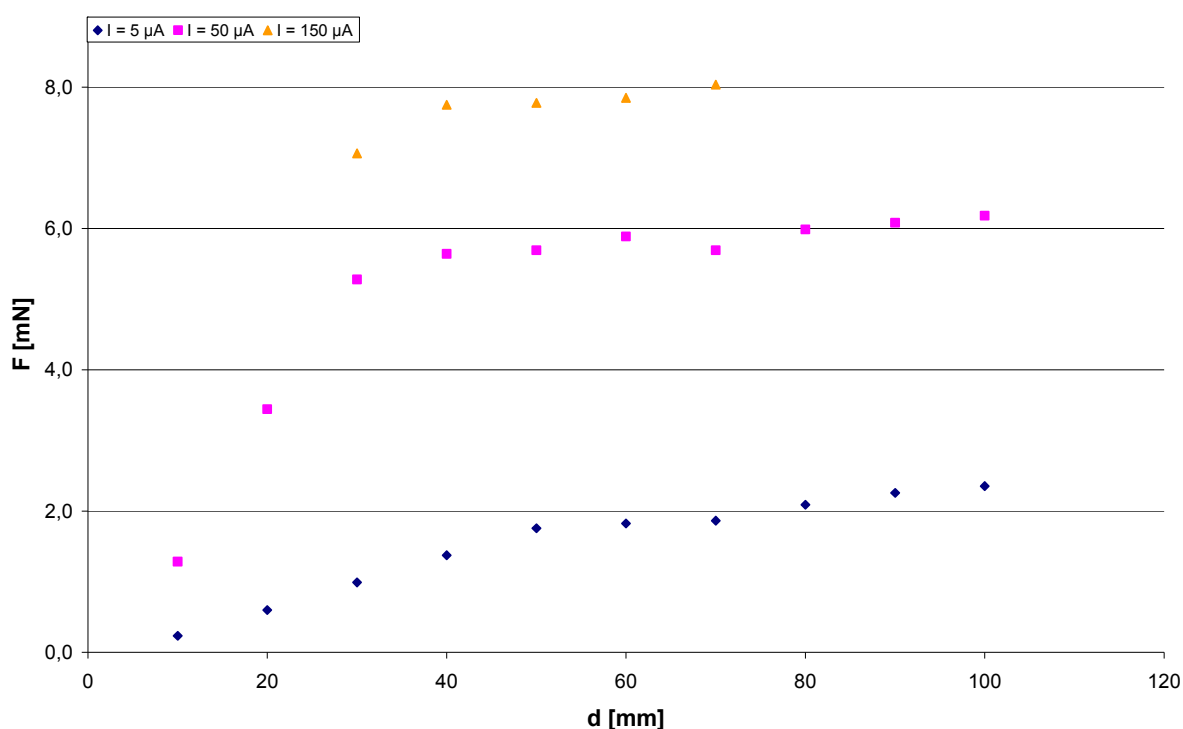
Předpokladem pro toto měření bude shoda s odvozeným vzorcem (1) pro výpočet vznikající síly. Musí tedy platit přímá úměrnost mezi vzdáleností elektrod a velikostí vznikající síly. Důvodem je, že se zvětšením vzdálenosti mezi elektrodami vzroste dráha, kterou musí nabitá částice urazit, a tedy vzroste i počet srážek, které za svou dráhu vykonají. Z toho plyne zvýšení vznikající síly při stejném procházejícím proudu (množství nabitých částic pohybujících se mezi elektrodami) pro větší vzdálenost elektrod.



Graf 3: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro různé vzdálenosti elektrod

Graf 3 potvrzuje naši počáteční domněnku. Je zřejmé, že při zvětšení vzdálenosti mezi elektrodami dochází pro stejnou hodnotu procházejícího proudu I ke zvětšení hodnoty vznikající síly. To odpovídá vzorci (1) a potvrzuje teorii, ze které vycházíme.

Abychom získali přesnější obraz o tomto průběhu, bylo toto měření provedeno v modifikované podobě ještě jednou. Tentokrát nebyly zaznamenávány hodnoty měřených veličin pro jednotlivé hodnoty napětí, ale naopak bylo pro každou nastavenou vzdálenost elektrod napětí zvyšováno vždy až do dosažení několika konkrétních hodnot procházejícího proudu, pro které teprve byly zapsány hodnoty vznikající síly. Pro toto měření bylo navíc sledováno více hodnot vzdáleností elektrod, což v minulém grafu z důvodu přehlednosti nebylo možné. Po vynesení těchto nových a lépe srovnatelných hodnot do grafu můžeme o veličině d , tedy vzdálenosti elektrod, prohlásit ještě jeden zajímavý fakt.



Graf 4: Závislost vznikající síly F na vzdálenosti elektrod d pro několik hodnot procházejícího proudu

Z grafu 4 je jasně patrné, že předpokládaná přímá úměrnost mezi vzdáleností elektrod a vznikající silou je velice přesná, ale pouze do určité vzdálenosti. Při překročení hodnoty vzdálenosti elektrod cca 40 mm dochází k výraznému zpomalení až téměř zastavení růstu vznikající síly. To je způsobeno rekombinací nabitých částic, popřípadě svodovými proudy.

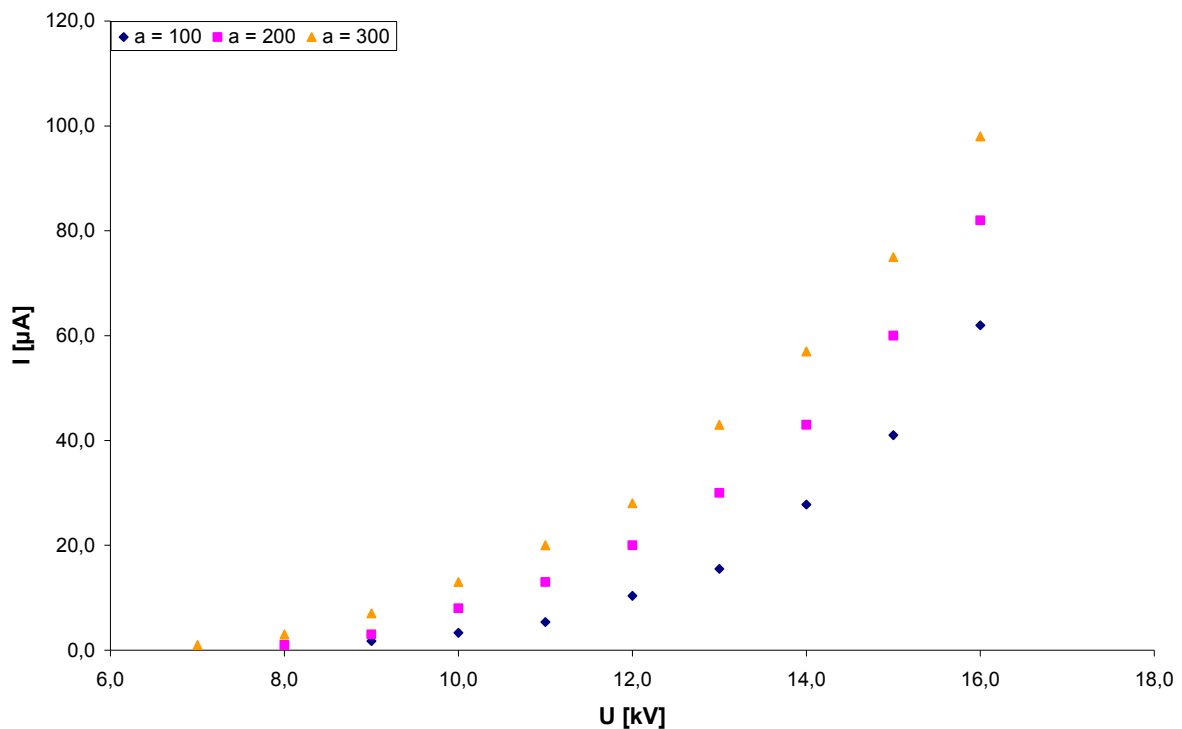
Ačkoliv nám odvozený vzorec (1) předpovídá zvýšení vznikající síly pro vyšší hodnoty vzdálenosti elektrod, není efektivní tento parametr zvyšovat nad hodnotu cca 40 mm.

2. 3. Rozměry velké elektrody

Abychom mohli posoudit vliv změn rozměrů velké elektrody na generovanou sílu, bude nutné měnit hlavní část kondenzátoru – velkou elektrodu s připevněnými distančními sloupky. Proto bylo vyrobeno několik sad kondenzátorů, které se od sebe liší vždy změnou jednoho rozměru velké elektrody (a – délka, b – výška, c – šířka), zatímco všechny ostatní rozměry kondenzátoru jsou zachovávány v základních hodnotách (viz tabulka 1).

2. 3. a. Délka

Kvůli konstrukci kondenzátoru, kterou jsme zvolili, je délka velké elektrody totožná s délkou celého kondenzátoru a tedy i s délkou elektrody malé. Předpokladem pro toto měření je, že s prodloužením rozměru a se zvětší i naměřený proud procházející mezi elektrodami. Důvodem je právě prodloužení malé elektrody, která je zdrojem ionizace okolního vzduchu. Se změnou proudu předpokládáme také úměrnou změnu vznikající síly.



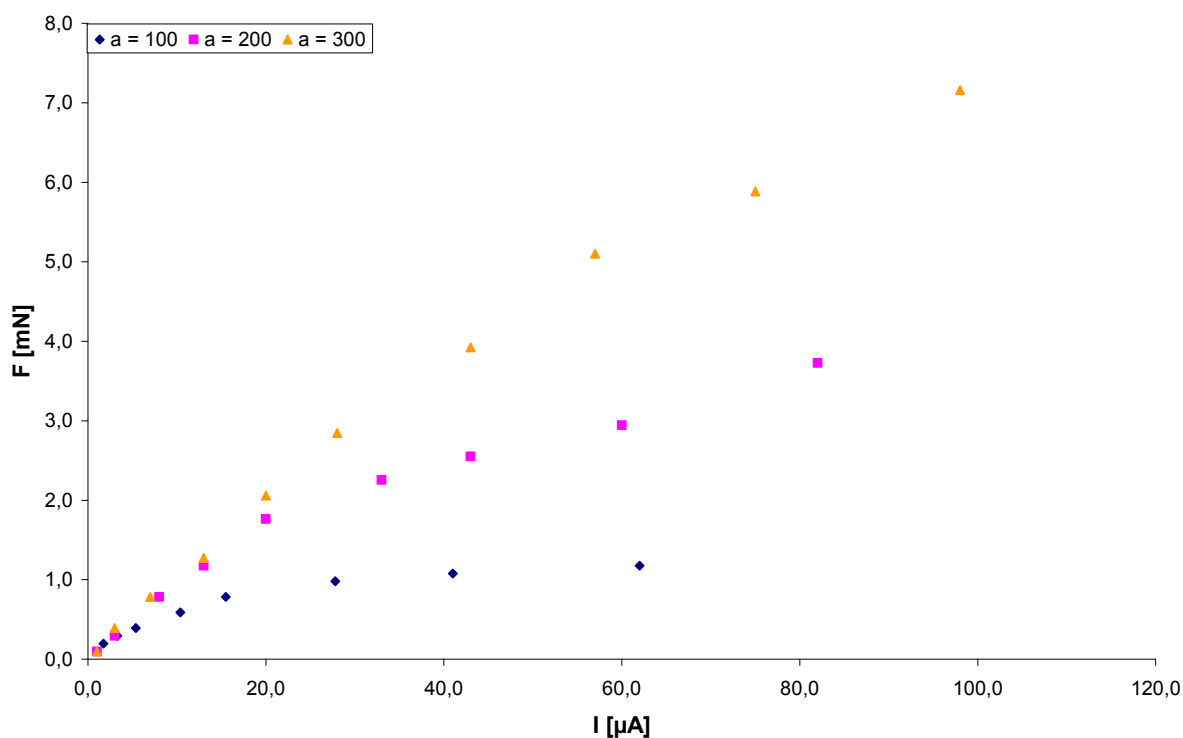
Graf 5: Závislost procházejícího proudu I na připojeném napětí U pro různé délkové rozměry kondenzátoru

Z grafu 5 vidíme, že náš předpoklad se shoduje s naměřenými daty. Při zvýšení hodnoty parametru a , tedy délky kondenzátoru a zároveň délky malé elektrody, vzniká více nabitých částic při stejném připojeném napětí. Pro nižší hodnoty napětí (respektive proudu) platí také čistě multiplikativní závislost mezi změnou délky a změnou procházejícího proudu:

$$I_2 = \frac{a_2}{a_1} I_1, \quad (4)$$

kde I_1 a I_2 jsou procházející proudy na kondenzátorech s korespondující délkou a_1 a a_2 . Například dvojnásobné prodloužení elementu vyvolá tedy dvojnásobný proud, právě proto, že se dvojnásobně prodlouží malá elektroda a tedy i prostor, ve kterém dochází k ionizaci.

Existuje ovšem hraniční hodnota napětí (cca 13 - 15 kV) při jehož překročení přestává tento vztah platit. Důvodem je odlišný průběh děje, kterým při vyšších napětích vznikají nabitě částice kolem malé elektrody. Tento fakt se shoduje se situací popsanou v článku [7]. Hodnoty síly získané pomocí vzorce (1) se také shodují s hodnotami experimentálními pouze do zmíněné hodnoty napětí.



Graf 6: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro různé délkové rozměry kondenzátoru

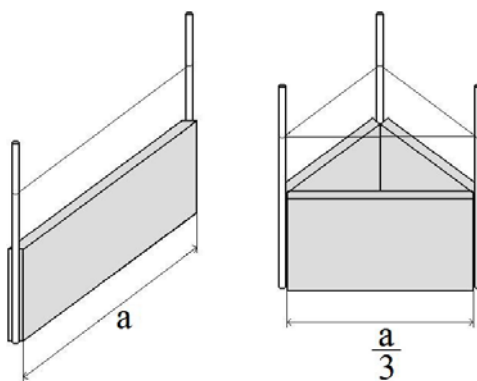
Druhá část našich předpokladů, tedy že úměrně s proudem vzroste i síla, se dle grafu 6 nepotvrdila. Pokud bychom totiž uvažovali, že se změnou délky se tvar elektrického pole téměř nemění, muselo by platit, že pro stejné hodnoty proudu dosahuje vznikající síla také stejných hodnot bez ohledu na délku kondenzátoru. Graf 6 ovšem ukazuje, že při stejných hodnotách proudu dochází při prodloužení kondenzátoru ke vzniku podstatně větší síly.

K vysvětlení situace musíme zavést novou veličinu – hustotu iontů vznikajících na jednotce délky $\rho_i(E)$. Máme dvě možnosti jak zvětšit sílu generovanou na elementu:

- 1) Zvýšením připojeného napětí U zvýšíme intenzitu elektrického pole. To následně způsobí zvýšení naší nové veličiny ρ_i , protože se zvýšením E se zvýší míra ionizace, tedy i počet vznikajících nabitých částic. Větší počet nabitých částic srážkami s částicemi okolního média produkuje ve výsledku více příspěvků k vznikající síle.
- 2) Druhou možností je při zachování stejné hodnoty napětí U , prodloužit zdroj ionizace (malou elektrodu). E a tedy i ρ_i zůstanou stejné. Ovšem celkový počet nabitých částic vznikajících kolem malé elektrody, vzroste a vzroste tedy i síla. Potřebujeme tedy nižší napětí ke generování stejného proudu při prodloužení kondenzátoru.

Víme [7], že od určité intenzity elektrického pole, respektive připojeného napětí, dochází v naměřených hodnotách ke zlomu od původního hladkého lineárního průběhu predikovaného vzorcem (1). Prodloužením kondenzátoru si tedy zajistíme, že i při vyšších hodnotách protékajícího proudu se budeme pohybovat v lineární oblasti průběhu před zlomem. Tento fakt je také dobře vidět na grafu 6. Kondenzátor o větší délce vykazuje delší lineární průběh růstu síly v závislosti na zvyšujícím se proudu.

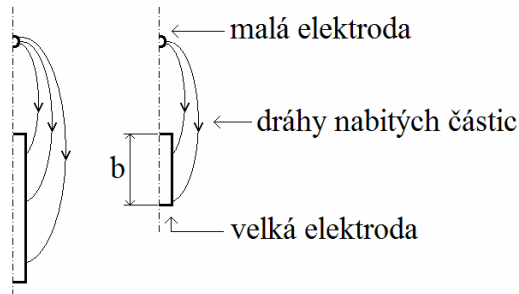
S tím souvisí otázka jiných geometrií elementu. Porovnáme-li efektivitu námi zvoleného elementu s modelem často používaným při prezentaci jevu – *lifter* (viz obr. 6), zjistíme, že pokud je jejich aktivní délka opravdu shodná, jejich účinnost se nijak neliší. Celé měření včetně závěrů je uvedeno v kompletní verzi této disertační práce.



Obr. 6: Schéma kondenzátorů s geometrií element a lifter se stejnou aktivní délkou

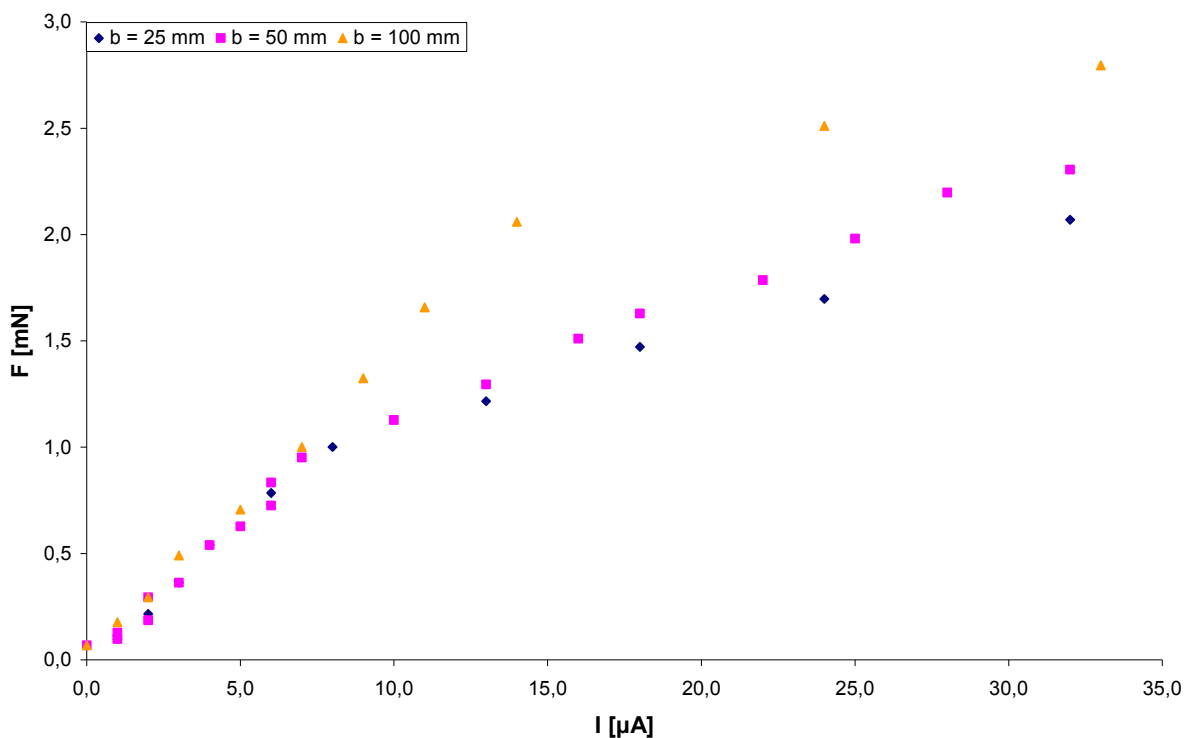
2. 3. b. Výška velké elektrody

Předpokládaným výsledkem měření vznikající síly na elementech s různým parametrem b je zvýšení vznikající síly při zvětšení výšky velké elektrody. Při zvětšení tohoto rozměru se totiž prodlužuje část drah, po kterých se pohybují nabitě částice od jedné elektrody k druhé (viz obr. 7). Nabitě částice tak na delší dráze absolvují více srážek.



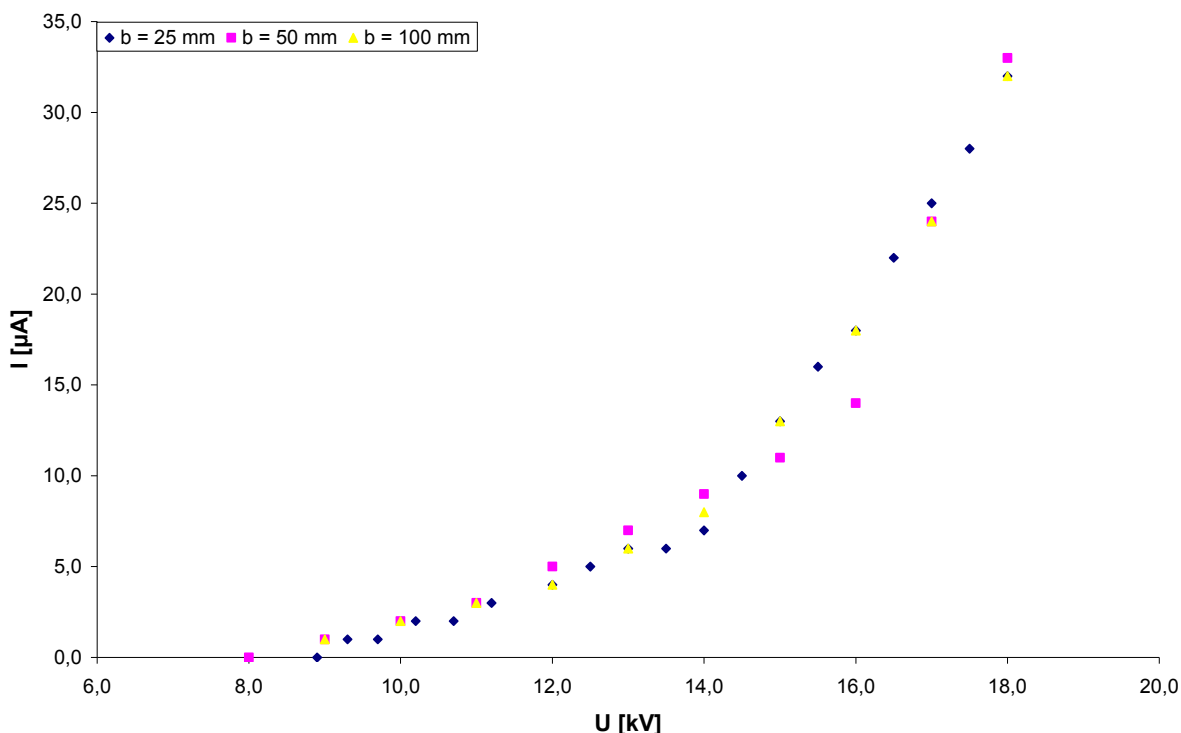
Obr. 7: Schematické znázornění změny délky drah, po kterých cestují nabitě částice od jedné elektrody k druhé, při změně výšky velké elektrody b

Na grafu 7 je patrné, že se náš předpoklad potvrdil. Při stejném proudu je vznikající síla opravdu vyšší pro element s větším rozměrem b . Stejný počet nabitých částic tedy poskytuje větší příspěvek ke vznikající síle.



Graf 7: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro elementy s různou výškou velké elektrody b

Dalším potvrzením hypotézy jsou rozdíly generované síly pro jednotlivé elementy. Zvětšení výšky velké elektrody nemá na celkové trajektorie iontů multiplikativní efekt ale pouze aditivní. Zvětšení b tak prodlouží trajektorii části iontů (cestujících po obvodu kondenzátoru nikoliv přímo mezi elektrodami) pouze o danou hodnotu. A protože je rozdíl mezi prvními dvěma hodnotami b pouze 25 mm je rozdíl na nich naměřených hodnot síly výrazně nižší, než rozdíl hodnot naměřených pro elementy s rozdílem výšek 50 mm. Dalším potvrzením této hypotézy je voltampérová charakteristika na grafu 8.



Graf 8: Závislost procházejícího proudu I na připojeném napětí U pro elementy s různou výškou velké elektrody b

V grafu 8 lze zřetelně vidět, že změnou výšky velké elektrody nedojde ke změně hodnot proudu protékajícího kondenzátorem. Změna naměřených hodnot generované síly tedy není způsobena zvýšením / snížením počtu nabitých částic. Jedná se tedy opravdu pouze o změnu délky dráhy, kterou urazí, a tedy i počtu srážek, které na této dráze absolvují.

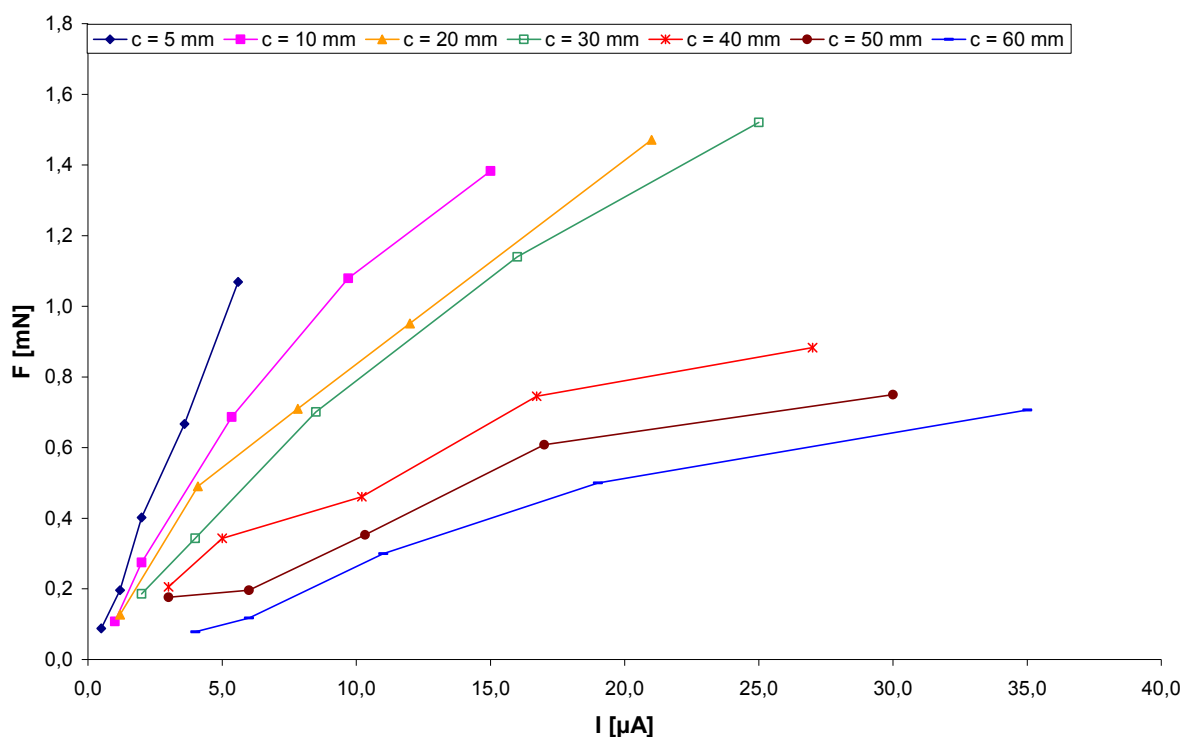
Je vidět, že rozdíly naměřených hodnot vznikající síly jsou stále velmi nízké. Při dvojnásobném zvětšení parametru b z 50 mm (základní rozměr) na 100 mm bylo využito stejné množství materiálu (resp. přidané hmotnosti) jako na zvětšení délky kondenzátoru a ze 100 mm (základní rozměr) na 200 mm v minulé kapitole (graf 6). Přesto je rozdíl vznikající síly při změně délky a více než dvojnásobný než při změně výšky velké elektrody b .

2. 3. c. Šířka velké elektrody

Předpokladem pro následující měření je, že pro vyšší hodnoty c bude hodnota naměřené síly nižší. Víme, že měřená síla je způsobena složením součtu hybnosti získanou srážkami nabitých částic s neutrálními částicemi okolního vzduchu. Nelze ovšem zapomínat, že stejnou hybnost, která je po srážce díky elektrickému poli přenesena z nabitých částic na kondenzátor, odnášejí po srážkách i neutrální částice vzduchu. Pokud se tato hybnost ztratí srážkami s jinými neutrálními částicemi vzduchu, popřípadě s okolními objekty, všechny příspěvky hybnosti přenesené na kondenzátor opravdu přispívají ke vznikající síle.

Druhou možností ale je, že neutrální částice vzduchu nesoucí hybnost ze srážky s nabitou částicí narazí na kondenzátor a svou hybnost mu tak předá. Část síly, která vznikla díky srážce nabitě částice s touto neutrální částicí vzduchu, se tak odečte. Výsledná generovaná síla je tedy o tolik menší, kolik neutrálních částic vrátí svou hybnost zpět kondenzátoru.

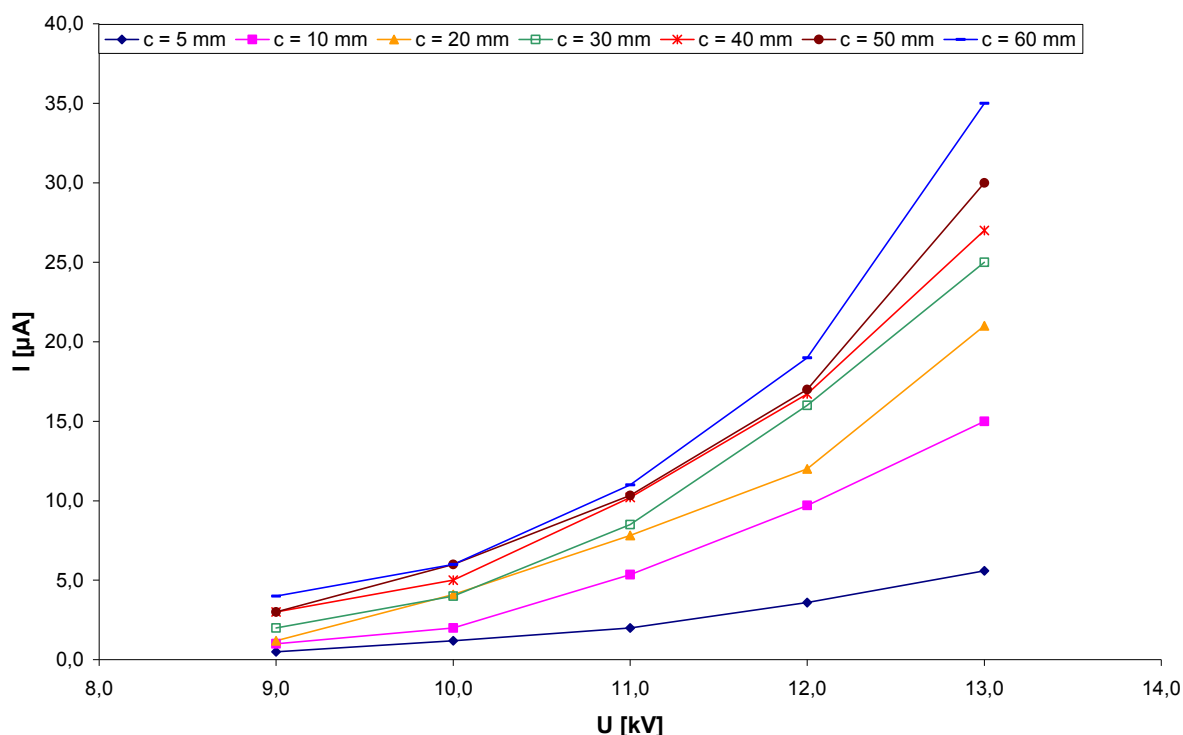
Po dokončení měření byly hodnoty vloženy do grafu 9. Z důvodu zvýšení přehlednosti při velkém počtu naměřených hodnot byly body jednotlivých řad spojeny stejně barevnými úsečkami.



Graf 9: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro elementy s různou šířkou velké elektrody při použitím napětí 9 kV – 13 kV

Z grafu 9 je možné učinit dva důležité závěry. První je potvrzení našeho předpokladu. Elementy s širší velkou elektrodou opravdu generují nižší sílu při stejném protékajícím proudu.

Druhým poznatkem je skutečnost, že při stejných hodnotách připojeného napětí prochází mezi elektrodami elementů s vyšší hodnotou c vyšší elektrický proud. Tento fakt lze pozorovat lépe, podíváme-li se na jejich voltampérovou charakteristiku (viz graf 10). Spojení bodových vyjádření naměřených hodnot zde bylo opět provedeno pouze z důvodu lepší přehlednosti.



Graf 10: Závislost procházejícího proudu I na připojeném napětí U pro elementy s různou šířkou velké elektrody

Lze tedy říci, že pokud by nedocházelo k dodatečným ztrátám síly vlivem srážek neutrálních molekul s širokou velkou elektrodou, elementy s větším parametrem c by měly vykazovat výrazné zvýšení generované síly právě díky tomu, že jimi prochází výrazně vyšší elektrický proud (viz graf 10).

3. Vliv aerodynamického odporu

V této kapitole se budeme zabývat tématem nastíněným v kapitole minulé. Bude zde diskutováno, jak je vznikající síla ovlivněna prouděním vzduchu, které se kolem kondenzátoru s asymetrickými elektrodami objevuje a je vyvolané stejným principem, který dává vzniknout pozorované síle.

3. 1. Rychlost generovaného proudění vzduchu

Proudění vzduchu vznikající na kondenzátoru bylo diskutováno již v několika kapitolách, ovšem vždy pouze jen jako jev, který je třeba mít na paměti při měření vznikající síly. Vyjdeme-li ze základních vztahů, lze odvodit následující vzorec pro rychlost neutrálního vzduchu narážejícího do čela velké elektrody elementu:

$$v = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{I \cdot d}{k} - F \right)}{C_x \cdot \rho \cdot S}}, \quad (5)$$

kde F je naměřená síla, I je proud procházející kondenzátorem, d je vzdálenost mezi elektrodami, k je konstanta pohyblivosti iontů, které svým pohybem mezi elektrodami způsobí vznik síly, ρ je hustota vzduchu, S je obsah kolmého průřezu obtékané velké elektrody a C_x je bezrozměrný tvarový koeficient odporu velké elektrody.

Pokud dosadíme za proměnné naměřené hodnoty, je při napětí $U = 15$ kV hodnota rychlosti proudění, které „brzdí“ sílu generovanou na elementu $v = 0,7366$ m.s⁻¹. Měřením při stejných podmínkách metodou PIV jsme došli ke stejnému výsledku. Tyto závěry byly publikovány v impaktovaném časopise [8].

Celé odvození včetně počátečních podmínek, výchozích vzorců a podrobností měření lze najít v kompletní verzi této disertační práce.

3. 2. Minimalizace odporu prostředí

Z odvozeného vztahu i z následného měření v předešlé kapitole vyplývá, že hlavním faktorem snižujícím efektivitu zkoumaného jevu z hlediska aerodynamického odporu je kolmý průřez velké elektrody. Čím větší bude její plocha S a čím méně aerodynamický bude její tvar charakterizovaný tvarovým koeficientem C_x , tím větší bude odporová síla snižující sílu, kterou se snažíme na kondenzátoru generovat.

Naopak abychom zachovaly maximální protékající proud a tedy i maximální vznikající sílu, je nutné zvětšit parametry a (délka) a c (šířka velké elektrody). Tím se ale paradoxně zvětší plocha S , která je definována jako $S = a \cdot c$.

Na základě těchto podmínek byla nalezena alternativní podoba velké elektrody – vodivá síť. Celé znění přechodu elementu na síťovou elektrodu společně s prvními ověřovacími měřeními lze nalézt v kompletní verzi této disertační práce.

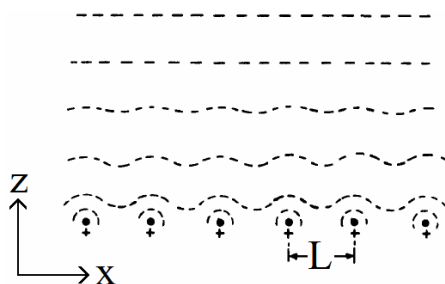
4. Síťová elektroda

Z měření uvedených v předchozích kapitolách je patrné, že vodivá plocha by měla fungovat jako nejefektivnější forma velké elektrody. Aby ale síla mohla být generována, je třeba minimalizovat aerodynamický odpor velké elektrody, zatímco její elektrické vlastnosti (fyzické rozměry umožňující maximální procházející proud) zůstanou nezměněny. Řešením je vodivá síť. V první části této kapitoly bude zodpovězena otázka, zda je možné připravit vodivou síť tak, aby se pro malou elektrodu chovala jako souvislá plocha.

V následující části kapitoly budou popsány další vlastnosti vodivé sítě a možnosti, které poskytuje její použití v roli velké elektrody.

4. 1. Elektrické pole kolem vodivé sítě

Pro jednoduchost uvažujme síť tvořenou nabitými vzájemně paralelními vodiči rozmístěnými s konstantními rozestupy. V literatuře [9] se uvádí, že pokud pozorujeme elektrické pole z dostatečné vzdálenosti nad sítí vodičů, bude se jevit jako uniformní. Bude tak vypadat stejně, jako kdyby byly náboje přítomné na jednotlivých vodičích rozloženy rovnoměrně na vodivé ploše. Pokud se budeme k vodičům přibližovat, pole přestane mít uniformní charakter (viz obr. 8).

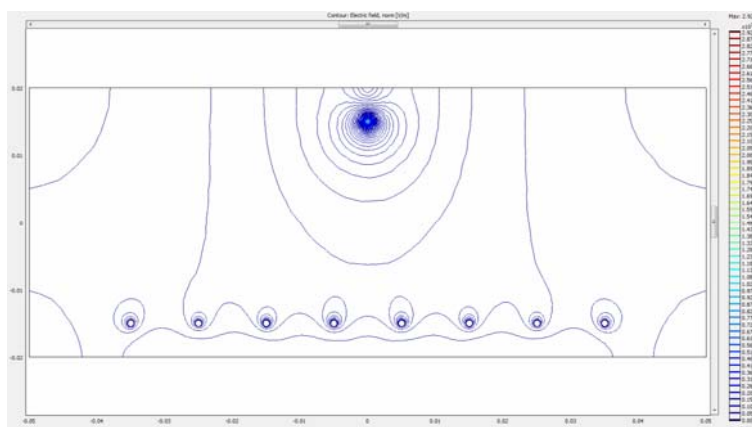


Obr. 8: Nákres ekvipotenciálních ploch nad sítí nabitých vodičů – upraveno z [9]

Uvažujeme-li, že jsou fluktuační pole periodické, je možné je definovat pomocí jednoduchého Fourierova rozvoje. Lze dokázat, že pro první harmonickou se amplituda fluktuačních snižuje s násobkem $e^{-2\pi}$ (výrazný pokles) pokaždé, když se od sítě vzdálíme po ose z o jednu velikost L (vzdálenost mezi vodiči sítě). Pokles dalších harmonických je ještě výraznější. Z toho je vidět, že ve vzdálenosti od sítě pouze několik délek L budou oscilace pole minimální a samotné pole tedy bude téměř uniformní.

V případě již testovaného kondenzátoru měla použitá síťka vzdálenost vláken $L = 1$ cm při vzdálenosti elektrod $d = 3$ cm. Vzdálenost od sítě je tedy trojnásobkem rozestupu jejích vláken. Amplituda oscilací elektrického pole v takové vzdálenosti poklesne s $e^{-6\pi}$. Pole tedy lze považovat za uniformní. K jeho homogenizaci přispívá také fakt, že použitá síťka není tvořena pouze jednou vrstvou paralelních vodičů. Navíc má ještě druhou vrstvu, kolmou na vrstvu původní.

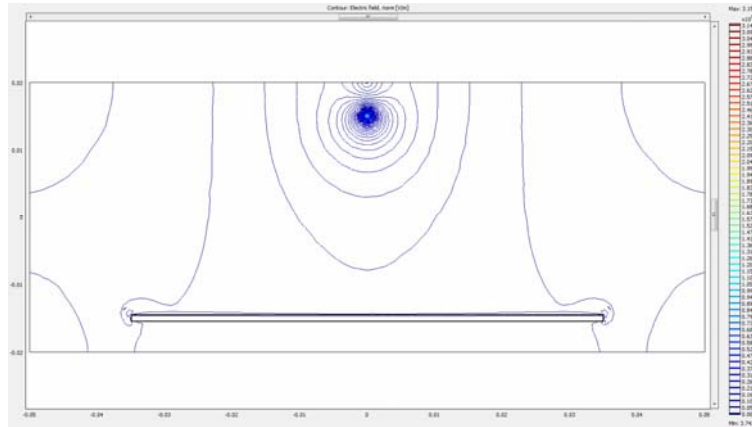
Pro další potvrzení této teorie byla vytvořena simulace elektrického pole kolem kondenzátoru s velkou síťovou elektrodou (viz obr. 8). Problém byl zjednodušen pouze na 2D úlohu. Síťová elektroda je opět tvořena pouze jednou vrstvou paralelních vodičů. Simulace byla provedena v programu COMSOL. Ukazuje tvar ekvipotenciálních ploch (reprezentovaných křivkami ve 2D) charakterizujících rozložení elektrického pole mezi oběma elektrodami.



Obr. 8: Simulace elektrického pole kolem soustavy dvou elektrod – malá elektroda připojená na napětí $U = 15$ kV je tvořena tenkým vodičem ($p = 0,1$ mm), uzemněná velká elektroda je tvořena sítí paralelních vodičů s rozestupem $L = 1$ cm při vzdálenosti elektrod $d = 3$ cm

Jako důkaz, že je možné síťovou elektrodu nahradit vodivou plochou bez výrazných změn v rozložení elektrického pole, lze porovnat simulaci na obr. 8 se simulací na obr. 9. Zde

je vykresleno elektrické pole kolem elektrod kondenzátoru se stejnými parametry jako v předchozím případě, jen síťová elektroda je nahrazena vodivou plochou o stejné tloušťce jako dráty tvořící síťku (1 mm).



Obr. 9: Simulace elektrického pole kolem soustavy dvou elektrod – malá elektroda připojená na napětí $U = 15 \text{ kV}$ je tvořena tenkým vodičem ($p = 0,1 \text{ mm}$) uzemněná velká elektroda je tvořena vodivou plochou při vzdálenosti elektrod $d = 3 \text{ cm}$

Ze srovnání výsledků obou simulací je zřejmé, že tvar elektrického pole je od určité vzdálenosti od velké elektrody nezávislý na tom, zda se jedná o vodivou plochu nebo o síť vodičů. Z obrázků je vidět, že tato vzdálenost je několikrát menší než použitá vzdálenost elektrod 3 cm.

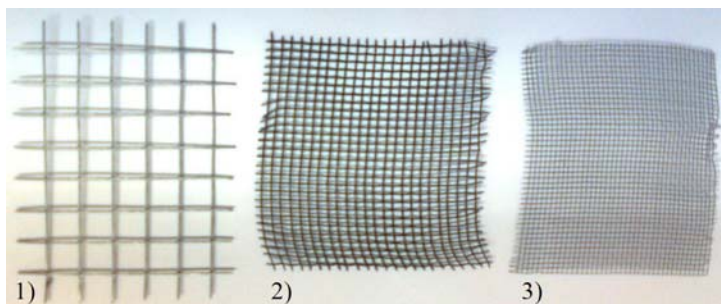
4. 2. Hustota síťové elektrody

Aby bylo možné ověřit omezení vlivu aerodynamického odporu velké elektrody a zároveň splnění požadavků na tvar elektrické pole kolem velké elektrody, bylo nutné provést měření na kondenzátoru se síťovou elektrodou s různými vlastnostmi. Aby bylo možné výsledky těchto měření porovnávat, vnější rozměry (tvar, délka a , šířka c) síťové elektrody musí být stejné. Byl proto vyroben rám, ve kterém je možné vyměňovat síťky bez nutnosti stavět celý nový kondenzátor.

Nová konstrukce se skládá ze dvou obdélníkových plastových rámců, které je možné spojit šrouby. Aby nedocházelo k nechtěným interakcím s elektrickým polem v kondenzátoru, byly pro tento účel použity šrouby plastové. Mezi rámy je možné vložit a pomocí šroubů

upevnit jakoukoliv síťku. Díky rámu je síťka vždy vypnutá a rovná. V případě jemnějších síťových struktur, které nejsou samonosné, je tato skutečnost velmi důležitá.

Pro měření byly vybrány tři síťky o různých průměrech vodičů p_v a s různým rozestupem L (viz obr. 10).



Obr. 10: Fotografie vzorků měřených vodivých sítí s parametry: 1) $L = 10 \text{ mm}$, $p_v = 1 \text{ mm}$,
2) $L = 2,5 \text{ mm}$, $p_v = 0,5 \text{ mm}$, 3) $L = 1,5 \text{ mm}$, $p_v = 0,2 \text{ mm}$

Protože jsou u každé síťky uvedeny dva údaje, zavedli jsme bezrozměrnou veličinu, která v sobě oba parametry spojuje. *Hustota sítě* ρ_s je definována jako podíl plochy zakryté síťkou:

$$\rho_s = 2 \frac{p_v}{L} - \frac{p_v^2}{L^2}. \quad (6)$$

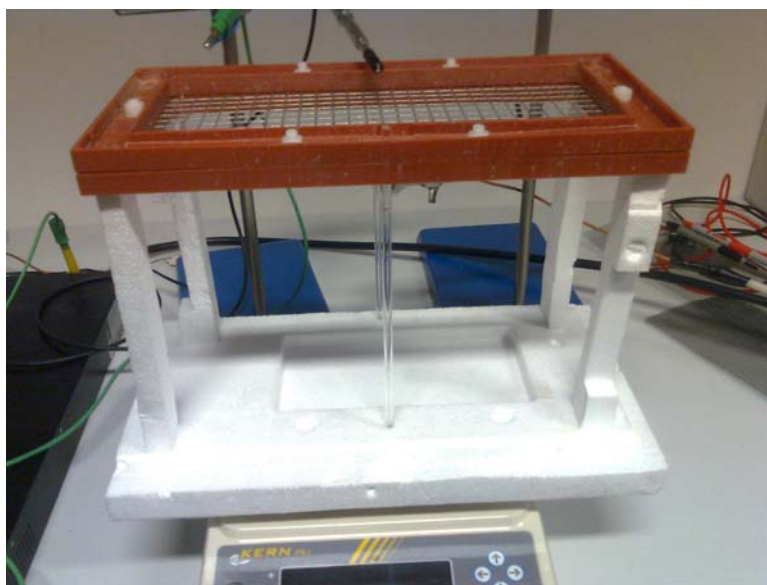
Parametr ρ_s tedy udává část plochy, kterou zabírá síť o stejných vnějších rozměrech (a a c), a jeho hodnoty se pohybují v rozsahu od 0 do 1.

Sítka na obr. 10 lze tedy charakterizovat pomocí této nové veličiny následovně.

Tabulka 2: Vlastnosti měřených sítěk

	průměr vodičů p_v [mm]	vzdálenost vodičů L [mm]	hustota sítě ρ_s [-]
síťka 1	1	10	0,19
síťka 2	0,5	2,5	0,36
síťka 3	0,2	1,5	0,25

Nově zkonstruovaný rám opatřený skleněnými distančními sloupky byl umístěn na váhu (viz obr. 11) a pomocí několika polystyrénových podpěr byl fixován v již ověřené orientaci (malá drátová elektroda umístěná pod velkou síťovou elektrodou). Aby bylo možné měřit také vliv hustoty síťky na proud neutrálních částic, byl do vzdálenosti 2 cm nad síťovou elektrodu umístěn senzor anemometru TESTO 425. Jelikož se nachází až za uzemněnou elektrodou, nebezpečí ovlivnění elektrickým polem je minimální. Ze stejného důvodu bude anemometr snímat rychlost proudění tvořeného neutrálními částicemi vzduchu procházejícími síťkou. Po změření rychlosti pro síťové elektrody s různou hustotou (viz tabulka 2) bude možné rozhodnout, zda a jaký má tato veličina vliv na procházející proudění.



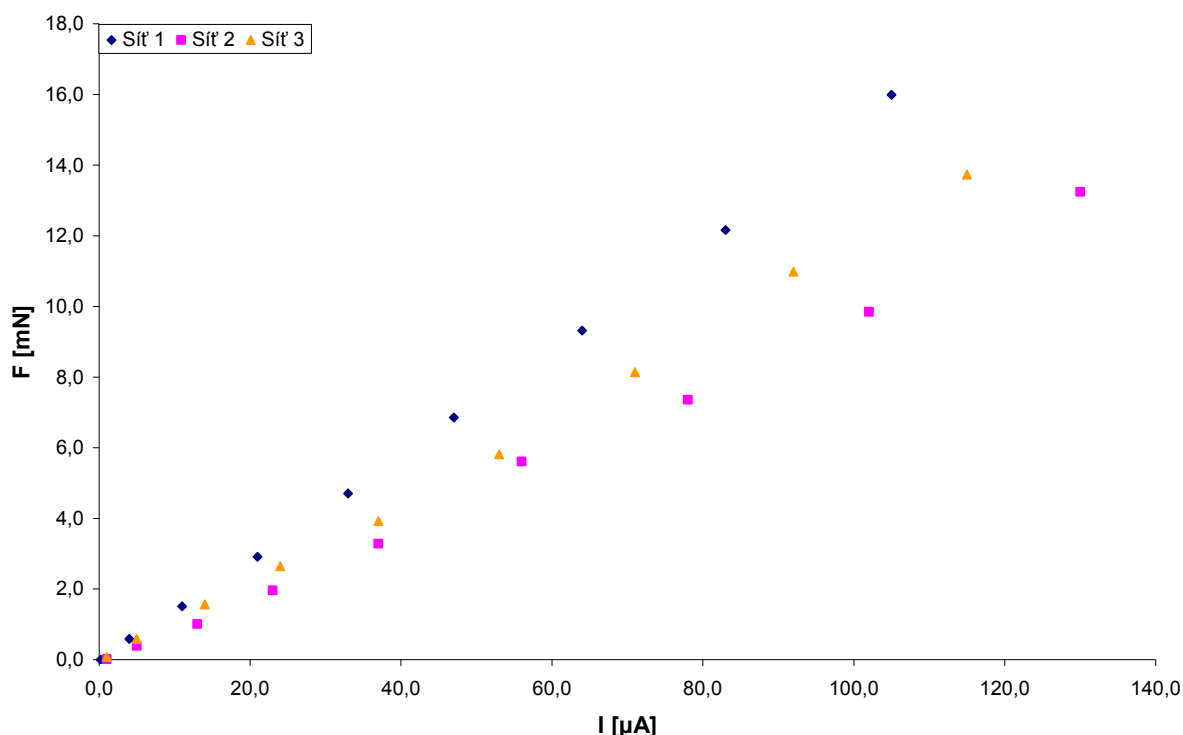
Obr. 11: Fotografie měřicí aparatury s novým kondenzátorem se síťovou elektrodou (na fotografii Síť 1) a s připojeným senzorem anemometru nad síťovou elektrodou

Síťová elektroda byla vždy přesně přizpůsobena vnitřním rozměrům plastového rámu tak, aby jej celý vyplnila. Plocha síťky svíraná rámem byla zanedbatelná, takže i v případě, že by pole této části síťky zakryté dielektrikem rámu mohlo ovlivňovat dráhy pohybujících se nabitých částic, byl by tento vliv minimální. Při zachování původního značení rozměrů asymetrického kondenzátoru (viz tabulka 1) je délka elektrody $a = 10$ cm a šířka velké elektrody $c = 26$ cm (tento rozměr byl zvolen kvůli maximální váživosti digitální váhy). U síťových elektrod tvořících rovnou plochu rozměr b odpovídá průměru vláken síťky p , a není jej nutné uvažovat, neboť je proti ostatním rozměrům nepatrný.

Na grafu 11 je možné pozorovat několik zajímavých skutečností. První z nich je výrazně vyšší hodnota naměřené síly, než jaké byly pozorovány na kondenzátorech typu

element. Při napětích, která byla použita při měření na kondenzátoru se síťovou elektrodou, byl element se stejnou délkou malé elektrody jen vzácně schopen generovat sílu blížíci se hodnotě 9 – 10 mN a na rozdíl od kondenzátoru se síťovou elektrodou ji nikdy nepřekročil.

Druhým poznatkem, který je možné z grafu 11 vyčíst, je vliv hustoty sítě ρ_s (viz tabulka 2) na velikost naměřené síly. Síť 1 s nejnižší hustotou ($\rho_s = 0,19$) vykazuje nejvyšší generovanou sílu pro daný procházející proud, zatímco kondenzátor opatřený velkou elektrodou ze sítě 2 s nejvyšší hustotou ($\rho_s = 0,36$) vykazuje nejnižší naměřenou sílu ze všech tří měřených kondenzátorů.



Graf 11: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro tři síťové elektrody s různou hustotou sítě při použitém napětí 7 kV – 23 kV

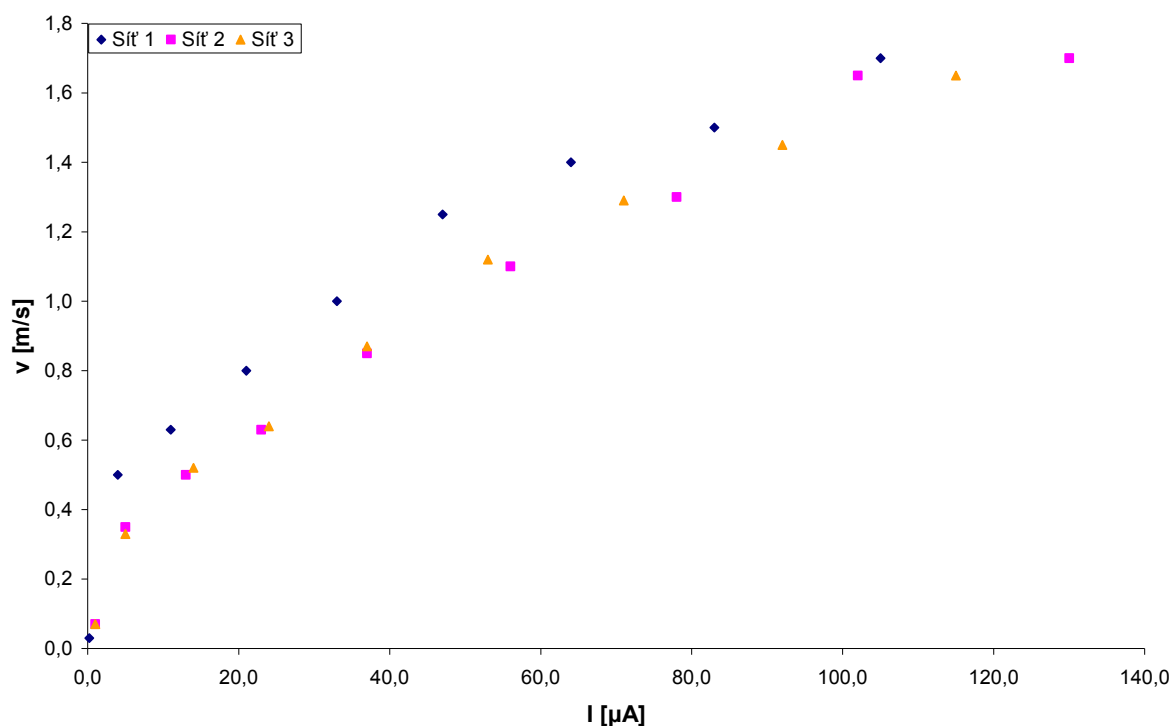
Důvodů pro tento rozdíl může být několik. Prvním z nich je rozdíl v naměřených hodnotách proudu pro stejnou hodnotu napětí pro různé síťky. V grafu 11 je možné pozorovat, že pro vyšší hodnoty proudu platí, že síťky s vyšší hustotou vykazují vyšší proud při stejném napětí než síťky s hustotou menší (např. síť 1 dosáhne proudu cca 100 μA při napětí 23 kV zatímco síť 2 dosáhne stejného proudu při napětí 21 kV). Ačkoliv se síťka z elektrického hlediska jeví jako plocha, siločáry elektrického pole se stejně mohou uzavírat pouze do vodičů sítě (viz simulace na obrázcích 32 a 33). Čím má síťka nižší hustotu, tím je menší plocha, ke které směřují nabitě částice letící od malé elektrody. Je možné, že zde

dochází ke vzájemnému ovlivňování nabitých částic, které jsou elektrickým polem nuceny pohybovat se velice blízko sebe (mohou se projevit Coulombovské síly).

Pro generování stejného procházejícího proudu potřebují sítky s nižší hustotou vyšší připojené napětí než sítky s hustotou vyšší. Právě vyšší napětí způsobující vyšší intenzitu elektrického pole mezi elektrodami má za následek větší silové působení na nabitě částice a tedy i vyšší generovanou sílu.

Druhou možností, jak lze vysvětlit rozdíl v hodnotách generované síly na kondenzátorech s různou hustotou sítě velké elektrody, je opět vliv aerodynamického odporu. Ten by měl být podle předpokladu vyšší pro síťovou elektrodu s vyšší hustotou, což by odpovídalo faktu, že hodnoty generované síly jsou nejvyšší pro síť s nejnižší hustotou a tedy nejnižším aerodynamickým odporem.

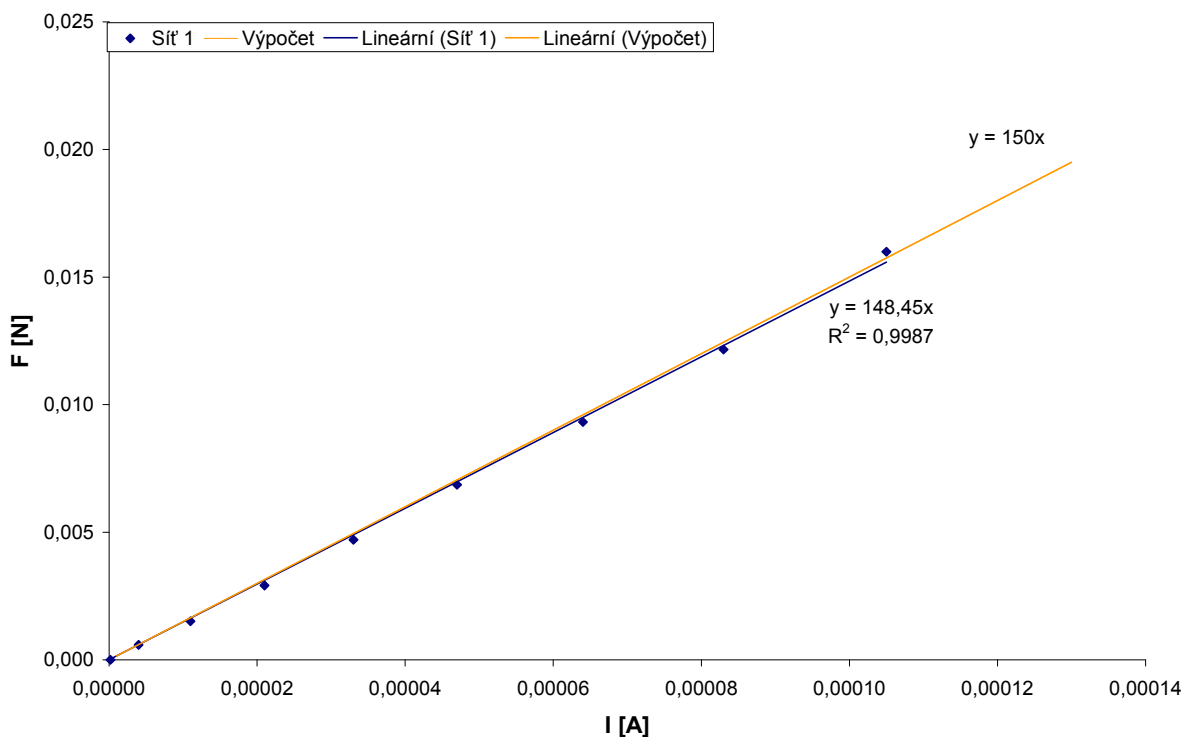
Stejně tak rychlost proudění vzduchu za síťovou elektrodou je nejvyšší pro síť 1 (nejnižší hustota sítě), jak je možné vidět na grafu 12. Ovšem rozdíly rychlostí získaných pomocí anemometru TESTO 425 (měřícího s přesností $\pm [0.03 \text{ m/s} + 5\% \text{ z naměřené hodnoty}]$) nejsou dostatečně velké na to, aby bylo možné prohlásit aerodynamický odpor za prokazatelnou příčinu rozdílu hodnot generované síly pro různé síťové elektrody.



Graf 12: Závislost rychlosti proudu vzduchu (naměřené 2 cm za síťovou elektrodou) na procházejícím proudu I pro tři síťové elektrody s různou hustotou sítě při použitém napětí 7 kV – 23 kV

Posledním poznatkem z grafu 11 je skutečnost, že i při maximálním použitém napětí 23 kV mají průběhy závislosti vznikající síly na procházejícím elektrickém proudu zcela lineární charakter. Tím se výrazně odlišují od průběhů naměřených pro původní element s kvádrou velkou elektrodou. Znamená to, že použitím síťové elektrody bylo dosaženo přiblížení k ideálnímu stavu, pro který byl odvozen vzorec (1).

Tuto skutečnost si lze ověřit na grafu 13, ve kterém jsou vyneseny hodnoty síly naměřené na síti 1 společně s hodnotami vypočtenými pomocí vzorce (1). Směrnice průběhu vypočtených hodnot odpovídá poměru $\frac{d}{k}$, kde d je vzdálenost elektrod a k odpovídá pohyblivosti iontů. V našem případě lze počítat $d = 3 \text{ cm}$ a $k = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Aby bylo možné porovnávat výsledné průběhy, bylo nutné převést naměřené hodnoty síly a elektrického proudu na základní jednotky.



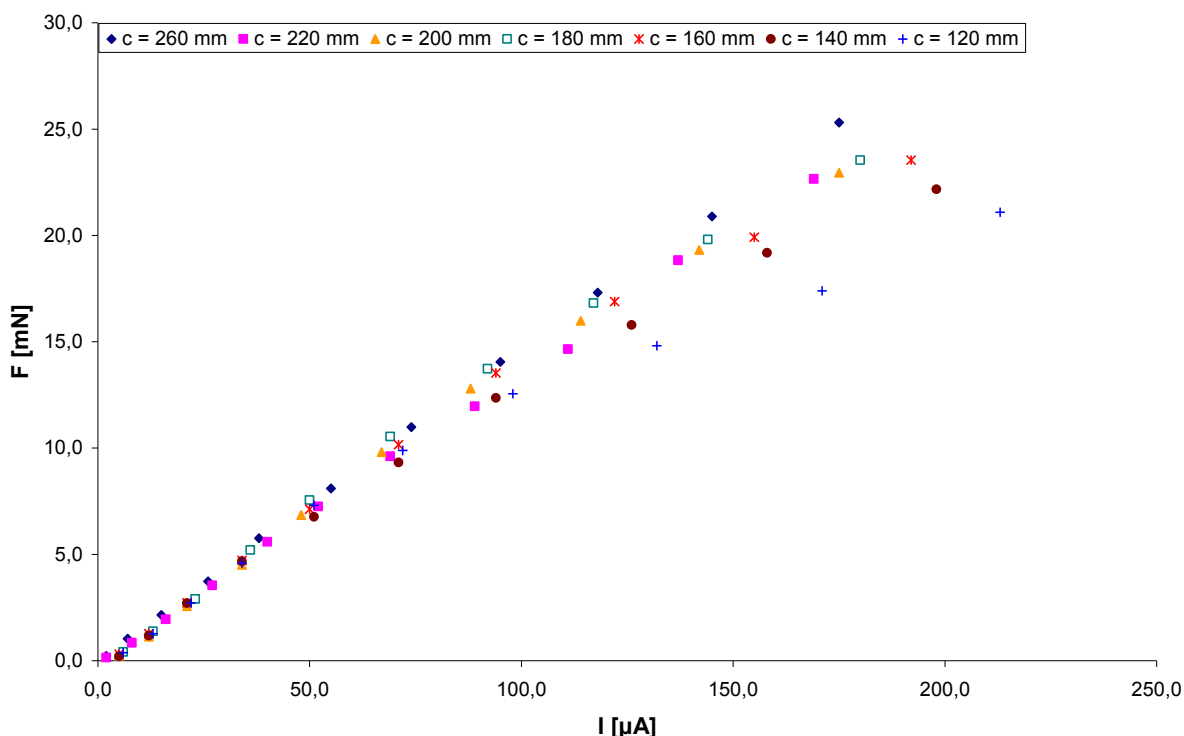
Graf 13: Srovnání závislosti vznikající síly F na procházejícím proudu I naměřené pro síť 1 s vypočtenými hodnotami

Jako důkaz linearitity byla v grafu 13 naměřenými hodnotami proložena lineární závislost (bez absolutního členu) vytvořená pomocí lineární regrese. Lineární závislost odpovídá naměřeným hodnotám s koeficientem spolehlivosti $R^2 = 0,9987$, což lze považovat za dobrou shodu. Stejnou shodu lze pozorovat mezi naměřenými hodnotami a hodnotami vypočtenými.

Při měření na elementech s kvádřovou velkou elektrodou byla pozorována shoda naměřených a vypočtených hodnot pouze do velmi nízké hodnoty proudu. Následný rozdíl v naměřených a vypočtených hodnotách byl způsoben jednak rozdílem mezi předpokládaným a skutečným tvarem kondenzátoru a tedy i elektrického pole a také vlivem aerodynamického odporu velké elektrody, který nebyl ve vzorci (1) nijak zohledněn. Použitím síťové elektrody se skutečný tvar elektrického pole kolem kondenzátoru přiblížil tvaru předpokládanému při odvození vzorce [7] a zároveň byl značně omezen vliv aerodynamického odporu. Oblast shody naměřených dat s hodnotami predikovanými vzorcem se tedy díky použití síťové elektrody výrazně rozšířila.

4. 3. Šířka síťové elektrody

V minulé kapitole bylo ukázáno, že použitím síťové elektrody s rozměry $a = 10$ cm a $c = 26$ cm je možné dosáhnout lineárního průběhu naměřených hodnot síly v závislosti na protékajícím elektrickém proudu až do maximálního měřeného napětí 23 kV. Je ovšem otázkou, jaká je minimální šířka elektrody c , aby tato lineární charakteristika platila pro celou „pracovní“ oblast kondenzátoru, tedy až do překročení dielektrické pevnosti vzduchu.

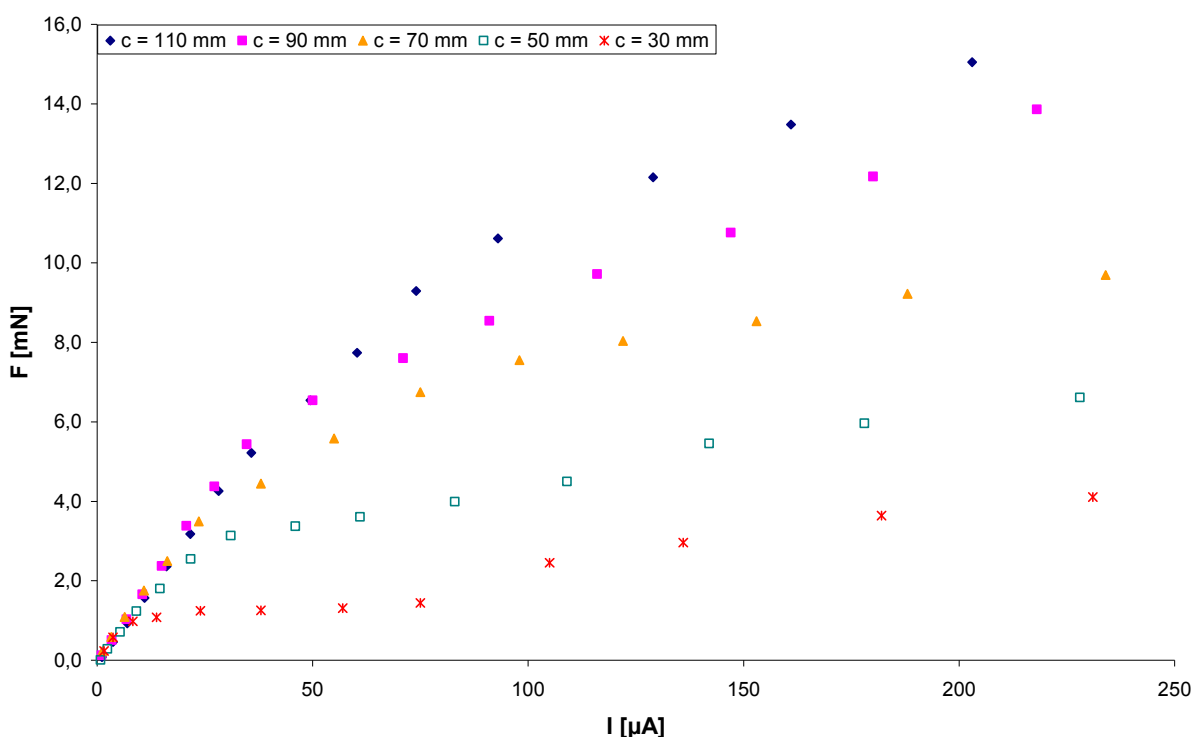


Graf 14: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro síťovou elektrodu o různé šířce c při použitím napětí 8 kV – 28 kV

Protože při použité vzdálenosti elektrod a v podmínkách, ve kterých bylo měření provedeno, došlo k překročení dielektrické pevnosti vzduchu při připojeném napětí cca 29 kV, byla měření prováděna do hodnoty napětí 28 kV.

Na grafu 14 je vidět, že pro velké elektrody o šířce 180 – 260 mm jsou naměřené hodnoty síly téměř totožné. Dokonce i průběh pro šířku 160 mm se odlišuje od předchozích pouze pro poslední naměřenou hodnotu (pro napětí 28 kV). Výraznější odklon od lineárního průběhu nastane až pro hodnoty šířky velké elektrody 140 mm a 120 mm. Z toho plyne, že čím je síťová elektroda širší, tím je kondenzátor blíže předpokládanému modelu „drát – plocha“. K dosažení kondenzátoru s lineární charakteristikou celého průběhu závislosti vznikající síly na procházejícím proudu je tedy potřeba zvolit co největší rozměr c . S dostatečnou přesností ale dostačuje $c > 160$ mm.

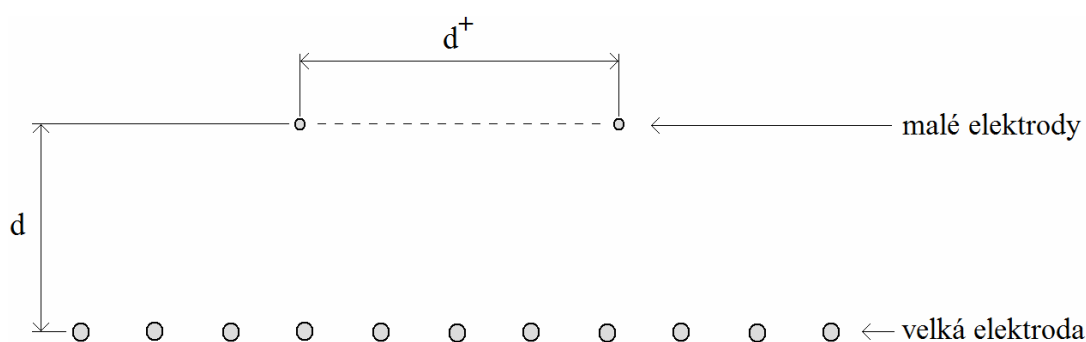
Pokud je zvolena hodnota šířky velké elektrody nižší než 180 mm, charakteristika průběhu se začne přibližovat grafům naměřeným na elementu. O této skutečnosti se lze přesvědčit na grafu 15, kde jsou vyneseny hodnoty síly naměřené na kondenzátorech s výrazně nižší šířkou síťové elektrody. Lze zde pozorovat zkracování lineární části průběhu pro kondenzátory s nižší hodnotou parametru c .



Graf 15: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro síťovou elektrodu o různé šířce c

4. 4. Větší počet malých elektrod

V minulé kapitole byl popsán vliv změny šířky velké elektrody na velikost vznikající síly a především na charakter průběhu naměřené síly. Bylo prokázáno, že pro zachování lineárního průběhu naměřené síly existuje nutná minimální šířka velké síťové elektrody. V této kapitole je řešen případ velké síťové elektrody s konstantní šířkou (původní hodnota $c = 260$ mm) a snahou je využít tuto šířku efektivně přidáním další malé elektrody připojené na stejné napětí, tedy dalšího zdroje ionizace. Obě malé elektrody mají stejné rozměry (průměr p a délku a) a zachovávají stejnou vzdálenost od velké síťové elektrody d (viz obr. 12). Vzdálenost mezi malými elektrodami je značena d^+ .



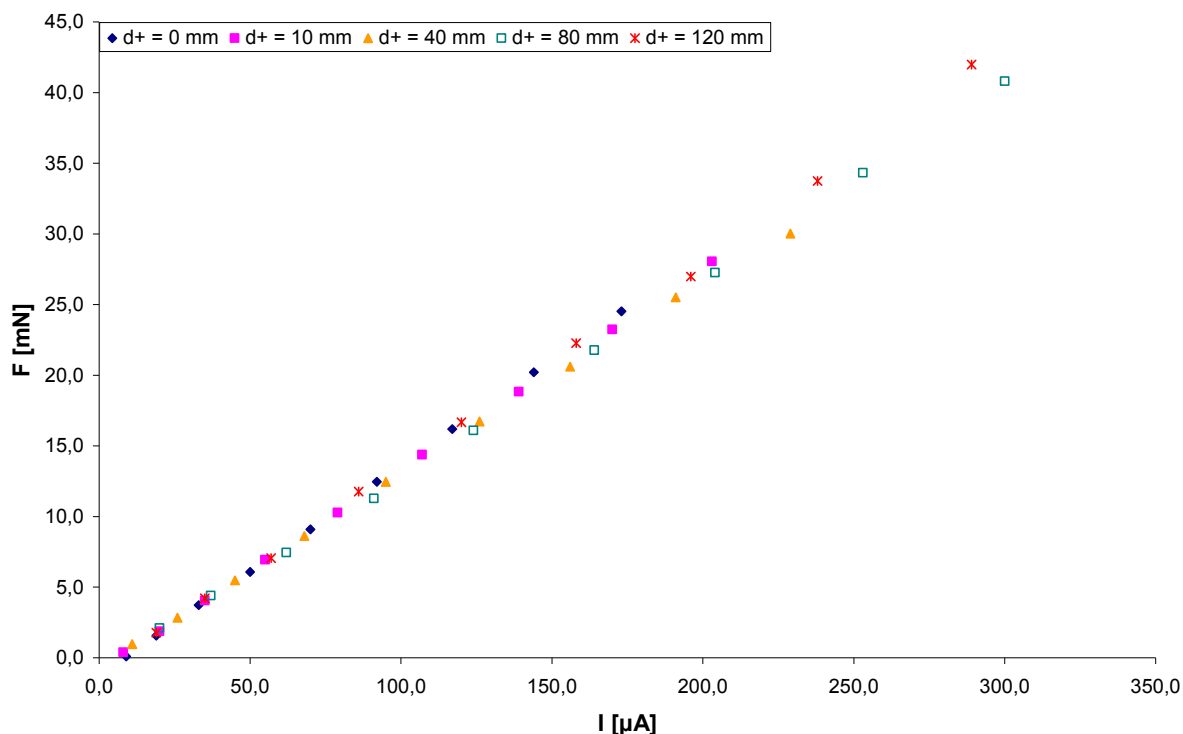
Obr. 12: Schéma kondenzátoru se síťovou elektrodou a dvěma kladnými drátovými elektrodami s vyznačenou vzdáleností mezi nimi

Aby bylo možné měnit vzájemnou vzdálenost malých elektrod d^+ při zachování vzdálenosti od velké elektrody d , bylo nutné modifikovat stávající kondenzátor. Byly k němu připevněny dvě skleněné tyčky rovnoběžně se síťovou elektrodou ve vzdálenosti 3 cm (viz obr. 13). Drátové elektrody lze napnout mezi horizontální tyčky s možností kontinuální změny jejich vzájemné vzdálenosti d^+ , aniž dojde ke změně vzdálenosti od velké elektrody.



Obr. 13: Fotografie kondenzátoru se síťovou elektrodou a novými horizontálními skleněnými tyčkami

Nejprve bylo opakováno měření na kondenzátoru s jednou malou elektrodou (aby bylo možné učinit srovnání). Toto měření je dále označováno jako měření s nulovou vzdáleností malých elektrod ($d^+ = 0$). Následně byla provedena měření pro dvě malé elektrody v různých vzdálenostech d^+ .

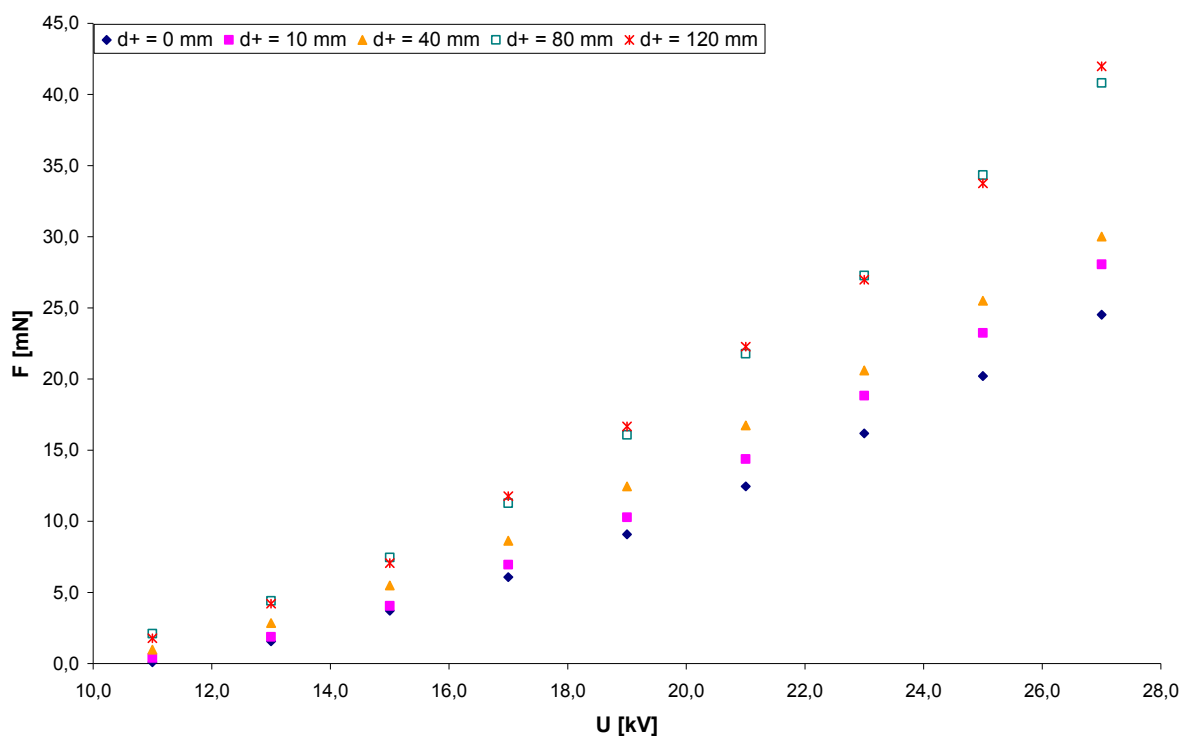


Graf 16: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I na kondenzátoru s uzemněnou síťovou elektrodou a dvěma různě vzdálenými (d^+) malými elektrodami při použitím napětí $11\text{ kV} - 27\text{ kV}$

Na grafu 16 vidíme, že se hodnoty síly naměřené na kondenzátoru s různou vzdáleností malých elektrod d^+ překrývají. Je vidět, že všechny průběhy zachovávají lineární charakteristiku a mají stejnou směrnici, což lze interpretovat tak, že se nemění efektivita využití procházejícího proudu na generování vznikající síly. Jediným rozdílem mezi nimi je jejich „délka“. Průběhy naměřené pro větší vzdálenost d^+ dosahují při stejném připojeném napětí větší vznikající síly při vyšším procházejícím proudu.

Tato skutečnost je lépe pozorovatelná na grafu 17, ve kterém je vynesena závislost vznikající síly na připojeném napětí. Je zde dobře vidět, že kondenzátory se dvěma malými elektrodami vykazují větší sílu (pro stejné připojené napětí) než kondenzátor s jednou malou elektrodou, což lze vysvětlit tak, že přidáním druhé malé elektrody vzroste počet iontů

vznikajících kolem nabitých elektrod. Více iontů pohybujících se mezi elektrodami má za následek větší procházející proud a tedy i větší sílu.



Graf 17: Závislost vznikající síly F na připojeném napětí U na kondenzátoru s uzemněnou síťovou elektrodou a dvěma různě vzdálenými (d^+) kladnými elektrodami

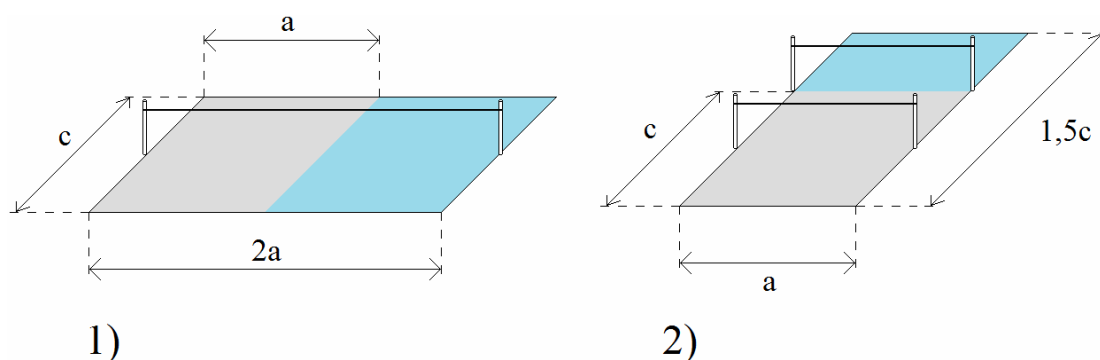
Rozdíl naměřených hodnot pro různé vzdálenosti d^+ lze zdůvodnit vzájemným ovlivňováním elektrických polí v okolí obou malých elektrod. Při dosažení dostatečné vzájemné vzdálenosti (80 mm) se tento jev omezí natolik, že další zvětšování vzdálenosti již nepřinese žádné zvýšení vznikající síly. Pokud je tedy vzdálenost mezi malými elektrodami 80 mm nebo více, kondenzátor generuje sílu, která je téměř dvojnásobkem síly generované na kondenzátoru s pouze jednou malou elektrodou (viz tabulka 3).

Tabulka 3: Porovnání hodnot vznikající síly na kondenzátoru s jednou malou elektrodou a na kondenzátoru s dvěma malými elektrodami ve vzájemné vzdálenosti 80 mm

U [kV]	11,0	13,0	15,0	17,0	19,0	21,0	23,0	25,0	27,0
F [mN] ($d^+ = 0$)	0,098	1,570	3,728	6,082	9,094	12,459	16,187	20,209	24,525
F [mN] ($d^+ = 80$ mm)	2,109	4,415	7,456	11,282	16,088	21,778	27,272	34,335	40,810

Dalším poznatkem z grafu 17 je skutečnost, že vzdálenost malých elektrod pro maximální přírůstek síly ($d^+ \geq 80$ mm) koresponduje s minimální použitelnou šířkou velké elektrody pro zachování lineárního průběhu ($c > 160$ mm), která byla popsána v předešlé kapitole.

Z těchto experimentů také plyne, že efektivita skládání malých elektrod „paralelně“ je z hlediska hmotnosti použitého materiálu vyšší než původně navrhované (kapitola 4. 3. a) „sériově“ prodloužení celého kondenzátoru (viz obr. 14).



Obr. 14: Schematické porovnání kondenzátorů se 1) „sériovým“ a 2) „paralelním“ prodloužením malé elektrody (malá elektroda má v obou případech celkový rozměr $2a$)

V sériovém uspořádání je k dosažení dvojnásobné délky malé elektrody a tedy i dvojnásobného nárůstu vznikající síly potřeba zvětšit plochu velké síťové elektrody také dvakrát. V paralelním uspořádání je ke stejnému výsledku nutné zvětšit plochu síťové elektrody pouze o 50 %.

Závěr

Ve své disertační práci jsem zkoumal jev, při kterém po připojení vysokého napětí na soustavu dvou asymetrických elektrod (zde nazývaných asymetrický kondenzátor) dojde ke vzniku síly, která ovlivňuje obě elektrody ve stejném směru. Zaměřil jsem se na popis vlivu změny tvaru elektrod kondenzátoru na generovanou sílu. Přesto, že od objevu tohoto jevu uplynulo již téměř 90 let, nebyl vliv tvaru kondenzátoru, pokud je mi známo, podroben jakémukoliv důkladnějšímu zkoumání.

Protože jsou síly vznikající na kondenzátoru z mnoha důvodů běžnými metodami obtížně měřitelné, získával jsem hodnoty síly pomocí digitální váhy jako změnu hmotnosti. Nejprve byl postaven kondenzátor jednoduché konstrukce, který dovoľoval změnu jednotlivých rozměrů. Na základě výsledků měření na tomto kondenzátoru jsem byl schopen popsat, jakým způsobem ovlivní změny jednotlivých rozměrů kondenzátoru sílu na něm vznikající. Dále jsem zkoumal proudění okolního média, které je vyvolané stejným jevem, jenž je příčinnou generování síly. Ukázal jsem, že pro některé tvary kondenzátoru, které by měly podle předběžných měření vykazovat maximální vznikající sílu, je vliv okolního proudění negativní a natolik významný, že je generovaná síla minimální.

Na základě výsledků dosavadních měření jsem navrhl a sestrojil zcela nový kondenzátor takové konstrukce, aby eliminoval popsané negativní vlivy. Tento nový design se ukázal být výrazně efektivnějším než dosud používané modely. Následným měřením jsem popsal vlivy změn všech nových rozměrů. Dále byly popsány možnosti, jak na asymetrickém kondenzátoru dosáhnout ještě větší generované síly.

Cíle, které jsem si pro vypracování práce stanovil, byly splněny. Vybral jsem vhodnou měřicí metodu, našel jsem a popsal vybraný kondenzátor i vlivy okolního proudění. Na základě získaných dat jsem navrhl ideální tvar, který jsem následně podrobil měření a popsal.

Hlavním přínosem práce je podrobný popis vlivu jednotlivých tvarových variant elektrod asymetrického kondenzátoru na vznikající sílu. Ačkoliv byla měření prováděna pouze na dvou typech kondenzátoru, závěry, které z měření vyplynuly, lze snadno zobecnit na jakékoliv jiné modely pracující na stejném principu. Pokud je mi známo, jedná se o první práci, zabývající se tvarem a rozměry kondenzátoru takto detailně a komplexně.

Zkoumání jevů na kondenzátorech s asymetrickými elektrodami však ještě zdaleka není dokončeno. V rámci vymezení tématu jsem ve své práci příliš nezabíhal do oblastí spojených s „elektrickou“ podstatou fungování jevu. Z tohoto důvodu bude další práce směřovat

k oblastem, ve kterých se prolíná zde zkoumaná mechanická (rozměrová) část výzkumu s elektrickou. Fungování tohoto jevu je totiž stále postaveno na vysokém napětí a pohybu elektricky nabitých částic - elektrickém proudu. Ačkoliv tedy autor této práce přišel s kvalitativním popisem vlivu změny rozměrů na velikost vznikající síly, kvantifikovat jej bude možné až spojením obou oblastí výzkumu.

Použitá literatura

- [1] *Wikipedia – The Free Encyclopedia*, [cit. 2013-08-09], Dostupné z:
<http://en.wikipedia.org>
- [2] BROWN, T. T., *A Method of and an Apparatus or Machine for Producing Force or Motion*. britský patent č. 300311, 1928
- [3] CAMPBELL, J. W., *Apparatus and method for generating thrust using a two dimensional asymmetrical capacitor module*. U.S. patent č. 6317310, 2001
- [4] BAHDER, T. B., FAZI, C., *Force on an Asymmetric Capacitor*. U.S. Army Research Laboratory Report, Adelphi 2003
- [5] CANNING, F. X., *Asymmetrical Capacitors for Propulsion*. NASA/CR-2004-213312 West Virginia 2004
- [6] RICKARD, M., DUNN-RANKIN, D., WEINBERG, F., CARLETON, F., *Maximizing ion-driven flows*. Journal of Electrostatics, Volume 64, Issue 6. 2006 pp. 368-376
- [7] PRIMAS, J., MALÍK, M., JAŠÍKOVÁ, D., KOPECKÝ, V., *Force on high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. Proceedings of WASET 2010 Conference, Amsterdam. 2010
- [8] MALÍK, M., PRIMAS, J., KOPECKÝ, V., SVOBODA, M., *Calculation and measurement of a neutral air flow velocity impacting a high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. AIP Advances Vol. 4, No. 1, 2014.
- [9] FEYNMAN, R. P., *The Feynman lectures on physics Vol. 2*. California Institute of Technology, 1977. pp. 92-93 ISBN 0-201-02010-6-H

Vlastní publikace autora

MALÍK, M., PRIMAS, J., KOŠEK, M., RICHTER, A. *Approximation of strong electric field*. Proceedings of conference Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering, Pilsen: University of West Bohemia, 2009, pp. 13-14.

MALÍK, M., PRIMAS, J., JAŠÍKOVÁ, D., KOPECKÝ, V. *Force on high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. Proceedings of WASET 2010 Conference, Amsterdam. ISSN 1307-6892

MALÍK, M., PRIMAS, J., KOPECKÝ, V. *Proudění a vznik síly na kondenzátoru s asymetrickými elektrodami*. Sborník 24. Symposia o Anemometrii, Holany-Litice 2010. ISBN 978-80-87117-07-1

MALÍK, M., PRIMAS, J., JAŠÍKOVÁ, D., KOPECKÝ, V. *Mathematical description of the Biefeld-Brown effect*. ISMOT Proceedings 2011 Conference, Praha: FEL ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04887-0

MALÍK, M., PRIMAS, J., JAŠÍKOVÁ, D., KOPECKÝ, V. *The influence of electrode heating on the force generated on a high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. International Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology, (eISSN: 2010-3778), Issue 67, pp.1230-1232, 2012.

MALÍK, M., PRIMAS, J., SVOBODA, M. *Influence of the insulating material on current efficiency and force on a high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. International Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology, Issue 79, Stockholm, 2013. pp. 1546-1548 pISSN 2010-376X

MALÍK, M., PRIMAS, J., KOPECKÝ, V., SVOBODA, M. *Calculation and measurement of a neutral air flow velocity impacting a high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. AIP Advances Vol. 4, No. 1, 2014.