

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2012

Kamil Hübner

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Studijní obor: 2302R022 – Stroje a zařízení

Analýza a optimalizace zařízení na výrobu nanovláken

Analysis and optimization of the electrospinner

Bakalářská práce

Autor:	Kamil Hübner
Vedoucí práce:	prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.
Konzultant:	Ing. Pavel Pokorný, Ph.D.
Číslo BP:	KTS-B048

Rozsah práce

Počet stran: 56

Počet obrázků: 19

Počet tabulek: 12

Počet grafů: 20

V Liberci 15.5. 2012

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

Signature

Poděkování

Rád bych upřímně poděkoval svému vedoucímu prof. Ing. Jaroslavu Beranovi, CSc. za vedení této bakalářské práce, cenné rady, doporučení a věcné připomínky.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá optimalizací zařízení na výrobu nanovláken. Zejména se zaměřuje na optimalizaci kolektoru, která je provedena na základě simulací MKP v softwaru Autodesk Algor Simulation 2011.

V teoretické části je uveden výťah z oblasti elektrostatiky. Dále jsou popsány jednotlivé metody výroby nanovláken.

V praktické části práce jsou provedeny elektrostatické analýzy. Poté jsou vyhodnoceny výsledky simulací pro jednotlivé konstrukční návrhy s různými rozměry kolektoru. Na jejich základě se navrhla upravená konstrukce kolektoru. Také se určila výrobní technologie kolektoru a použitý materiál.

Klíčová slova

elektrostatické zvlákňování, Nanospider, kolektor, elektrostatické pole, intenzita

Annotation

This bachelor thesis deals with optimization of electrospinner. It focuses on optimization of collector. It is done on the basis of FEM simulations using Autodesk Algor Simulation 2011 software.

At first abstract from the field of electrostatics is introduced in the theoretical part. Then individual methods for producing nanofibers are described.

Electrostatic analyses are performed in the practical part. Results of simulations for individual parameters are analyzed. Modified collector is designed according to these results. Technology and material of the collector are determined.

Keywords

electrospinning, Nanospider, collector, electrostatic field, intensity

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

E	intenzita elektrického pole [V/m]
$\ E_i\ _{\max}$	maximální hodnota intenzity v i-tém uzlu [V/m]
$\ E_i\ _{\min}$	minimální hodnota intenzity v i-tém uzlu [V/m]
$\ E\ _{\max}$	globální maximální hodnota intenzity [V/m]
$E_{\max}$	maximální hodnota intenzity u povrchu kolektoru [V/m]
$E_{\text{zvlák}}$	velikost intenzity určená na začátku zaoblení kolektoru [V/m]
$E_{\text{střed}}$	velikost intenzity určená u středu kolektoru [V/m]
$E_{l\max}$	lokální maximum intenzity v rovině yz od středu kolektoru do šířky podkladové textilie [V/mm]
$E_{\min}$	minimum intenzity v rovině yz od středu kolektoru do šířky podkladové textilie [V/mm]
F_e	elektrická síla [N]
l	délka kolektoru [mm]
P_i	přesnost v i-tém uzlu [-]
Q	elektrický náboj [C]
Q_0	jednotkový elektrický náboj [C]
r	poloměr zakončení kolektoru [mm]
R	vzdálenost nábojů [m]
s	šířka kolektoru [mm]
ε	absolutní permitivita materiálu [F/m]
ε_0	permitivita vakua [F/m]
ε_r	relativní permitivita [-]
φ	elektrický potenciál [V]

Obsah

1	Úvod	13
2	Elektrostatika	14
2.1	Coulombův zákon.....	14
2.2	Elektrický potenciál.....	14
2.3	Elektrické pole.....	14
2.4	Intenzita elektrického pole.....	15
3	Elektrostatické zvlákňování.....	16
3.1	Princip.....	16
3.2	Druhy zvlákňování	17
3.2.1	Tryskové	17
3.2.2	Více tryskové (multi-spinning).....	18
3.2.3	Bez tryskové	18
3.3	Ovlivňující parametry.....	19
3.3.1	Zvlákňovací elektroda	19
3.3.2	Kolektor	20
3.3.3	Vzdálenost mezi elektrodami	21
3.3.4	Napětí a elektrostatické pole	22
4	Ostatní technologie výroby nanovláken	23
4.1	Dloužení (drawing).....	23
4.2	Podložková syntéza (template synthesis)	23
4.3	Fázová separace (phase separation).....	23
4.4	Samo-organizování (self-assembly)	23
4.5	Foukání taveniny (melt-blowing).....	24
4.6	Zvlákňování účinkem odstředivé síly (forcespinning)	24
5	Simulace elektrostatického pole	25
5.1	Preprocessing.....	25
5.1.1	Vytvoření geometrického modelu	25
5.1.2	Definování souboru vlastností modelu.....	27
5.1.3	Generování povrchové sítě konečných prvků	29
5.1.4	Generování objemové sítě konečných prvků	30
5.2	Processing.....	31
5.3	Postprocessing	31

6	Analýza vlivu geometrických parametrů kolektoru	33
6.1	Stávající konstrukce.....	33
6.2	Úpravy konstrukce.....	34
6.2.1	Změna poloměru zakončení	34
6.2.2	Změna šířky	36
6.2.3	Změna délky	38
6.2.4	Změna průřezu zakončení.....	39
7	Optimalizace kolektoru.....	41
7.1	Konstrukce.....	41
7.2	Technologie	43
7.3	Materiál.....	43
8	Závěr.....	44
9	Použitá literatura.....	45
10	Seznam příloh.....	47

Seznam obrázků

Obr. 1: Znázornění elektrického pole. Čerpáno z [8].	15
Obr. 2: Schéma principu elektrostatického zvlákňování. Čerpáno z [12].	16
Obr. 3: Detail trysky. Čerpáno z [14].	18
Obr. 4: Vícetrysková zvlákňovací elektroda. Čerpáno z [21].	18
Obr. 5: Princip Nanospider. Čerpáno z [13].	19
Obr. 6: Rotující válcový kolektor. Čerpáno z [14].	21
Obr. 7: Princip foukání taveniny. Čerpáno z [5].	24
Obr. 8: Princip zvlákňování silou. Čerpáno z [3].	24
Obr. 9: Model původní (vlevo) a upravené (vpravo) zvlákňovací elektrody.	26
Obr. 10: Model stávajícího kolektoru.	27
Obr. 11: Geometrický model.	27
Obr. 12: Schéma elementu tetraedron (vlevo) a brick (vpravo). Čerpáno z [20].	28
Obr. 13: Lokální zjemnění sítě u zakončení kolektoru.	30
Obr. 14: Přesnost elektrostatického pole v okolí kolektoru.	32
Obr. 15: Model upravené konstrukce kolektoru.	34
Obr. 16: Rozložení intenzity v okolí zakončení původního kolektoru v rovině yz.	47
Obr. 17: Rozložení intenzity v okolí zakončení původního kolektoru v rovině xy.	47
Obr. 18: Rozložení intenzity v okolí zakončení navrženého kolektoru v rovině yz.	55
Obr. 19: Rozložení intenzity v okolí zakončení navrženého kolektoru v rovině xy.	56

Seznam tabulek

Tab. 1: Hodnoty intenzit pro původní řešení kolektoru.....	34
Tab. 2: Porovnání intenzit při změně zakončení kolektoru v rovině yz.	35
Tab. 3: Porovnání intenzit při změně zakončení kolektoru do vzdálenosti 150 mm v rovině yz.	35
Tab. 4: Porovnání intenzit při změně zakončení kolektoru v rovině xy.	35
Tab. 5: Porovnání intenzit při změně šířky kolektoru v rovině yz.	37
Tab. 6: Porovnání intenzit při změně šířky kolektoru v rovině xy.	37
Tab. 7: Porovnání intenzit při změně délky kolektoru v rovině yz.....	39
Tab. 8: Porovnání intenzit při změně průřezu kolektoru v rovině yz.	40
Tab. 9: Porovnání intenzit při změně průřezu kolektoru v rovině xy.	40
Tab. 10: Porovnání intenzit pro původní a navržený kolektor v rovině yz.	41
Tab. 11: Porovnání intenzit do vzdálenosti 150 mm pro původní a navržený kolektor v rovině yz.	41
Tab. 12: Porovnání intenzit pro původní a navržený kolektor v rovině xy.	41

Seznam grafů

Graf 1: Porovnání průběhů intenzit pro různé poloměry zakončení kolektoru podél délky v rovině yz.....	36
Graf 2: Porovnání průběhů intenzit pro různé šířky kolektoru podél šířky v rovině xy.	38
Graf 3: Porovnání průběhů intenzit pro různé délky kolektoru podél délky v rovině yz.	39
Graf 4: Porovnání průběhů intenzit pro různé průřezy zakončení kolektoru podél délky v rovině yz.	40
Graf 5: Porovnání průběhů intenzit pro původní a navržený kolektor v rovině yz.	42
Graf 6: Porovnání průběhů intenzit pro původní a navržený kolektor v rovině xy.	43
Graf 7: Průběh intenzity podél délky kolektoru v rovině yz.....	48
Graf 8: Průběh intenzity podél šířky kolektoru v rovině xy.	48
Graf 9: Průběh $E_{\max}$ v rovině yz v závislosti na poloměru zakončení kolektoru.	49
Graf 10: Průběh $E_{\max}$ v rovině xy v závislosti na poloměru zakončení kolektoru.....	49
Graf 11: Průběh $E_{\text{zvlák}}$ v rovině yz v závislosti na poloměru zakončení kolektoru.....	50
Graf 12: Průběh $E_{\text{zvlák}}$ v rovině xy v závislosti na poloměru zakončení kolektoru.	50
Graf 13: Průběh $E_{\text{střed}}$ v rovině yz v závislosti na poloměru zakončení kolektoru.	51
Graf 14: Porovnání průběhů intenzit pro různé poloměry zakončení kolektoru podél šířky v rovině xy.	51
Graf 15: Průběh $E_{\text{zvlák}}$ v rovině yz v závislosti na šířce kolektoru.....	52
Graf 16: Průběh $E_{\text{střed}}$ v rovině yz v závislosti na šířce kolektoru.	52
Graf 17: Průběh $E_{\text{zvlák}}$ v rovině xy v závislosti na šířce kolektoru.	53
Graf 18: Porovnání průběhů intenzit pro různé šířky kolektoru podél délky v rovině yz.	53
Graf 19: Porovnání průběhů intenzit pro různé délky kolektoru podél šířky v rovině xy.	54
Graf 20: Porovnání průběhů intenzit pro různé průřezy zakončení podél šířky v rovině xy.	55

1 Úvod

Svět vědy a techniky se neustále vyvíjí. To, co bylo v nedávné době nemyslitelné, se stává realitou. Jedním z mnoha důkazů tohoto tvrzení jsou nanovlákná. Jsou definována jako vlákna s průměrem menším než 1 mikrometr [4]. V dnešní době se staly důležitými textilními materiály díky svým výjimečným atributům. Řadí se mezi ně vysoká povrchová plocha, vysoká porezita a vynikající mechanické vlastnosti. Proto mají přinést revoluci v řadě odvětví. Platí to např. pro medicínu, kompozity, automobilový průmysl a elektroniku.

Technologie, které slouží k výrobě nanovláken se označují jako nanotechnologie. Mezi jednu z nejrozšířenějších a nejvýhodnějších nanotechnologií se řadí elektrostatické zvlákňování. Princip spočívá v působení elektrostatického pole o vysokém napětí nejčastěji na roztok polymeru. Tato technologie byla do nedávné doby pouze laboratorního charakteru s odpovídající vysokou cenou výsledných nanovláknenných vrstev. Podstatné zdokonalení této metody umožnil patent Technické univerzity, textilní fakulty, katedry netkaných textilií v roce 2005 [22]. Byl tím vyvinut princip beztryskového elektrostatického zvlákňování. Podstatou byl poznatek, že lze zvlákňovat roztok nejen z trysky, ale i z tenké vrstvy roztoku. Zkonstruovaný stroj, který využíval tento princip, se nazval Nanospider [22]. Zvlákňovací elektrodu zde tvořil válec. Tím byla umožněna výroba nanovláken v průmyslovém měřítku. Tento úspěch nepochybně umožnil katedře netkaných textilií následný výzkum nových metod a zařízení na výrobu nanovláken.

Proces elektrostatického zvlákňování je ovlivněn mnoha vlivy. Mezi jedny z nejdůležitějších patří rozložení elektrostatického pole. S tím souvisí geometrické parametry a fyzikální vlastnosti použitých součástí (především elektrod). Fyzikálními vlastnostmi je myšlena relativní permitivita. Úkolem této bakalářské práce je optimalizovat tyto parametry pro jednu z elektrod (kolektor) pro daný stroj Nanospider. Optimalizace je provedena na základě simulací metodou konečných prvků v softwaru Autodesk Algor Simulation 2011.

2 Elektrostatika

Elektrostatika je vědní obor fyziky. Zabývá se jevy a vlastnostmi stacionárních nebo pomalu pohybujících se nábojů [24].

2.1 Coulombův zákon

Tento zákon je základní rovnicí elektrostatiky (1) [24]. Popisuje vzájemné působení elektrických nábojů elektrickou silou.

$$F_e = \frac{|Q_1 \cdot Q_2|}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R^2} \quad (1)$$

Velikost elektrické síly je přímo úměrná nábojům Q_1 , Q_2 a nepřímo úměrná vzdálenosti R^2 . ϵ_0 má velikost $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ [24].

2.2 Elektrický potenciál

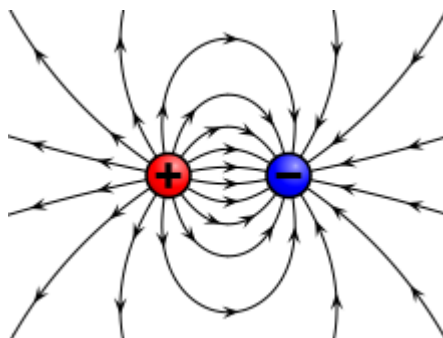
Je to skalární fyzikální veličina. Elektrický potenciál charakterizuje elektrickou energii nábojů. Potenciál elektrického pole je vyjádřen vztahem (2). [7]

$$\varphi(r) = - \int_{r_0}^r \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (2)$$

Vytváří skalární pole, které je znázorněno ekvipotenciálními plochami [7]. Rozdíl potenciálů je roven napětí mezi danými body.

2.3 Elektrické pole

Elektrické pole je zvláštní forma hmoty. Obklopuje elektrický náboj a zprostředkovává vzájemné působení mezi náboji (obr. 1). Elektrické pole, které má v různých místech jinou velikost a směr, se nazývá nehomogenní elektrické pole. Naopak, pokud má v různých místech stejnou velikost a směr, jedná se o pole homogenní. [8]



Obr. 1: Znáznornění elektrického pole. Čerpáno z [8].

2.4 Intenzita elektrického pole

Je to vektorová fyzikální veličina. V daném místě elektrického pole je definována jako podíl elektrické síly F_e a jednotkového náboje Q_0 (3) [24].

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{Q_0} \quad (3)$$

Souhrn vektorů intenzity tvoří vektorové pole, které je zobrazeno pomocí siločar. Siločáry jsou spojitě křivky, nikdy se neprotínají a nejsou uzavřené [24]. Začínají v kladně nabitých tělesech a končí v záporně nabitých tělesech. Hustota siločar je rovna velikosti intenzity elektrického pole. Tečna k siločáře má směr vektoru intenzity [24]. Vektor intenzity je kolmý na ekvipotenciální plochu [24].

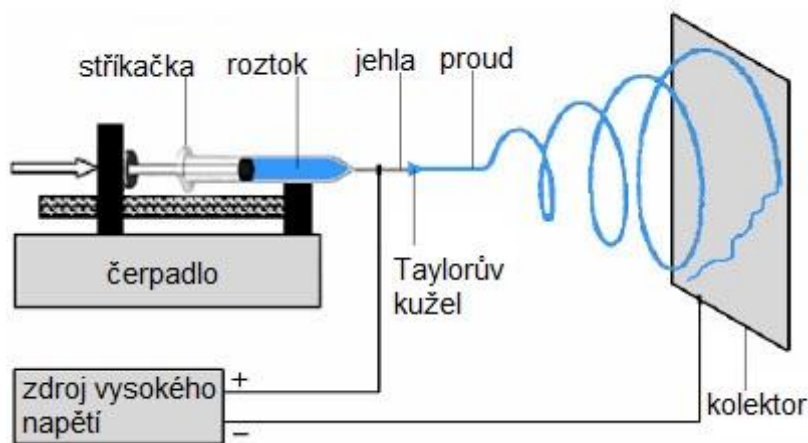
3 Elektrostatické zvlákňování

Elektrostatické zvlákňování patří mezi přední metodu výroby nanovláken. Vyznačuje se vysokou efektivitou, proto ji lze použít k průmyslové produkci nanovláken. Jak již název naznačuje, využívá tato metoda účinek elektrostatického pole na elektricky nabitě viskoelastické kapaliny. Obvykle jsou ve formě roztoku polymeru.

3.1 Princip

Počátky zkoumání fyzikálního principu spojeného s elektrostatickým zvlákňováním byly uskutečněny již v 17. století [18]. William Gilbert v této době experimentoval s kapkami vody [18]. Při přiblížení zelektrizovaného předmětu ke kapce na suché podložce pozoroval změnu kulového tvaru na kuželový. Tento základní princip se využívá dodnes při elektrostatickém zvlákňování.

K tvorbě nanovláken dochází pomocí dvou opačně nabitých elektrod (obr. 2). Mezi nimi se udržuje vysoké elektrické napětí. Polymerní roztok je v kontaktu se zvlákňovací elektrodou. Ta je nejčastěji připojena ke kladnému potenciálu. Druhá elektroda, nazývaná kolektor, je sběrná. Buď je připojena k zápornému potenciálu, nebo bývá často uzemněna. Vlákna přenášejí elektrický náboj mezi elektrodami a uzavírají tak elektrický obvod.



Obr. 2: Schéma principu elektrostatického zvlákňování. Čerpáno z [12].

V důsledku vysokého napětí se na zvlákňovací elektrodě indukují v polymerním roztoku elektrické náboje [6]. Zvýšením velikosti elektrických nábojů se hemisférický povrch roztoku deformuje. Působí proti sobě Coulombova síla nábojů a povrchové napětí roztoku [15]. Vznikne tak kuželový tvar známý jako Taylorův kužel [15]. Při dalším zvyšování se dosáhne kritické hodnoty. Coulombova síla je v rovnováze nebo

překoná povrchové napětí roztoku. Z vrcholu Taylorova kužele následně vznikne nabitý proud polymeru [6].

Proud polymeru se přemisťuje do míst s nižším potenciálem. Proto se pohybuje směrem ke kolektoru. Při letu vzduchem se působením elektrického pole proud urychluje a zmenšuje jeho průměr. Nastává proces dloužení [22]. Skládá se ze dvou etap. První je stabilní oblast a druhá nestabilní [22]. Stabilní oblast je charakterizována přímočarou trajektorií proudu. Vyskoelastické vlastnosti roztoku zmenší nebo zcela potlačí rozpad proudu na jednotlivé kapky [22]. Z polymerních proudů tak vznikají jednotlivá vlákna. Tento proces se nazývá elektrostatické zvlákňování.

Vznik nestabilní oblasti souvisí s náhlým odpařováním rozpouštědla z proudu. Značně se redukuje průměr vláken. Je charakteristická ohybovou nestabilitou a křivočarou trajektorií. Povrchový náboj vláken se zvětšuje, proto Coulombovi síly rozdělí proud na několik menších. Dochází k větvení paprsku. Tento jev se může několikrát opakovat. Vede k vytvoření spousty proudů s menším průměrem. U polymerních roztoků se odpaří podstatná část rozpouštědla. Vlákna poté ztuhnou. Nakonec se uloží na kolektor. Výsledkem je většinou náhodně orientovaná vrstva nanovláken. [6] [22]

3.2 Druhy zvlákňování

Níže uvedené druhy mohou mít svislé nebo vodorovné uspořádání elektrod. Při svislém uspořádání dále záleží na vzájemném umístění elektrod. Pokud je zvlákňovací elektroda umístěna nad kolektorem, často se z ní nechává polymer odkapávat vlivem gravitace. Tento způsob je vhodný spíše pro laboratorní účely [14]. Výhodnější řešení je umístit kolektor nad zvlákňovací elektrodu. Polymer je ovšem nutné dopravovat do zvlákňovací zóny např. pomocí čerpadla. Nastává intenzivnější proces zvlákňování, jelikož se musí překonávat gravitace. Vlákna se u obou uspořádání mohou vytvářet kontinuálně nebo diskontinuálně [13]. Při diskontinuálním procesu je zapotřebí zastavit zvlákňování a vyměnit sběrnou textilií.

3.2.1 Tryskové

Zvlákňovací elektroda se realizuje tryskou neboli kapilárou (obr. 3), skrz kterou se vytlačuje polymer. Na hrotu kapiláry se koncentruje vysoká intenzita elektrostatického pole, která umožní proces zvlákňování. Tato metoda byla jako první použita pro tvorbu nanovlákných vrstev [6]. Její předností je jednoduchost a snadná

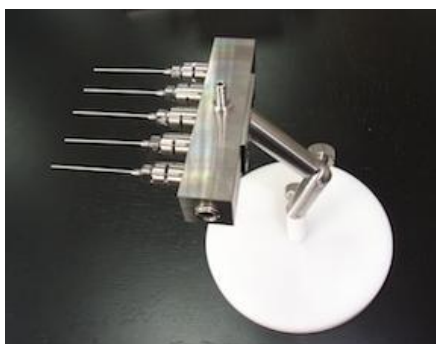
změna jednotlivých parametrů ovlivňujících zvlákňování. Má spíše laboratorní využití kvůli nízké produkci [14].



Obr. 3: Detail tryšky. Čerpáno z [14].

3.2.2 Více tryskové (multi-spinning)

Tato metoda zvýší produktivitu výroby nanovláken použitím více trysek (obr. 4). Není však vhodná pro průmyslové využití. Jelikož by bylo potřeba použít tisíce trysek, aby se dosáhlo ekonomických požadavků a produktivity [13]. Uspořádání více trysek vedle sebe navíc přináší řadu komplikací. Vytváření Taylorových kuželů je ovlivněno vzájemnou vzdáleností trysek [13]. Výsledné vrstvy mají proto jiný charakter uspořádání nanovláken [13]. Dále musí být zkoumána stabilita proudů [13]. Náboje nesené jednotlivými proudy zdeformují elektrostatické pole a následně ovlivní ostatní proudy, které jsou v blízkosti [13].



Obr. 4: Vícetrysková zvlákňovací elektroda. Čerpáno z [21].

3.2.3 Bez tryskové

Tento způsob se nazývá Nanospider. Zvlákňování se realizuje z volné hladiny polymeru. Může sloužit, jak pro experimentální práci, tak pro průmyslovou výrobu. Výsledné nanovláknenné vrstvy mají příznivější vlastnosti v porovnání s uspořádáním s tryskami [13].

Původní realizace je na obr. 5. Jedná se o rotující válec, který je z části ponořen do zásobníku polymerního roztoku. Tenká vrstva polymeru je jeho rotací neustále nanášena na povrch válce a vystavena elektrickému poli o vysoké intenzitě. Jakmile velikost intenzity překročí kritickou hodnotu, vytvoří se z vrcholu Taylorova kužele několik proudů polymeru. Jsou periodicky rozmístěny na ploše válce [13]. Počet a umístění proudů je přirozené a optimální [13].



Obr. 5: Princip Nanospider. Čerpáno z [13].

3.3 Ovlivňující parametry

Elektrostatické zvlákňování ovlivňuje řada parametrů. Rozdělují se na systémové a procesní. Do procesních parametrů patří např. elektrické napětí, rozložení elektrického pole, relativní vlhkost vzduchu a jeho teplota. Naopak systémovými parametry jsou především myšleny vlastnosti zvlákňovaného materiálu. Mezi ně se řadí chemické složení polymeru a rozpouštědla, viskozita, elektrické vlastnosti a povrchové napětí. [22]

Zmíněné ovlivňující parametry působí zejména na průměr vláken a jeho distribuci, plošnou hmotnost a morfologii vlákenné vrstvy [22]. Pro každý zvlákňovaný materiál se vždy zkoumají ideální podmínky procesu. Tato kapitola se zaměřuje pouze na konstrukci elektrod, napětí a elektrostatické pole.

3.3.1 Zvlákňovací elektroda

Představuje základní parametr ovlivňující tvorbu nanovláken. Obvyklé konstrukce jsou např. tryska, válec a drátek [17]. Svojí geometrií a rozměry určují rozložení elektrostatického pole a produkci zařízení.

Pro samotný proces elektrostatického zvlákňování a tvorbu Taylorových kuželů je nezbytné dosáhnout na povrchu zvlákňovací elektrody kritickou hodnotu intenzity. Její hodnotu lze určit pro zvlákňované materiály analyticky. Zvlákňovací elektrodu je nutné konstruovat tak, aby na jejím povrchu překročila velikost intenzity tuto hodnotu.

Univerzální zvlákňovací elektrodou, zejména pro laboratorní účely, je tryska [14]. Nižší vnitřní průměr otvoru snižuje možnost ucpání a také množství defektů na vzniklých vláknech. Redukování možnosti ucpání je způsobeno vlivem menšího vystavení roztoku okolní atmosféře během elektrostatického zvlákňování. Menší průměr otvoru kapiláry způsobí snížení průměru výsledných vláken. Zmenší se tím také velikost kapky na hrotu kapiláry a zvětší její povrchové napětí. Pro totožné aplikované napětí je tudíž nutná větší Coulombova síla pro iniciaci zvlákňování. Důsledkem toho se sníží urychlení proudu a roztok bude mít více času na dloužení před tím, než se uloží na kolektor. Pokud je průměr otvoru příliš malý, nemusí být poté možné vytvořit z roztoku kapku na špičce kapiláry. [6]

Produktivnější zvlákňovací elektrody jsou válcové. Nicméně se na jejich povrchu dosahuje nižší velikost intenzity oproti jiným typům elektrod, proto jsou náročné na správné nastavení jednotlivých parametrů ovlivňující zvlákňování. Zvýšení intenzity se dosáhne použitím strukturovaného válce. Jedná se o válcovou elektrodu s trny. Docílí se zvýšení intenzity ve výstupcích, proto je tato elektroda vhodná pro obtížně zvlákňitelné materiály. Taylorovy kužele se ale nerozmístí přirozeně po jejím povrchu a nastanou podobné komplikace jako u více tryskových systémů. [17]

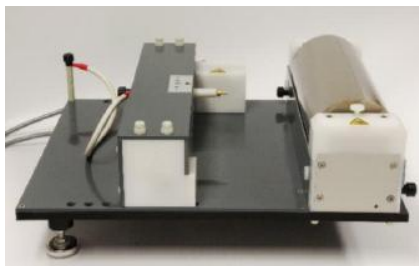
Nespornou výhodou drátkové elektrody je možná velká pracovní šíře stroje. Toho se využívá u průmyslových zařízení. Polymer je zde nanášen pomocí zásobníku, který je umístěn na lineárním vedení. Zásobník tak periodicky přejíždí z jednoho konce drátkového koncentrátoru na druhý a pravidelně kontinuálně doplňuje množství polymeru.

3.3.2 Kolektor

Nejčastějšími druhy jsou deskové a válcové kolektory. Ve většině případů je kolektor z vodivého materiálu. V případě, kdy je použit kolektor z nevodivého materiálu, se elektrické náboje z polymerního proudu okamžitě akumulují na jeho povrchu, což vede k menšímu množství uložených vláken. Vláknata uložená na

nevodivém kolektoru nejsou tak hustá (jsou daleko od sebe) v porovnání s vodivým kolektorem. Mohou tvořit 3D strukturu, příčinou jsou odpudivé síly akumulovaných nábojů na kolektoru. U vodivého kolektoru se elektrické náboje na kolektoru disipují, což umožní větší množství uložených vláken. [6]

Zda je kolektor pouze statický nebo pohyblivý má samozřejmě také vliv na proces zvlákňování. Rotující kolektor (obr. 6) se používá k ukládání uspořádaných vláken. Navíc napomáhá získávání suchých vláken, což zlepšuje jejich morfologii. [14]



Obr. 6: Rotující válcový kolektor. Čerpáno z [14].

3.3.3 Vzdálenost mezi elektrodami

Změna vzdálenosti mezi elektrodami má efekt jednak na dobu letu polymerního proudu, tak na velikost intenzity elektrostatického pole. Pro tvorbu samostatných vláken musí mít rozpouštědlo dostatek času pro odpaření. V závislosti na vlastnostech roztoku změna vzdálenosti může nebo nemusí mít významný vliv na vláknou morfologii. V některých případech má změna vzdálenosti pouze malý vliv na výsledný průměr vláken. [6]

Při přiblížení elektrod má proud menší dráhu. Navíc se zesílí elektrostatické pole a to více urychlí polymerní proud směrem ke kolektoru. Důsledkem toho se nemusí rozpouštědlo zcela odpařit. Snižování vzdálenosti má podobný vliv jako zvyšování napětí. Může nastat větší nestabilita proudu a vznik defektů. Pokud je ovšem při nízké vzdálenosti optimální velikost intenzity, vytvoří se méně defektů. Vzdálenost nesmí být příliš krátká, protože by se tvořily jiskry mezi elektrodami. [6]

Zvyšováním vzdálenosti se sníží průměr vláken. Větší vzdálenost zapříčiní delší dobu letu a větší dloužení. Neplatí to ovšem vždy, v určitých případech se průměr vláken zvýší. To je způsobeno snížením intenzity pole a méně intenzivnějším dloužením. Při příliš dlouhé vzdálenosti se neusazují žádná vlákna na kolektor. [6]

3.3.4 Napětí a elektrostatické pole

Elektrostatické zvlákňování nastane pouze, pokud je potenciálový rozdíl mezi elektrodami, to znamená určité elektrické napětí. Obvykle se používá stejnosměrné napětí [6]. Pohybuje se v rozsahu 5-100 kV [13] [14]. Indukuje potřebné náboje na polymerním roztoku a spolu s elektrostatickým polem iniciuje proces. Mělo by být adekvátní pro překonání povrchového napětí roztoku polymeru a k tvorbě a udržení polymerního proudu [6]. Takové napětí se označuje jako kritické.

Napětí a následné elektrostatické pole mají vliv na urychlení a dloužení polymerního proudu. Následkem toho se mění výsledný průměr vláken. Vyšší napětí zapříčiní zvýšení hodnoty intenzity elektrostatického pole. Proud se více urychlí a nastane intenzivnější dloužení. To má naopak za následek zmenšení průměru vláken. Vyšší napětí také snadněji umožní formování sekundárních proudů. [6]

Při příliš velkém napětí se potlačuje Taylorův kužel. Polymerní proud vzniká přímo z volné hladiny nebo kapiláry. Vznikne objemnější proud, který vytvoří nanovlákná s vyšším průměrem. Navíc se kvůli zvýšené nestabilitě proudu zvětší množství defektů. [6]

Aplikací menšího napětí se také mohou vytvářet jemnější vlákna. Polymerní proud není příliš urychlen. Delší doba letu umožní více prostoru ke dloužení před tím, než se vlákna nanesou na kolektor. V tomto případě může být napětí blízké se kritickému výhodné pro získání jemnějších vláken. [6]

Jelikož je elektrostatické zvlákňování zapříčiněno náboji na proudu, mohou být ovlivněny změnou průběhu elektrostatického pole mezi elektrodami. Může se toho docílit změnou tvaru elektrod nebo pomocnou elektrodou. Ovlivní se tak trajektorie proudu a uspořádanost jednotlivých molekul polymeru. Mohou se poté získat rovnoměrná a uspořádaná vlákna s lepšími vlastnostmi.

4 Ostatní technologie výroby nanovláken

S postupem času jsou vyvíjeny nové metody. Ty mohou být chápány spíše jako doplňující se než konkurenční [13]. To platí především pro rozložení průměru nanovláken a rovnoměrnost vlákněné vrstvy [13]. Jednotlivé metody spíše naleznou odlišné oblasti využití. Více produktivní foukání taveniny se spíše využije k produkci méně cenově náročných aplikací jako např. hygienické netkané textilie. Na druhou stranu vysoce kvalitní elektrostatické zvlákňování je použito u produktů s vysokou hodnotou a potřebou pro malá množství jako jsou filtry a biomedicína.

4.1 Dloužení (drawing)

Využívá se k výrobě dlouhých jednotlivých nanovláken. Na podložku je umístěna kapka taveniny polymeru. Ke kraji kapky je přiblížena kapilára. Poté se kapilára odtahuje od kapky definovaným způsobem. Vlákně je takto vytaženo z kapky. Výsledný průměr vlákna závisí na chemickém složení, rychlosti kapiláry a rychlosti vypařování rozpouštědla. [1]

4.2 Podložková syntéza (template synthesis)

Roztok polymeru je protlačován skrz membránu tlakem vody. Membrána je složena z oxidu kovů a obsahuje nanorozměrné póry. Polymer je jimi protlačen do srážecí lázně, která umožní vznik nanovláken. Výhodou je výborná reprodukovatelnost vlastností vyrobených vláken s průměrem i několik nanometrů, který je dán charakteristikou pórů. Tato metoda je pouze laboratorní. [6]

4.3 Fázová separace (phase separation)

Princip spočívá v oddělení dvou fyzikálně odlišných fází. Nejprve je polymer smísen s rozpouštědlem. Poté je provedena želatinace, extrakce použitých rozpouštědel, mrazení a sušení. Výsledkem je útvar obsahující nanovlákněnou strukturu, která se nazývá nanovlákněná pěna. Tento postup je omezen pouze pro několik polymerů a má nízkou produkci. [6]

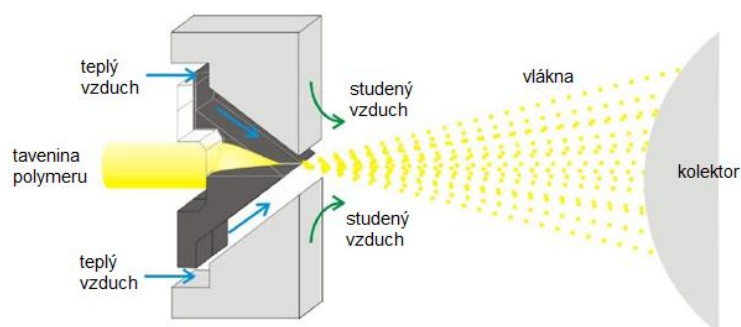
4.4 Samo-organizování (self-assembly)

Proces, ve kterém se prvotní složky organizují do stabilních struktur pomocí molekulárních sil. Molekuly jsou uspořádány soustředným způsobem, aby se mezi nimi vytvořily vazby. Při prodloužení v normálovém směru se vytvoří nanovlákně. Při

této metodě se dosahuje nízkých průměrů vláken. Je omezena pouze pro několik polymerů. Pro větší tvary vrstev je nestabilní. [6]

4.5 Foukání taveniny (melt-blowing)

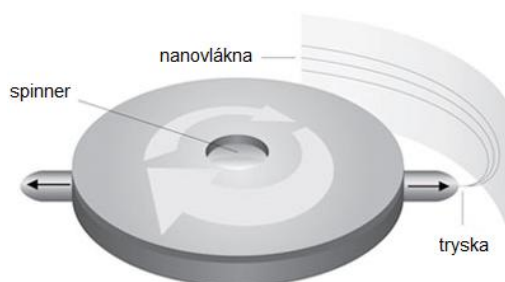
Tato technologie využívá stlačený horký vzduch, který urychluje taveninu polymeru skrz kapilární trysky nebo štěrbinu (obr. 7). Polymer je poté během pohybu dloužen a chlazen vzduchem. Výsledná nanovlákná jsou nanášena na kolektor, který má podobu dopravníku. Proces je ovlivněn nejen vlastnostmi polymeru, ale také tlakem vzduchu, teplotou vzduchu, úhlem, pod kterým tlak působí, vzdáleností kolektoru a geometrií štěrbin [5].



Obr. 7: Princip foukání taveniny. Čerpáno z [5].

4.6 Zvlákňování účinkem odstředivé síly (forcespinning)

Při této technologii se využívá odstředivé síly, což ji činí cenově výhodnější než metody využívající stlačený vzduch nebo vysoké napětí. Další předností je menší nebo dokonce žádná spotřeba rozpouštědla. Spinner se zásobníkem roztoku se otáčí vysokou úhlovou rychlostí kolem vertikální osy (obr. 8). Po obvodu spinneru jsou trysky, které vystřikují vlákna. Po opuštění trysky díky odstředivé síle vznikají nanovlákná, které se nanesou na kolektor. Touto metodou lze zpracovávat nejen roztoky, ale také roztavené materiály. Tato technologie má potenciál vyrovnat se elektrostatickému zvlákňování. [3]



Obr. 8: Princip zvlákňování silou. Čerpáno z [3].

5 Simulace elektrostatičkého pole

V rámci této bakalářské práce je použit software Autodesk Algor Simulation 2011. Simulace se provádějí v analýze elektrostatičkého pole a napětí. Za materiálové parametry vystupují relativní permitivity. Okrajové podmínky jsou napětí na hranicích řešené oblasti. Postup řešení úlohy se postupně skládá z preprocessingu, processingu a postprocessingu [23].

Do preprocessingu patří tvorba geometrického modelu, generování sítě konečných prvků a definování vlastností jednotlivých modelů. Mezi ně přísluší materiálové vlastnosti, okrajové podmínky a typ prvku. Processing obsahuje automatické sestavení rovnic pro řešení a vlastní řešení soustavy těchto rovnic numerickou metodou. Postprocessing zahrnuje všechny činnosti spojené se zobrazením výsledků.

5.1 Preprocessing

5.1.1 Vytvoření geometrického modelu

MKP v sobě většinou nezahrnují uspokojivý modelář, proto se geometrický model vytváří v klasickém CAD softwaru. Konkrétně je použit Pro/Engineer Wildfire 4. Kompletní sestava zařízení Nanospider již byla zhotovena v tomto softwaru. Byla vytvořena za účelem konstrukce stroje v digitální podobě a následné tvorbě montážních a výrobních výkresů jednotlivých součástí. Pro elektrostatičkovou analýzu je příliš složitá a nevhodná. Z tohoto důvodu byla vytvořena nová sestava sloužící pouze pro simulace MKP.

Na začátku se geometrickému modelu definovaly jednotky v milimetrech. V sestavě bylo vhodné určit globální systém v průniku rovin symetrie kolektoru. Původní sestava obsahuje velké množství součástí, které mají zanedbatelný nebo žádný vliv na rozložení elektrostatičkého pole. To platí pro všechny komponenty, které se nacházejí mimo prostor zvlákňovací komory. Proto se tyto součásti nezahrnuly do geometrického modelu. Tím byl v modelu uvažován pouze prostor zvlákňovací komory.

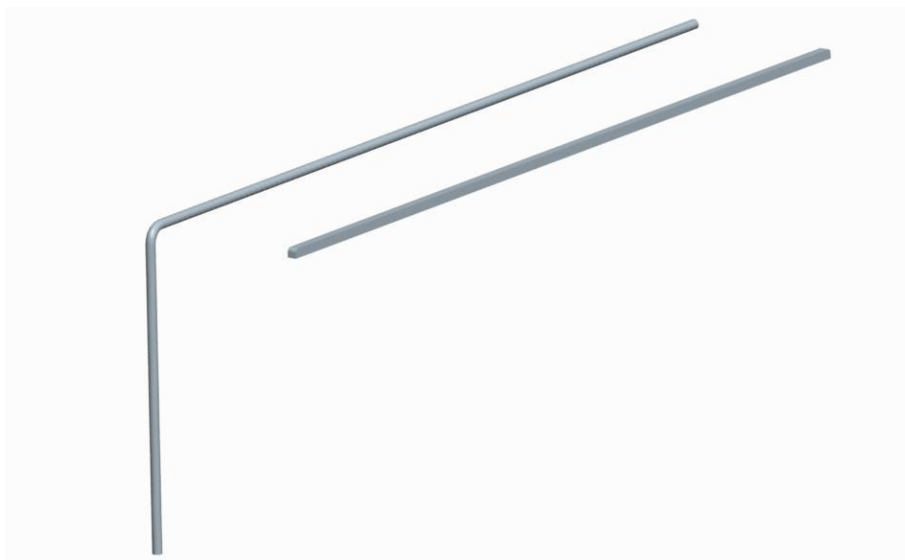
Součásti, které zvlákňovací komoru přímo obklopují, jsou z hlediska simulací rovněž nepodstatné. Nepoužila se tak skříň a přední a zadní dveře. Na základě rozměrů zvlákňovací komory se klasickým vytažením vytvořil kvádr představující prostor, který zaujímá vzduch. Pro simulaci je tento komponent nezbytný. Jeho objem

se v MKP vyplní jednotlivými elementy, které budou sloužit pro výpočet hledaných veličin a jejich průběhů.

Protože je úkolem práce optimalizace kolektoru, je nutné vyhotovit dostatečný počet simulací pro popis elektrostatického pole při změně jeho geometrických parametrů. Jednotlivé výsledky se mezi sebou budou porovnávat. Bude se hledat nejvhodnější varianta jednotlivých rozměrů. Proto bylo výhodné zanedbat zbylé součásti ve zvlákňovací komoře, které mají pouze malý vliv na výsledek.

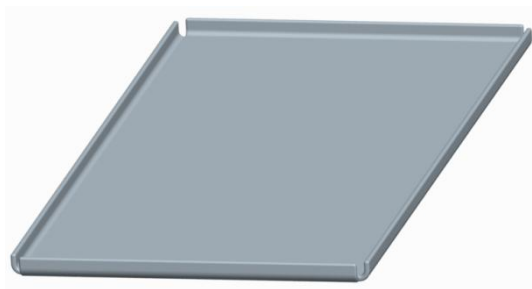
V nové sestavě se tak použilo těleso se zvlákňovací elektrodou a kolektor. Tím se značně zjednodušilo několik dílčích kroků. Mohla se generovat jemnější síť konečných prvků. Ve výsledku se dosáhlo značné úspory času a přesnějších výsledků. Těleso zvlákňovacího zařízení se značně zjednodušilo. Zanedbaly se všechny otvory, dutiny a spojovací šrouby. Zjednodušení modelu vedlo na jeho rovinnou symetrii.

Zvlákňovací elektrodu tvoří drát kruhového průřezu s průměrem 1,2 mm (Obr. 9). Pro zjednodušení modelu byl drát kruhového průřezu nahrazen drátem čtvercového průřezu. Tato změna průřezu zanedbatelně ovlivní výsledky simulací. Výsledný model je opět symetrický.



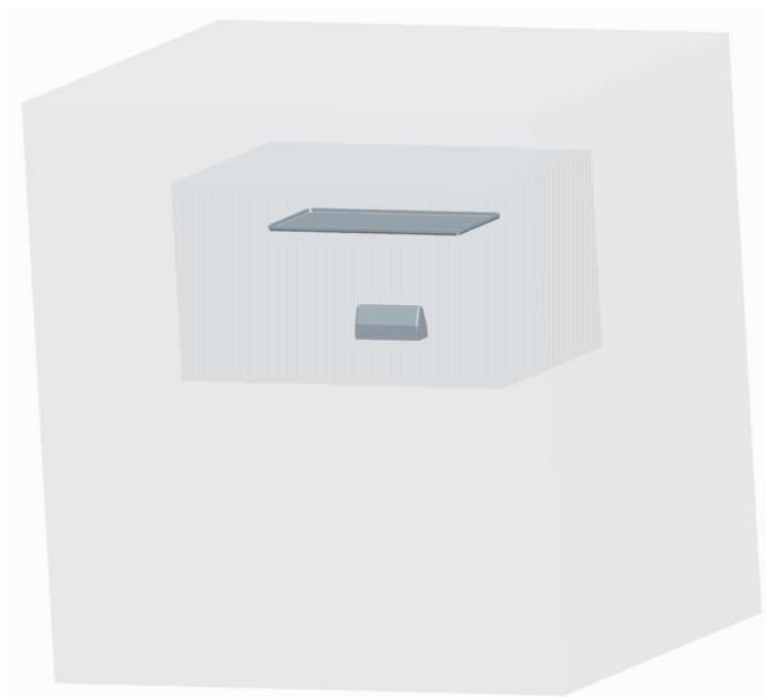
Obr. 9: Model původní (vlevo) a upravené (vpravo) zvlákňovací elektrody.

Jak již bylo zmíněno, tato bakalářská práce se zaměřuje na optimalizaci geometrických parametrů kolektoru (obr. 10). Na výpočtovém modelu proto byly pouze zaobleny ostré hrany, které by mohly generovat geometrickou singularitu. Vzdálenost mezi elektrodami lze nastavit v rozsahu 80 mm-200 mm. Pro analýzy a optimalizaci byla zvolena střední hodnota 140 mm.



Obr. 10: Model stávajícího kolektoru.

Pro zpřesnění výsledků byl model vzduchu rozdělen na dvě části (obr. 11) z důvodu zvýšení přesnosti řešení v blízkosti obou elektrod. Model vnitřní části byl vygenerován s jemnější sítí. Rozměry vnitřní části vzduchu byly určeny na základě předešlých simulací. Tento přístup umožnil výrazně snížit potřebný čas výpočtu.



Obr. 11: Geometrický model.

5.1.2 Definování souboru vlastností modelu

V této části se přiřadil jednotlivým dílům materiál. Nabídka vlastností materiálu závisí na typu analýzy. V materiálové knihovně je přístupný široký výběr materiálů. Popřípadě se dá vytvořit nový materiál. Při analýze napětí a elektrostatického pole je jedinou rozhodující materiálovou konstantou relativní permitivita. Vyjadřuje, kolikrát se intenzita elektrostatického pole zmenší v případě, že tělesa s elektrickým nábojem jsou místo ve vakuu umístěna v látkovém prostředí [24]. Představuje poměrnou veličinu, proto je bezrozměrná.

Oběma dílům představujícím vzduch se vytvořil nový materiál s relativní permitivitou 1. Tělesu zvlákňovací elektrody se přiřadil polyethylen s relativní permitivitou 2,3. Elektrodám byla nastavena vysoká relativní permitivita. Konkrétně hodnota 10^9 . Z fyziky platí, že vodivé materiály mají nekonečnou relativní permitivitu, protože uvnitř elektrod téměř nevzniká elektrostatické pole [24]. Vzniká totiž výhradně mezi elektrodami.

Pro každý díl se dále musí zvolit a blíže specifikovat typ elementu. Vybraný typ se použije při generaci sítě. Popisuje fyzikální chování a geometrii jednotlivých dílů [23]. Možnosti typů elementů závisí na typu analýzy a na zvolené dimenzi. Jsou zvoleny 3D elementy. Konkrétně se může vybrat element typu brick nebo tetrahedron (obr. 12). Při použití bricků docházelo při generování sítě ke značným komplikacím, proto se zvolily tetrahedrony.



Obr. 12: Schéma elementu tetrahedron (vlevo) a brick (vpravo). Čerpáno z [20].

Dále je třeba tento element blíže specifikovat. Musí se stanovit, zda je izotropní nebo ortotropní. Izotropní elementy jsou charakteristické svými vlastnostmi, které nezávisí na směru [20]. Naopak u ortotropních elementů vlastnosti závisí na směru [20]. Jelikož se geometrický model skládá z běžných materiálů jako vzduch, plast a ocel, přiřadily se všem dílům izotropní vlastnosti.

Posledním krokem v preprocessingu je určit okrajové podmínky. Zadávají se na hranici řešené oblasti. V této práci se využívá okrajová podmínka pro napětí. Lze zadat buď na určitou plochu, nebo do vybraných uzlů jednotlivých prvků. Při zadání okrajových podmínek do jednotlivých uzlů se musí napřed vygenerovat síť. Jestliže dojde ke změně sítě, musí se okrajová podmínka zadat znovu. Z tohoto důvodu se v jednotlivých simulacích aplikují okrajové podmínky na jednotlivé plochy.

Na povrch obou elektrod je zadána okrajová podmínka 25 kV. Kladný potenciál je zadán na zvlákňovací elektrodu a záporný na kolektor. Vektory intenzity tak směřují od zvlákňovací elektrody ke kolektoru. To odpovídá pohybu polymerních proudů během zvlákňování. Na vnější plochy geometrického modelu je zadána

okrajová podmínka 0 V, která představuje uzemnění skříně zvlákňovací komory. Hodnota tuhosti je pro všechny okrajové podmínky zadána 10^9 . Specifikuje přenos napětí mezi přilehlými uzly [20]. Vysoká tuhost způsobí, že hodnota napětí v uzlu bude přibližně stejná se zadanou hodnotou [20]. Nízká tuhost zapříčiní, že napětí v uzlu může být výrazně menší než zadané napětí [20].

5.1.3 Generování povrchové sítě konečných prvků

Generování sítě může být provedeno přímo nebo pomocí automatického generátoru [23]. Při přímé generaci sítě řešitel vytváří síť pomocí podobných nástrojů, které nabízí CAD softwary. Tento postup nepřipadá v úvahu vzhledem k časové náročnosti. Využilo se automatické generování sítě, protože se geometrický model v předchozím kroku již vytvořil a převedl do simulačního softwaru MKP.

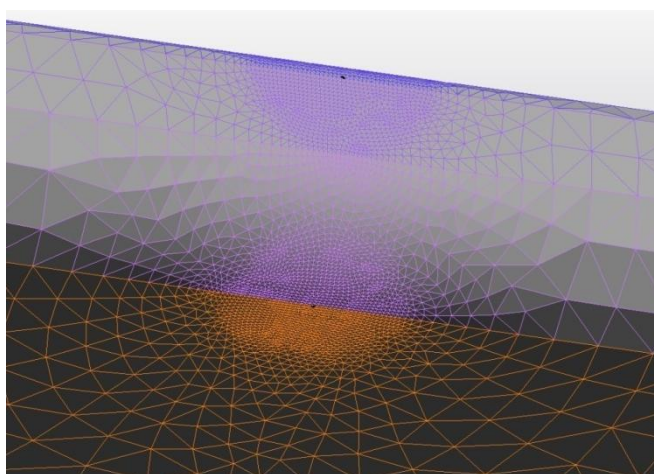
Tvorba 3D sítě automatickým generátorem je proces skládající se ze dvou fází. Napřed se musí vygenerovat povrchová síť. Jakmile jsou všechny díly rozmešovány, tak se povrchová síť prověřuje. Kontroluje se tím, zda síť na každé ploše odpovídá síti přilehlé plochy. Pokud je tato podmínka splněna, vytváří povrchová síť jednoznačnou hranici objemu. Nakonec se vytvoří objemová síť, která vyplní uzavřený objem stanovenými elementy. [20]

Vhodná síť představuje rovnováhu mezi přesností výsledku a výpočetní dobou. S jemnější sítí se získají přesnější výsledky, které se blíží spojitému řešení. Kvalitu povrchové sítě především určuje průměrná délka hrany prvku, která je určena absolutní hodnotou nebo procentuálně. Na základě přesnosti intenzity elektrostatického pole a časové náročnosti se jednotlivým dílům stanovila následující kvalita. Zvlákňovací elektrodě se přiřadila hodnota 0,3 mm, větší části vzduchu a zařízení 65 % a ostatním dílům 50 %. Pro jednotlivé simulace tak byla použita přibližně stejná hustota sítě konečných prvků s ohledem na pozměněnou geometrii kolektoru.

Pokud se při daném nastavení průměrné délky hrany prvku nemůže vytvořit správná povrchová síť, algoritmus pro tvorbu sítě sníží její velikost a pokusí se rozmešovat model znovu [20]. Tento proces opakuje, dokud nedosáhne správné sítě nebo nevykoná určitý počet opakování. Při každém opakování se velikost sítě sníží o stanovenou hodnotu. Při prvních simulacích nastávalo časté opakování generace sítě.

Vzhledem ke značnému časovému prodloužení se při odladění sestavy pro jednotlivé díly určilo výše zmíněné nastavení sítě, aby nedocházelo k opakování mešování.

Do určitých míst s největším gradientem intenzity se přidaly 4 body, které lokálně zjemní síť. Tato místa se nacházejí v oblasti zakončení kolektoru (obr. 13). Využila se rovinná symetrie kolektoru, takže se body zadaly pouze k jedné polovině modelu. Zadáním souřadnic v již vhodně vytvořeném globálním souřadném systému při tvorbě sestavy se určila přesná poloha těchto bodů. Poloměr koule, ve kterém bude jemnější síť, se nastavil 4 mm. Následně se všem bodům zadala absolutní velikost sítě 0,3 mm.



Obr. 13: Lokální zjemnění sítě u zakončení kolektoru.

5.1.4 Generování objemové sítě konečných prvků

Jak již bylo řečeno, objem uvnitř povrchové sítě se vyplní elementy. Elementy představují základní stavební prvek sítě. Jejich rozměry závisí na povrchové síti [20]. Typ objemové sítě lze volit z následujících možností: bricky a tetrahedrony, bricky a wedge, pouze bricky, tetrahedrony a wedge a pouze tetrahedrony.

Pro daný typ analýzy bylo nejvhodnější zvolit pouze tetrahedrony. Toto nastavení vyžaduje více elementů než ostatní, ale nejjednodušeji a nejlépe se elementy vyplní objem [23]. Mešování a analýzy probíhaly bez chyb. Značně se snížila doba mešování a analýzy oproti ostatním nastavením.

Rozměry tetrahedronů se stanoví délkou jejich hrany. Definuje se absolutní hodnotou nebo poměrem k délce hrany povrchové sítě. Použil se poměr k délce povrchové sítě. Tato hodnota byla zachována na 1. Znamená to, že je délka hrany elementu totožná s délkou hrany povrchové sítě [20]. U tohoto parametru se musí

stanovit míra přechodu z menších oblastí do větších. Hodnotou se definuje poměr průměrné délky hrany prvku se sousedními prvky [20]. Větší hodnoty způsobí menší kvalitu elementů [20]. Ponechala se přednastavená hodnota 1,2.

5.2 Processing

V parametrech analýzy je nutné zvolit vhodný řešič. Byl zvolen přednastavený automatický řešič. Ostatní typy řešičů byly nevhodné, protože jsou např. pouze pro jednoduché modely nebo pro zkrácení doby výpočtu na úkor přesnosti [20].

U zvoleného řešiče lze nastavit kolik procent dostupné paměti RAM je využito při analýze. Při přednastavených 40 % byly hlášeny při výpočtu chyby ohledně vyčerpání operační paměti. Tomu se předešlo nastavením 90 %.

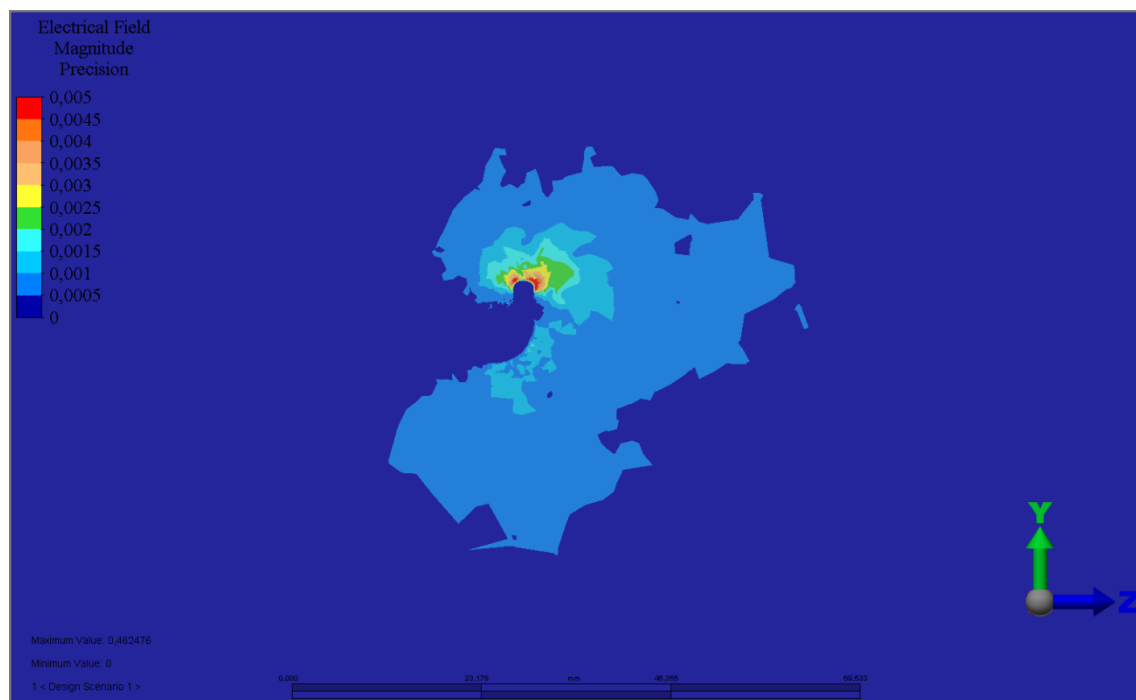
5.3 Postprocessing

Výsledky mohou být zobrazeny vizuálně, grafem nebo odečtením určité hodnoty. Software umožňuje vykreslit průběh napětí, intenzity a elektrické indukce. Pro všechny veličiny je možné znázornit izokřivky nebo izoplochy. Ty spojují místa se stejnou velikostí analyzované veličiny. U intenzity a elektrické indukce lze zobrazit velikost vektoru, jednotlivé složky v souřadnicových osách a vektorové pole. Při výběru vektorového pole se vyobrazí šipky z těžiště každého elementu [20]. Představují velikost a směr vektoru v daném elementu.

V této práci se použila většina těchto výsledků pro popis geometrických změn kolektoru. Porovnávaly se snímky s vykreslenou velikostí intenzity, její složky ve vodorovném směru a vektorového pole. Odečítaly se hodnoty v důležitých místech geometrického modelu. Vytvářely se grafy podél povrchu kolektoru výběrem příslušných uzlů. Vždy od středu kolektoru k začátku zaoblení ve dvou rovinách.

Software umožňuje zobrazit přesnost intenzity elektrostatického pole podle vztahu (4) [20]. Tato veličina nabývá hodnot 0-0,5 [20]. Na základě této veličiny se stanovily parametry sítě. Se zvolenou sítí poté vychází přesnost v okolí kolektoru v rozmezí 0-0,005 (obr. 14). Avšak je nutné si uvědomit, že se tyto hodnoty vztahují ke globálnímu maximu intenzity. To se nachází na zvlákňovací elektrodě. Dosahuje přibližně deseti násobných hodnot oproti maximální intenzitě na kolektoru. Přihlédnutím k tomuto faktu se změní horní limit přibližně na 0,05. Tato hodnota dosažené přesnosti je stále dostačující.

$$P_i = \frac{\|E_i\|_{\max} - \|E_i\|_{\min}}{2 \cdot \|E\|_{\max}} \quad (4)$$



Obr. 14: Přesnost elektrostatického pole v okolí kolektoru.

6 Analýza vlivu geometrických parametrů kolektoru

Nerovnoměrnost intenzity u povrchu kolektoru způsobuje přednostní ukládání vláken do míst s vyšší intenzitou. Navíc dochází k rozdílnému urychlení a prodloužení jednotlivých polymerních proudů.

Nejvyšší koncentrace elektrostatického pole u kolektoru se dosahuje na jeho krajních hranách, tato hodnota byla označena $E_{\max}$. Maximální hodnota intenzity je však zavádějící vlivem singulárních bodů. Velikost intenzity určená na začátku zaoblení kolektoru byla označena $E_{\text{zvlák}}$. Veličina $E_{\text{střed}}$ určuje velikost intenzity u středu kolektoru.

Při vyšší hodnotě $E_{\text{střed}}$ bude větší urychlení a prodloužení polymerního proudu ve vzduchu mezi elektrodami. Mohou se tím obecně získat vlákna s menším průměrem a lepšími vlastnostmi. Proto je příznivější vyšší velikost $E_{\text{střed}}$.

Úkolem práce je změnou geometrických parametrů dosáhnout vhodného průběhu intenzity podél povrchu kolektoru v obou rovinách symetrie. Délka kolektoru se nachází v rovině yz a šířka v rovině xy. Dále je nutné zajistit, aby k vysokému navýšení hodnot intenzit v rovině yz docházelo v dostatečné vzdálenosti od podkladové textilie, která se převíjí přes kolektor. Vlákna se tak na ni budou výhodněji ukládat. Zaručit snížení nebo zamezení maximálních hodnot intenzity v okolí kolektoru, kde nedochází k procesu zvlákňování.

6.1 Stávající konstrukce

Model stávajícího řešení kolektoru je na obr. 10. Jedná se o deskový kolektor o délce 350 mm, šířce 160 mm a tloušťce 2,5 mm. Poloměr zakončení obvodu kolektoru je 5 mm.

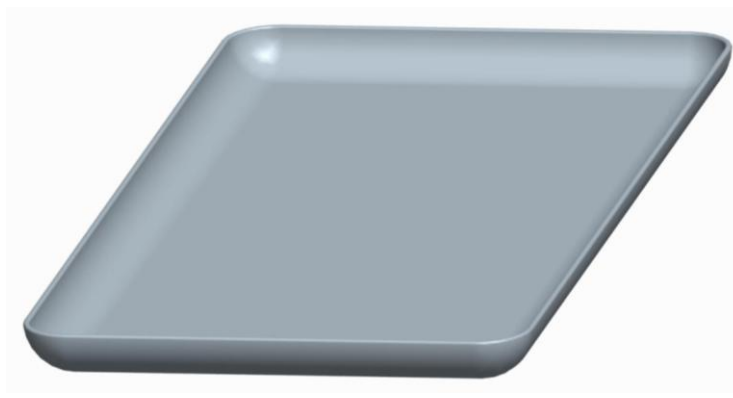
Délka kolektoru byla navržena podle požadované šířky 300 mm podkladové textilie, na kterou se nanáší nanovláknenná vrstva. Šířka byla určena na základě zkušeností. Na tloušťce plechu nezávisí velikost a rozložení elektrostatického pole. Podle výsledků analýzy jsou zaznamenány hodnoty intenzity v důležitých bodech v tab. 1. Ostatní výsledky jsou obsaženy v příloze.

Tab. 1: Hodnoty intenzit pro původní řešení kolektoru.

	$E_{\max}$ [V/mm]	$E_{\text{zvlák}}$ [V/mm]	$E_{\text{střed}}$ [V/mm]
rovina yz	1489	599	196
rovina xy	1394	561	196

6.2 Úpravy konstrukce

Aby nedocházelo k lokálnímu navýšení intenzity v rozích kolektoru, navrhnul se spojitý ohyb po celém obvodu kolektoru. Upravená konstrukce je na obr. 15. Důležité parametry pro průběh elektrostatického pole jsou poloměr zakončení, šířka, délka a průřez zakončení kolektoru. U těchto parametrů se postupně měnily rozměry. Tím se vždy získala závislost intenzity na daném parametru. Pro exaktní porovnání se veličiny uvedly do tabulek nebo grafů.



Obr. 15: Model upravené konstrukce kolektoru.

6.2.1 Změna poloměru zakončení

Simulace byly provedeny pro poloměry zakončení 0 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm a 50 mm. Při změně poloměru byly vždy zachovány zbylé rozměry. Tento parametr zásadně ovlivňuje průběh intenzity. Při poloměru 0 mm se dosahuje nejvyšších hodnot intenzit v obou rovinách (tab. 2, tab. 4).

Použitím poloměru 20 mm se ještě podstatně sníží velikost $E_{\max}$ a $E_{\text{zvlák}}$. Poté už následuje pouze mírný pokles velikosti intenzity se zvyšujícím se poloměrem (graf 9, graf 10, graf 11, graf 12). $E_{\text{střed}}$ klesá nepatrně oproti $E_{\text{zvlák}}$ se změnou poloměru zakončení (tab. 2, tab. 3).

Tab. 2: Porovnání intenzit při změně zakončení kolektoru v rovině yz.

r [mm]	$E_{\max}$ [V/mm]	$E_{\text{zvlák}}$ [V/mm]	$E_{\text{střed}}$ [V/mm]	$E_{\max}$ [%]	$E_{\text{zvlák}}$ [%]	$E_{\text{střed}}$ [%]	$E_{\text{zvlák}}/E_{\text{střed}}$ [-]
0	1794	1198	200	100,0	100,0	100,0	6,0
5	1782	624	197	99,3	52,1	98,5	3,2
10	1667	447	191	92,9	37,3	95,5	2,3
20	1494	327	184	83,3	27,3	92,0	1,8
30	1490	278	178	83,1	23,2	89,0	1,6
50	1476	224	170	82,3	18,7	85,0	1,3

Tab. 3: Porovnání intenzit při změně zakončení kolektoru do vzdálenosti 150 mm v rovině yz.

r [mm]	$E_{\max}$ [V/mm]	$E_{\min}$ [V/mm]	$E_{\max}/E_{\min}$ [V/mm]
0	256	197	1,30
5	246	193	1,27
10	230	186	1,24
20	205	178	1,15
30	190	170	1,12
50	171	158	1,08

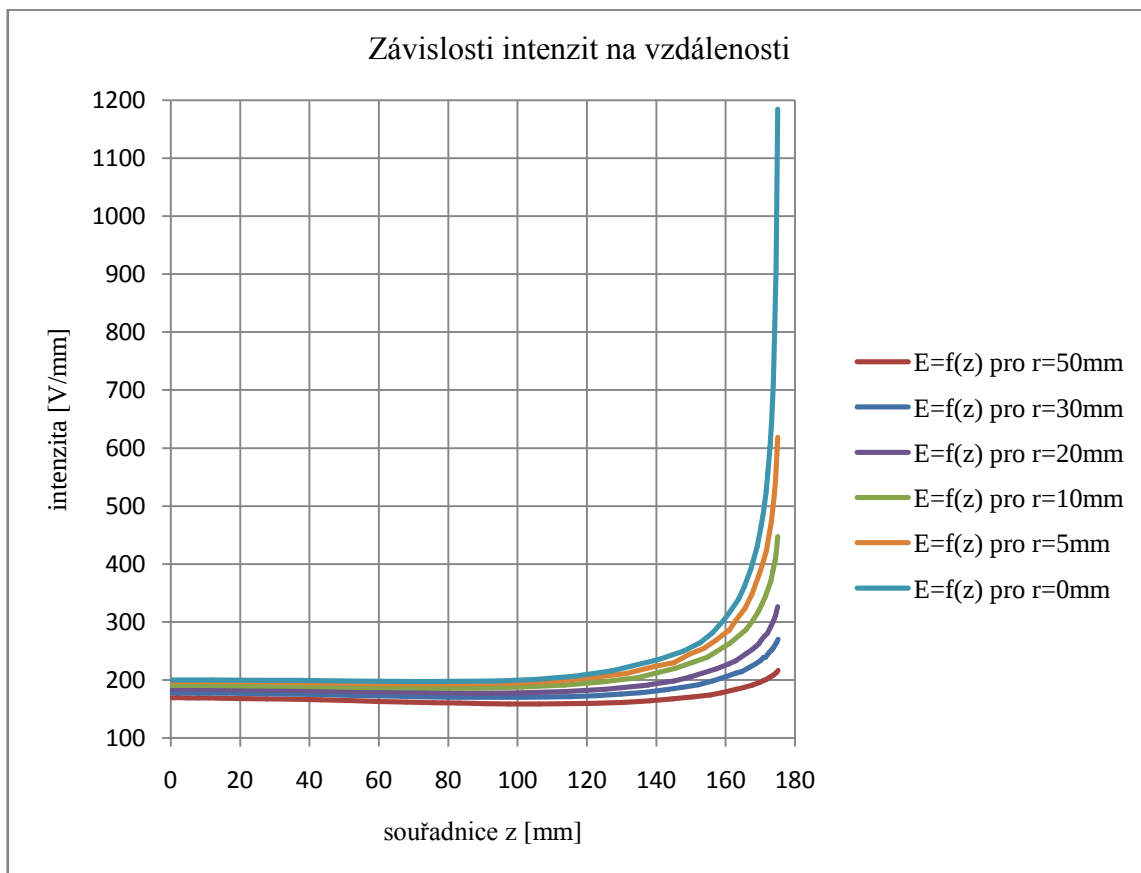
Tab. 4: Porovnání intenzit při změně zakončení kolektoru v rovině xy.

r [mm]	$E_{\max}$ [V/mm]	$E_{\text{zvlák}}$ [V/mm]	$E_{\max}$ [%]	$E_{\text{zvlák}}$ [%]	$E_{\text{zvlák}}/E_{\text{střed}}$ [-]
0	1581	1101	100,0	100,0	5,5
5	1580	595	99,9	54,0	3,0
10	1462	429	92,5	39,0	2,2
20	1325	321	83,8	29,2	1,7
30	1351	266	85,5	24,2	1,5
50	1361	223	86,1	20,3	1,3

Z grafu 1 a grafu 14 lze pozorovat zlepšování průběhu intenzity podél kolektoru s rostoucím poloměrem zakončení. I přes to není vhodný příliš vysoký poloměr zakončení kolektoru, protože klesá hodnota $E_{\text{střed}}$ a celý průběh intenzity podél kolektoru tak klesá k nižším hodnotám. Navíc při vyšších poloměrech nastanou komplikace s umístěním kolektoru do vymezeného prostoru zvlákňovací komory.

Podle grafu 1 je důležité zvolit takový poloměr zakončení, který má přibližně konstantní průběh intenzity do vzdálenosti 150 mm od středu kolektoru. Tato vzdálenost odpovídá šířce podkladové textilie. Z grafu se proto uvedlo do tab. 3 lokální maximum intenzity $E_{\max}$ a minimum intenzity $E_{\min}$, které se hledaly v rozsahu

od 0 mm do 150 mm. Poměr těchto veličin se použitím vyššího poloměru zakončení než 20 mm již příliš nezlepšuje.



Graf 1: Porovnání průběhů intenzit pro různé poloměry zakončení kolektoru podél délky v rovině yz.

Z výše uvedených důvodů je optimálním řešením poloměr zakončení 20 mm. Proto se zbylé parametry určovaly vzhledem k této hodnotě.

6.2.2 Změna šířky

Další série simulací byla zhotovena pro šířky kolektoru 120 mm, 140 mm, 160 mm, 180 mm a 200 mm. $E_{\max}$ bylo téměř shodné v jednotlivých výsledcích, proto se již neuvedlo do tabulek. Veličiny $E_{\text{zvlák}}$ a $E_{\text{střed}}$ klesají se zvětšující se šířkou kolektoru (graf 15, graf 16, graf 17). Pro tyto veličiny platí podobné zákonitosti z předešlého odstavce. Avšak pokles při zvyšování šířky je mírnější.

Procentuální změna hodnot $E_{\text{zvlák}}$ je menší oproti změně při různých poloměrech zakončení kolektoru (tab. 5, tab. 6). Podíl veličin $E_{\text{zvlák}}$ a $E_{\text{střed}}$ je téměř totožný pro jednotlivé šířky kolektoru (tab. 5, tab. 6), proto tento parametr téměř neovlivňuje charakter průběhu intenzity elektrostatického pole (graf 2, graf 18).

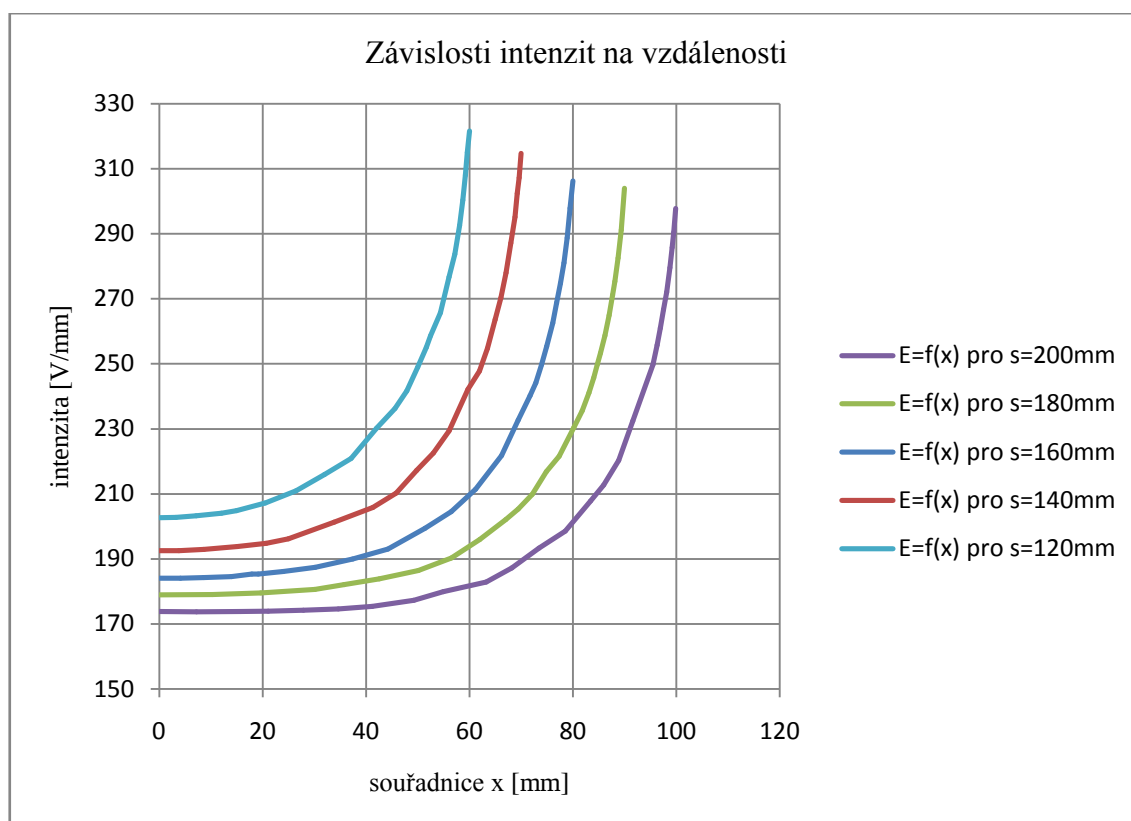
Tab. 5: Porovnání intenzit při změně šířky kolektoru v rovině yz.

s [mm]	$E_{\text{zvlák}}$ [V/mm]	$E_{\text{střed}}$ [V/mm]	$E_{\text{zvlák}}$ [%]	$E_{\text{střed}}$ [%]	$E_{\text{zvlák}}/E_{\text{střed}}$ [-]
120	366	203	111,9	110,3	1,803
140	345	193	105,5	104,9	1,788
160	327	184	100,0	100,0	1,777
180	317	179	96,9	97,3	1,771
200	306	174	93,6	94,6	1,759

Tab. 6: Porovnání intenzit při změně šířky kolektoru v rovině xy.

s [mm]	$E_{\text{zvlák}}$ [V/mm]	$E_{\text{zvlák}}$ [%]	$E_{\text{zvlák}}/E_{\text{střed}}$ [-]
120	334	104,0	1,645
140	332	103,4	1,720
160	321	100,0	1,745
180	302	94,1	1,687
200	298	92,8	1,713

Změna šířky kolektoru ovlivní průběh intenzity v rovině yz podle grafu 18. Nejvýhodnější křivka je pro šířku 120 mm, jelikož se zde dosahuje vyšších hodnot intenzity. Rovina xy je kolmá k ose drátu zvlákňovací elektrody, proto se v této rovině nanášejí vlákna na podkladovou textilií v úzkém pruhu. V grafu 2 je dosaženo rovnoměrnosti průběhu intenzity do dostatečné vzdálenosti pro zvlákňování v rovině xy již pro šířku 120 mm. Navíc se při této šířce opět dosahuje nejvyšších hodnot intenzit. Z uvedených důvodů se proto navrhla šířka kolektoru 120 mm.



Graf 2: Porovnání průběhů intenzit pro různé šířky kolektoru podél šířky v rovině xy.

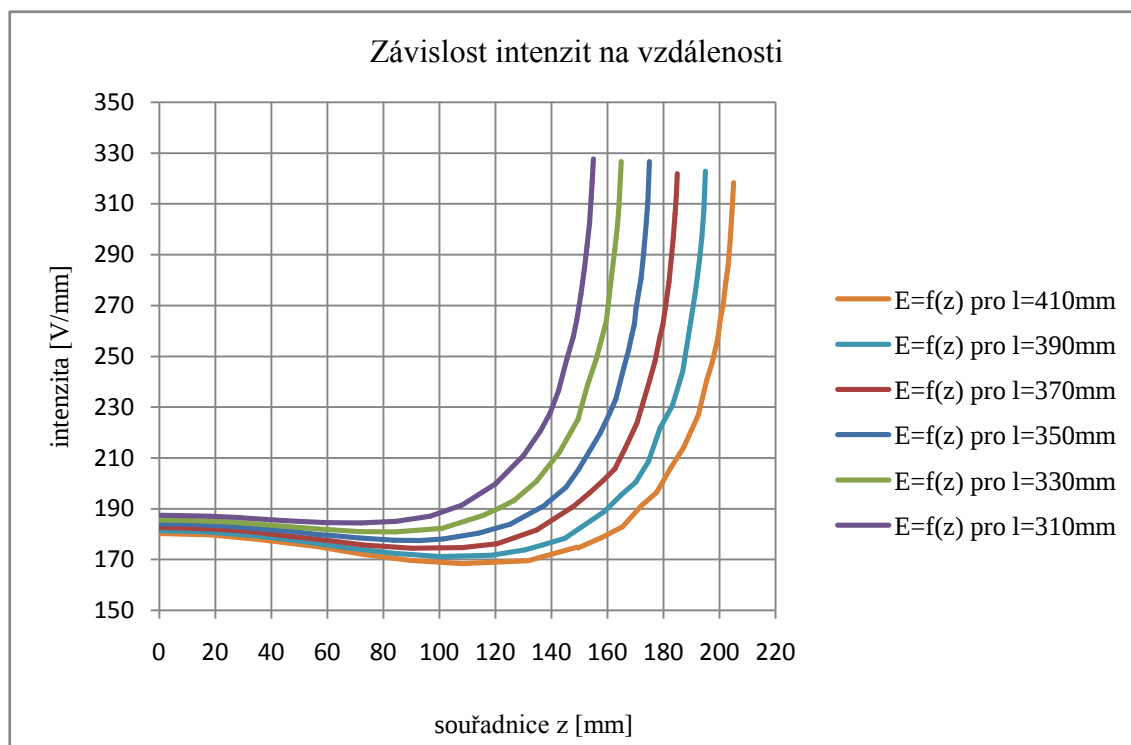
6.2.3 Změna délky

Simulace se provedly pro délky kolektoru 310 mm, 330 mm, 350 mm, 370 mm a 390 mm. Pro tento parametr nejsou již uvedeny veličiny $E_{\max}$, $E_{\text{zvlák}}$ a $E_{\text{střed}}$, protože se mění nepatrně. Důvodem je zřejmě přibližně dvakrát větší délka kolektoru oproti šířce, takže změna délky o 20 mm příliš neovlivní tyto veličiny. Tato skutečnost platí i pro závislosti v grafu 19, které jsou téměř shodné.

Zřejmé změny průběhů již poskytuje graf 3. Křivky jsou opět důležité do šířky podkladové textilie 150 mm. Poměrem veličin E_{lmax} a E_{min} se určila nejvhodnější křivka (tab. 7). Ta přísluší délce kolektoru 390 mm, jelikož se její poměr blíží nejvíce hodnotě 1.

Tab. 7: Porovnání intenzit při změně délky kolektoru v rovině yz.

l [mm]	E_{lmax} [V/mm]	E_{min} [V/mm]	E_{lmax}/E_{min} [-]
310	270	184	1,47
330	226	181	1,25
350	206	177	1,16
370	193	174	1,11
390	182	171	1,06
410	180	168	1,07



Graf 3: Porovnání průběhů intenzit pro různé délky kolektoru podél délky v rovině yz.

6.2.4 Změna průřezu zakončení

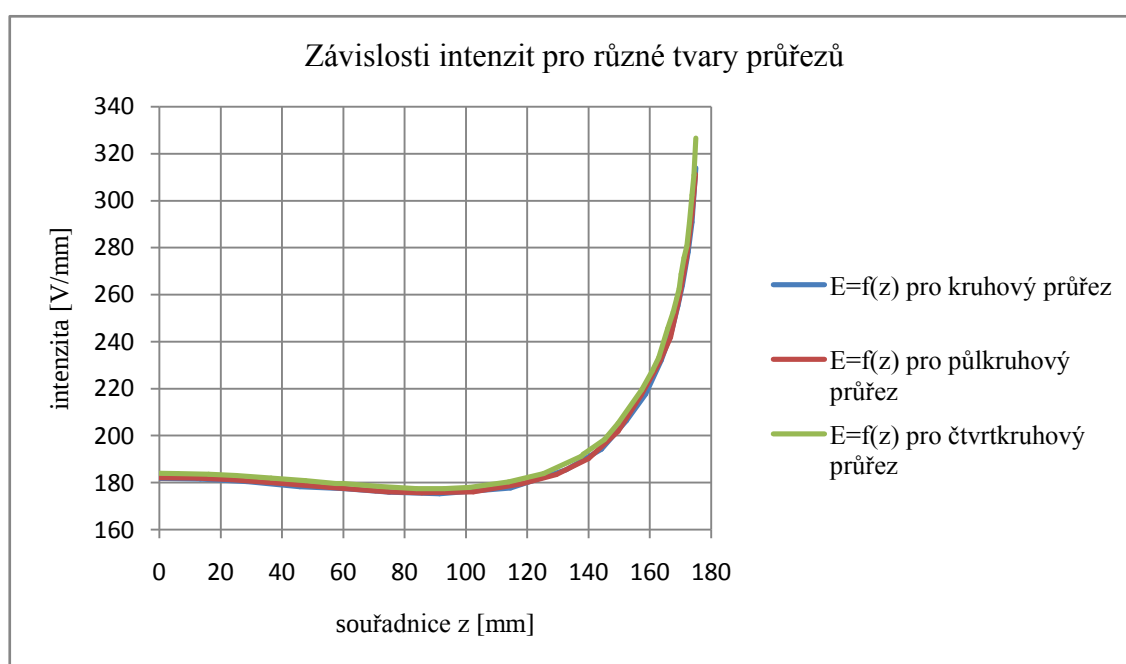
Závěrem se upravoval průřez zakončení na obvodu kolektoru. Porovnával se čtvrtkruhový, půlkruhový a kruhový průřez. V tab. 8 a tab. 9 nastane veliký pokles E_{max} při změně z čtvrtkruhového na půlkruhový průřez. Při kruhovém průřezu se tato veličina dále příliš nesníží. Veličiny $E_{zvlák}$ a $E_{střed}$ na tomto parametru závisí minimálně. Průběhy v grafu 4 a grafu 20 proto vychází téměř shodně. Vzhledem k technologii výroby kolektoru se nakonec navrhl kruhový průřez.

Tab. 8: Porovnání intenzit při změně průřezu kolektoru v rovině yz.

tvar průřezu	$E_{\max}$ [V/mm]	$E_{zvlák}$ [V/mm]	$E_{střed}$ [V/mm]	$E_{\max}$ [%]	$E_{zvlák}$ [%]	$E_{střed}$ [%]
čtvrtkruhový	1494	327	184	100,0	100,0	100,0
půlkruhový	525	323	182	35,1	98,8	98,9
kruhový	484	321	182	32,4	98,2	98,9

Tab. 9: Porovnání intenzit při změně průřezu kolektoru v rovině xy.

tvar průřezu	$E_{\max}$ [V/mm]	$E_{zvlák}$ [V/mm]	$E_{\max}$ [%]	$E_{zvlák}$ [%]
čtvrtkruhový	1325	321	100,0	100,0
půlkruhový	489	307	36,9	95,6
kruhový	428	303	32,3	94,4



Graf 4: Porovnání průběhů intenzit pro různé průřezy zakončení kolektoru podél délky v rovině yz.

7 Optimalizace kolektoru

7.1 Konstrukce

Na základě provedených simulací pro různé konstrukční možnosti a rozměry byl navržen konečný kolektor. Výsledné zakončení kolektoru bylo zvoleno v podobě kruhového průřezu. Jednotlivé navržené rozměry jsou: délka 390 mm, šířka 120 mm, poloměr zakončení 20 mm a tloušťka 1,5 mm. Výrobní výkres desky a svařence kolektoru jsou začleněny do přílohy.

Závěrem byla provedena simulace konečného řešení kolektoru. Výsledky se poté porovnály s původním kolektorem. Z tab. 10 a tab. 12 lze pozorovat příznivý pokles veličin $E_{\max}$ a $E_{\text{zvlák}}$, naopak veličina $E_{\text{střed}}$ se nepatrně zvýší, což také zlepší průběh zvlákňování. Poměr veličin E_{lmax} a E_{min} se u navrženého kolektoru více blíží 1 (tab. 11).

Tab. 10: Porovnání intenzit pro původní a navržený kolektor v rovině yz.

	$E_{\max}$ [V/mm]	$E_{\text{zvlák}}$ [V/mm]	$E_{\text{střed}}$ [V/mm]	$E_{\max}$ [%]	$E_{\text{zvlák}}$ [%]	$E_{\text{střed}}$ [%]	$E_{\text{zvlák}}/E_{\text{střed}}$ [-]
původní kolektor	1489	599	196	100,0	100,0	100,0	3,1
navržený kolektor	651	409	199	43,7	68,3	101,5	2,1

Tab. 11: Porovnání intenzit do vzdálenosti 150 mm pro původní a navržený kolektor v rovině yz.

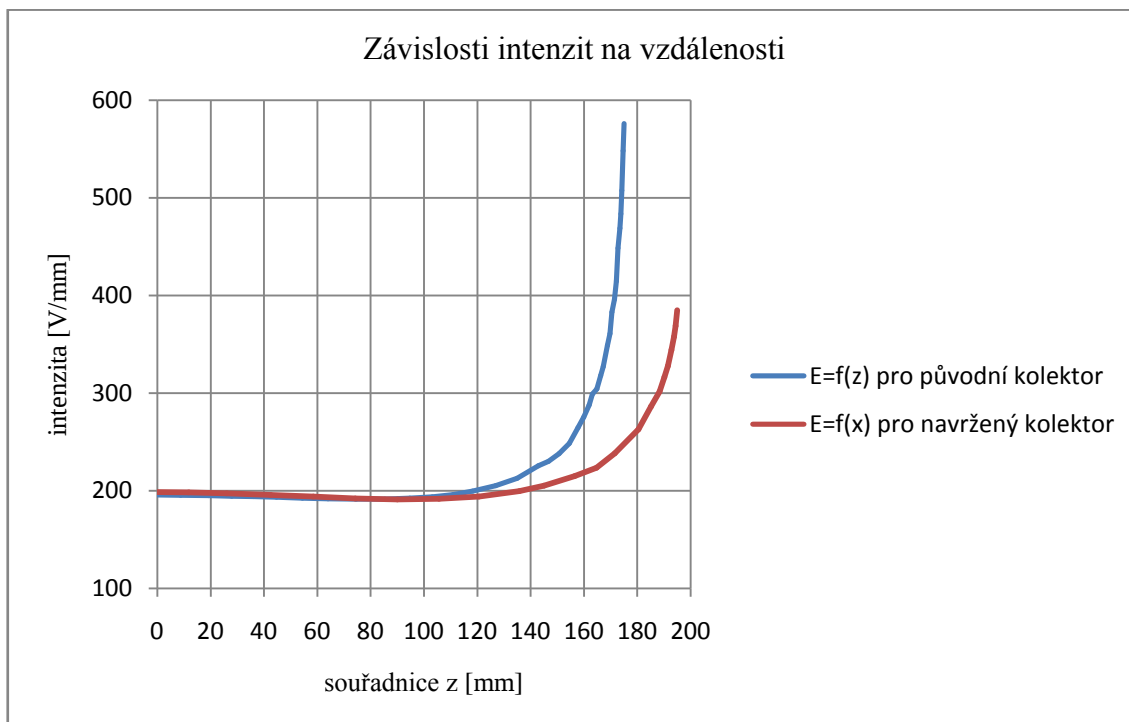
	E_{lmax} [V/mm]	E_{min} [V/mm]	$E_{\text{lmax}}/E_{\text{min}}$ [-]
původní kolektor	237	191	1,24
navržený kolektor	209	191	1,09

Tab. 12: Porovnání intenzit pro původní a navržený kolektor v rovině xy.

	$E_{\max}$ [V/mm]	$E_{\text{zvlák}}$ [V/mm]	$E_{\max}$ [%]	$E_{\text{zvlák}}$ [%]	$E_{\text{zvlák}}/E_{\text{střed}}$ [-]
původní kolektor	1394	561	100,0	100,0	2,9
navržený kolektor	436	320	31,3	57,0	1,6

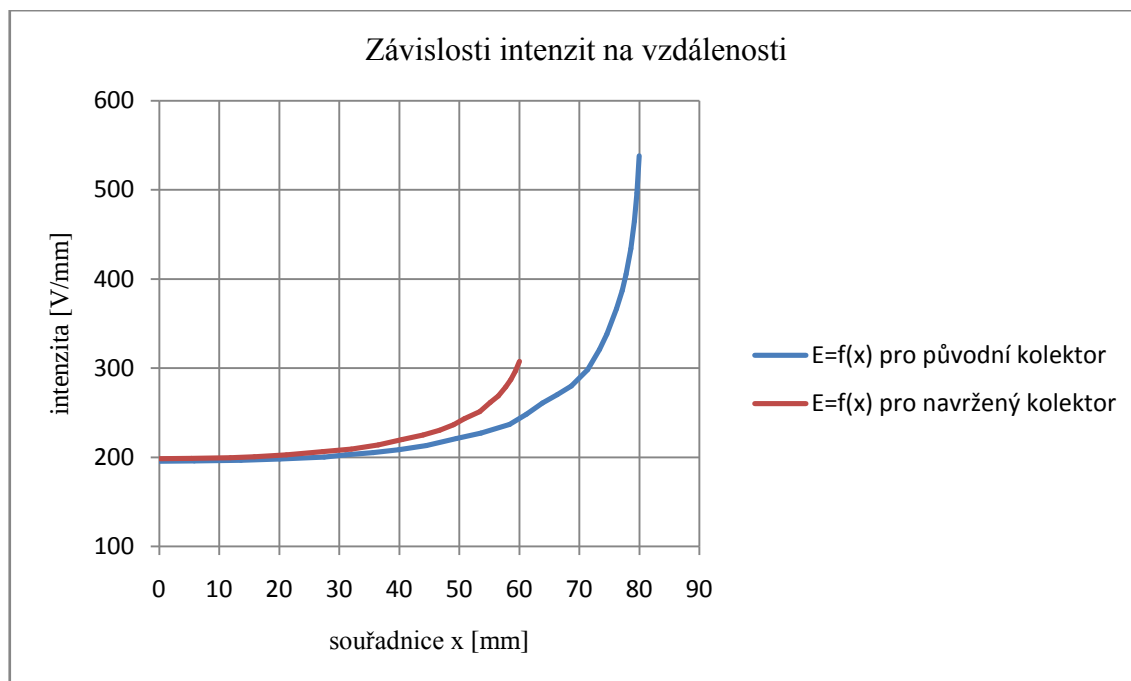
Navržený kolektor má rovnoměrnější průběh intenzity elektrostatického pole v rovině yz oproti původnímu kolektoru (graf 5). Rovnoměrnost průběhu platí zejména do vzdálenosti podkladové textilie 150 mm. Velikost intenzity podél

podkladové textilie dosahuje v převážné části nepatrně vyšších hodnot oproti původnímu řešení (graf 5).



Graf 5: Porovnání průběhů intenzit pro původní a navržený kolektor v rovině yz.

Navržený kolektor v rovině xy dosahuje rovnoměrný průběh intenzity do dostatečné vzdálenosti při zvlákňování (graf 6). Pozdější vyšší nárůst hodnot není negativní, protože se nanovláknna v rovině xy nanášejí na podkladovou textilií pouze v tenkém pruhu.



Graf 6: Porovnání průběhů intenzit pro původní a navržený kolektor v rovině xy.

7.2 Technologie

Vzhledem k tomu, že se nejedná o obvyklou součást vyrobitelnou např. konvenčním obráběním, je nutné navrhnout hospodárnou technologii výroby. Nejvhodnější z hlediska dosažení požadovaného tvaru by byla výroba tvářením. Tu lze efektivně použít pouze při vyšším počtu vyrobených kusů. Proto se kolektor za účelem testování vyrobí jako svařenec z normalizovaných polotovarů.

Jako polotovary se použijí trubky s požadovanými rozměry a pás plechu. Jednotlivé trubky se k sobě svaří, tak aby vytvořily uzavřený tvar totožný s obvodovým tvarem kolektoru. Následně se k této konstrukci přivaří deska. Nakonec se přebrousí všechny svary.

7.3 Materiál

Zvolený materiál musel vyhovovat několika požadavkům. Musel být dostatečně tažný a svařitelný. Hlavní kritérium bylo, aby vyhovoval požadavkům kladených na čisté prostory třídy A. Tím se výběr zúžil pouze na nerezovou ocel, která se použije.

8 Závěr

Bakalářská práce se zabývá optimalizací zařízení na tvorbu nanovláken. Konkrétně se zaměřila na horní elektrodu, tzn. kolektor. Optimalizací průběhu elektrostatického pole pomocí MKP je tato práce výjimečná.

V teoretické části byla uvedena teorie z oblasti elektrostatiky a jednotlivé metody výroby nanovláken s důrazem na elektrostatické zvlákňování. V praktické části práce byl uveden postup elektrostatické analýzy v softwaru Autodesk Algor Simulation 2011. Byly provedeny analýzy stávající a upravené konstrukce kolektoru. Úprava konstrukce spočívala v navržení zaoblení po celém obvodu kolektoru. U této konstrukce se dále zkoumaly jednotlivé parametry ovlivňující rozložení intenzity elektrostatického pole. Tyto parametry jsou poloměr zakončení, šířka, délka a průřez zakončení kolektoru. Výsledky jednotlivých simulací se uvedly do grafů a tabulek. Po jejich vyhodnocení se navrhly optimální rozměry a průřez zakončení kolektoru.

Určila se technologie výroby kolektoru pro výrobu jednoho kusu za účelem testování. Nejvhodnější je vyrobit kolektor svařováním polotovarů. Z materiálů nejvíce vyhovuje daným požadavkům nerezová ocel. Na základě konstrukčního návrhu se vytvořily v softwaru Pro/Engineer výrobní výkresy desky a svařence kolektoru.

Autor bakalářské práce považuje zkoumání elektrostatického pole prostřednictvím simulací MKP při zvlákňování nanovláken za nezbytnou součást konstrukce náležitých výrobních strojů a zařízení. MKP poskytuje zřetelné možnosti optimalizace jednotlivých zvlákňovacích elektrod. V neposlední řadě lze také navrhnout ideální rozměry zvlákňovací komory a ostatních součástí, které se v ní nachází.

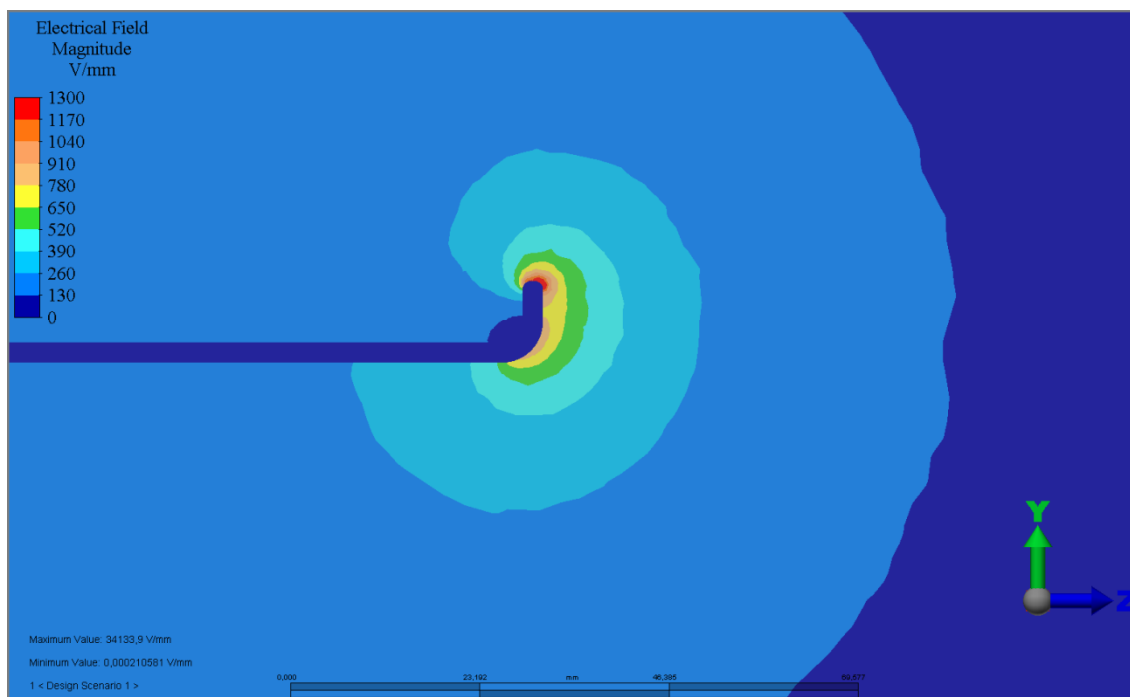
9 Použitá literatura

- [1] „Drawing“- The production of individual nanofibers by experimental method. In: Nanocon [online]. 2011 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://www.nanocon.cz/files/proceedings/nanocon_11/
- [2] Nanofibers and their applications in tissue engineering. In: Int J Nanomedicine [online]. 2006 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2426767/>
- [3] Forcespinning™. *Fiberiotech.com* [online]. 2011 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://fiberiotech.com/technology/how-it-works/>
- [4] Nanovláknno. *Cs.wikipedia.org* [online]. 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Nanovl%C3%A1kno#V.C3.BDrobn.C3.AD_technologie
- [5] Melt blown technology. *Scribd.com* [online]. 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/31397167/10-Melt-Blown-Technology>
- [6] RAMAKRISHNA, Seeram. *An introduction to electrospinning and nanofibers*. Hackensack, NJ: World Scientific, c2005, 382 s. ISBN 98-125-6454-3.
- [7] Electric potential. *En.wikipedia.org* [online]. 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_potential
- [8] Electric field. *En.wikipedia.org* [online]. 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_field
- [9] Capacitor. *En.wikipedia.org* [online]. 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Condensator#Dielectric_materials
- [10] Permittivita. *Cs.wikipedia.org* [online]. 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Permittivita#Relativn.C3.AD_permittivita
- [11] Bezpečná nanovláknna. In: *Chem. listy* [online]. 2009 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2009_12_1009-1016.pdf
- [12] Application of direct tracking method for measuring electrospun nanofiber diameter. In: *Brazilian Journal of Chemical Engineering* [online]. 2009 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-66322009000100006&script=sci_arttext

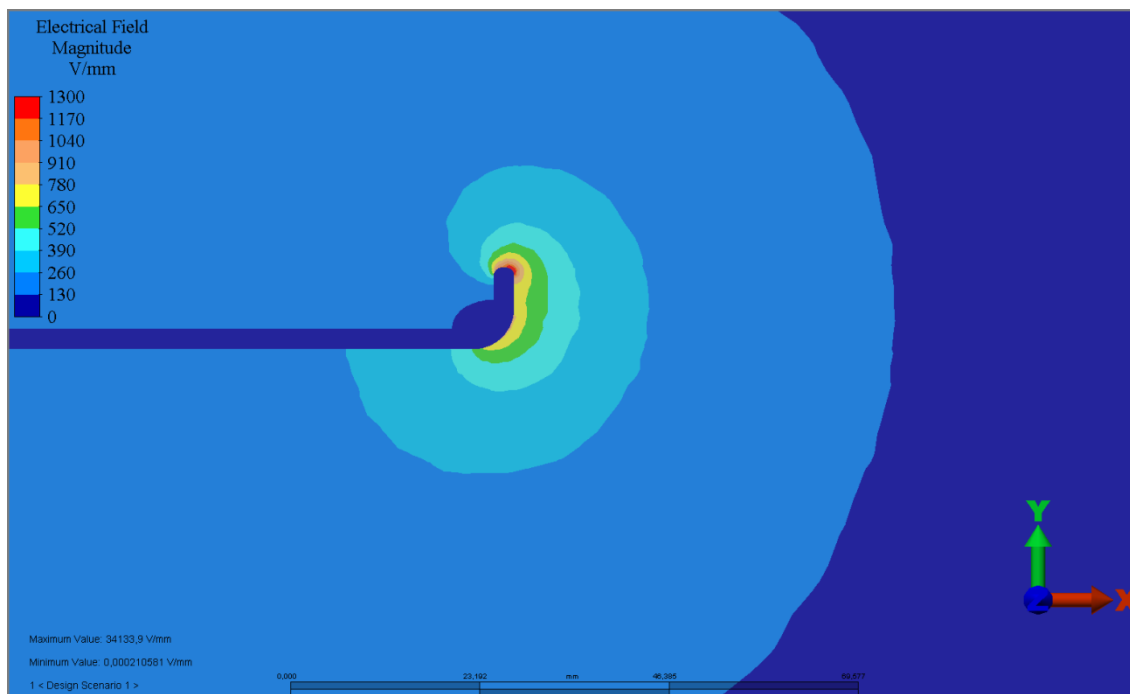
- [13] Production Nozzle-Less Electrospinning Nanofiber Technology. In: *Elmarco* [online]. 2009 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/upload/soubory/dokumenty/66-1-1-mrs-fall-boston-09.pdf>
- [14] Electrospinning Apparatus. *Imetechnologies* [online]. 2009 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.imetechnologies.nl/>
- [15] STEVENS, Edited by P.J. Brown and K. *Nanofibers and nanotechnology in textiles*. 1. publ. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 14-200-4449-4.
- [16] *Elektrostatické zvlákňování polyakrilonitrilu*. Liberec, 2007. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [17] *Elektrostatické zvlákňování polymerních tavenin*. Liberec, 2010. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [18] *Elektrostatické zvlákňování polyuretanu*. Liberec, 2007. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [19] *Physical principles of electrospinning*. Liberec, 2009. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [20] Documentation & Online Help. *Autodesk* [online]. 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://usa.autodesk.com/support/documentation/>
- [21] Multi-Spinnerets for Nanofibers Electrospinning Unit. *Electrospinning* [online]. 2011 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://www.electrospinning.com/multi_spinnerets.html
- [22] RŮŽIČKOVÁ, Jana. *Elektrostatické zvlákňování nanovláken*. Vyd. 2., nezměn. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006, 54 s. ISBN 80-737-2066-3.
- [23] KOLÁŘ, Vladimír. *FEM Principy a praxe metody konečných prvků*. 1. vyd. Praha: Computer Press, 1997, 401 s. ISBN 80-722-6021-9.
- [24] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechnika*. 2. dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006, 623 s. ISBN 80-867-0613-3.

10 Seznam příloh

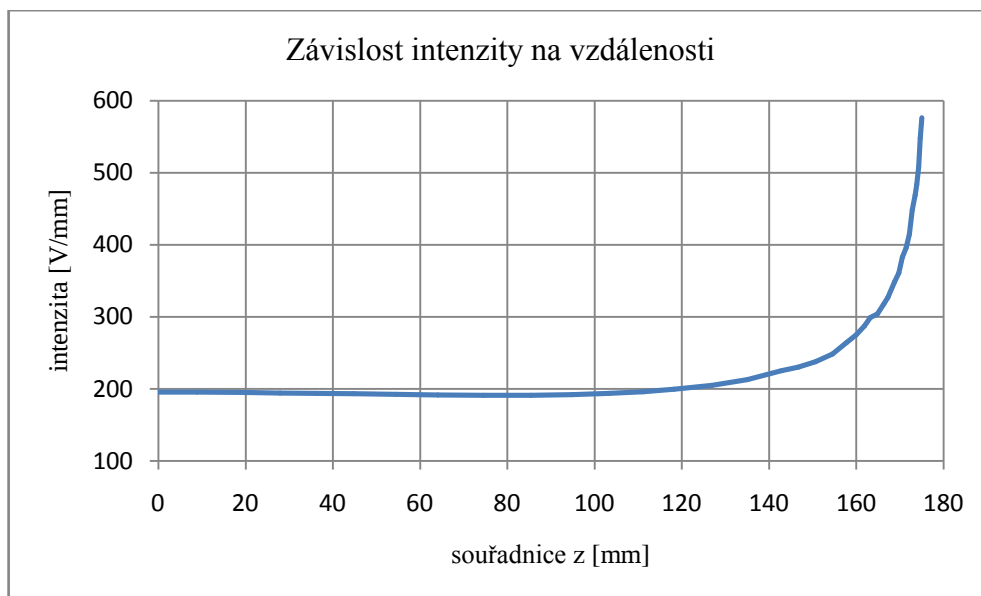
Příloha 1: Původní kolektor



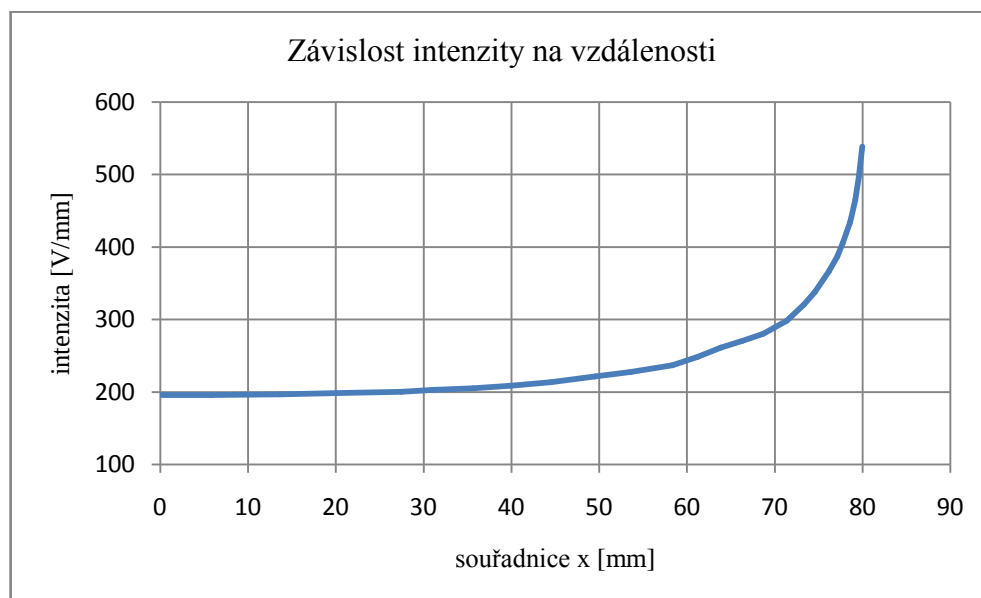
Obr. 16: Rozložení intenzity v okolí zakončení původního kolektoru v rovině yz.



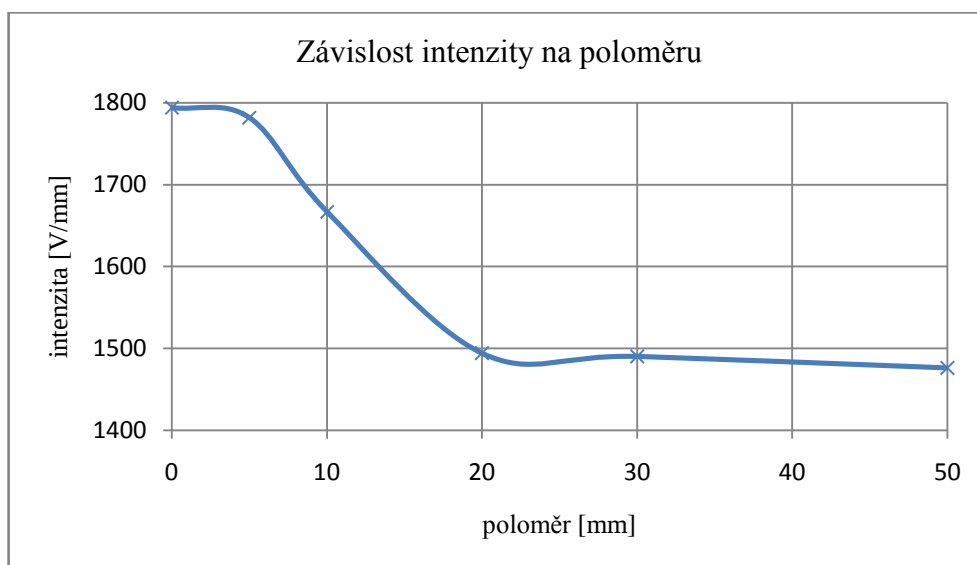
Obr. 17: Rozložení intenzity v okolí zakončení původního kolektoru v rovině xy.



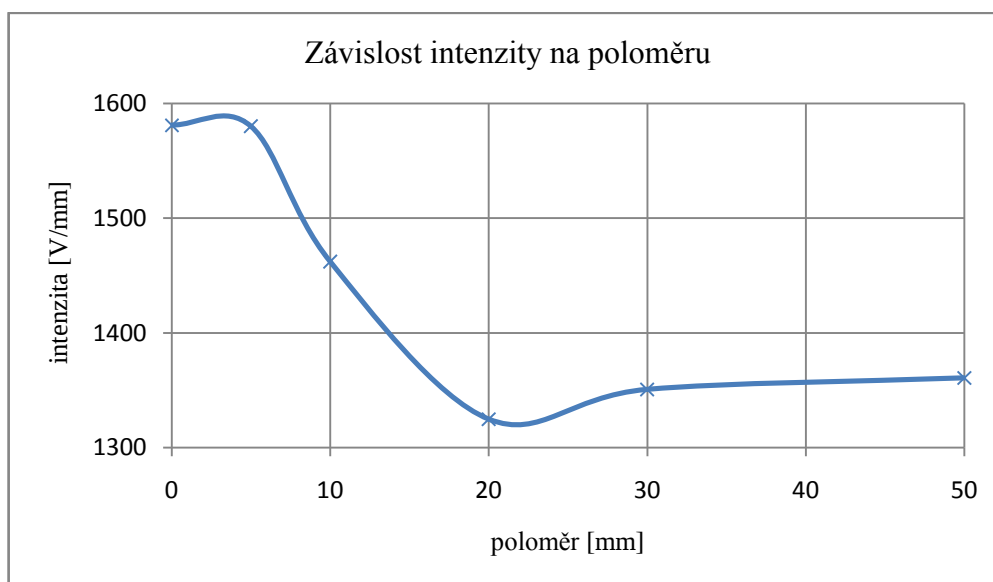
Graf 7: Průběh intenzity podél délky kolektoru v rovině yz.



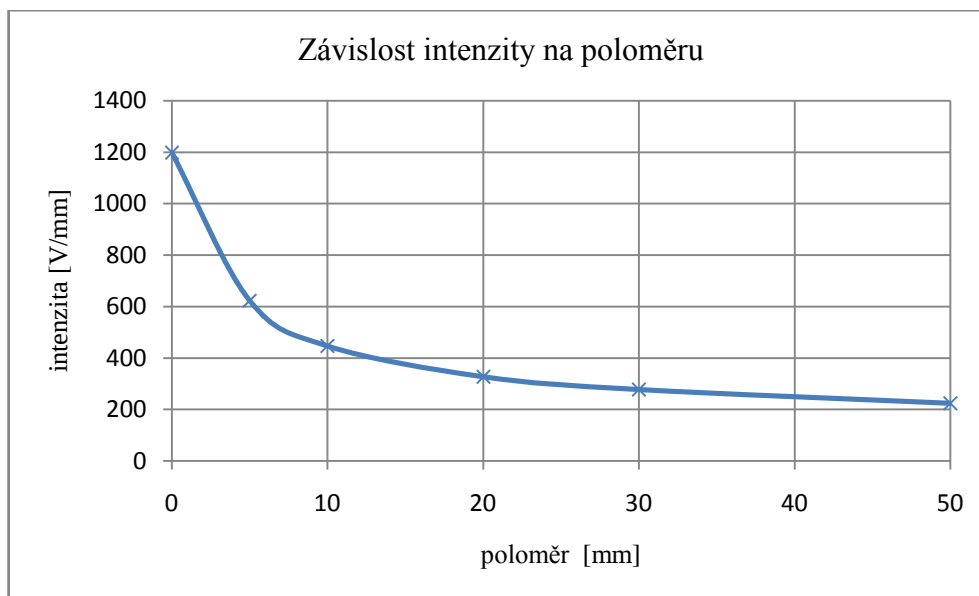
Graf 8: Průběh intenzity podél šířky kolektoru v rovině xy.

Příloha 2: Změna poloměru

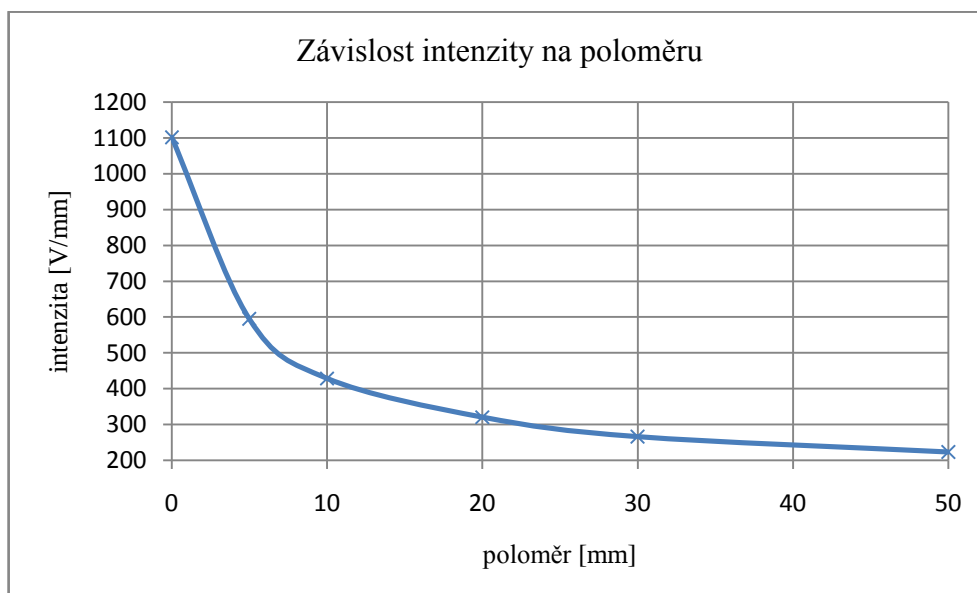
Graf 9: Průběh E_{max} v rovině yz v závislosti na poloměru zakončení kolektoru.



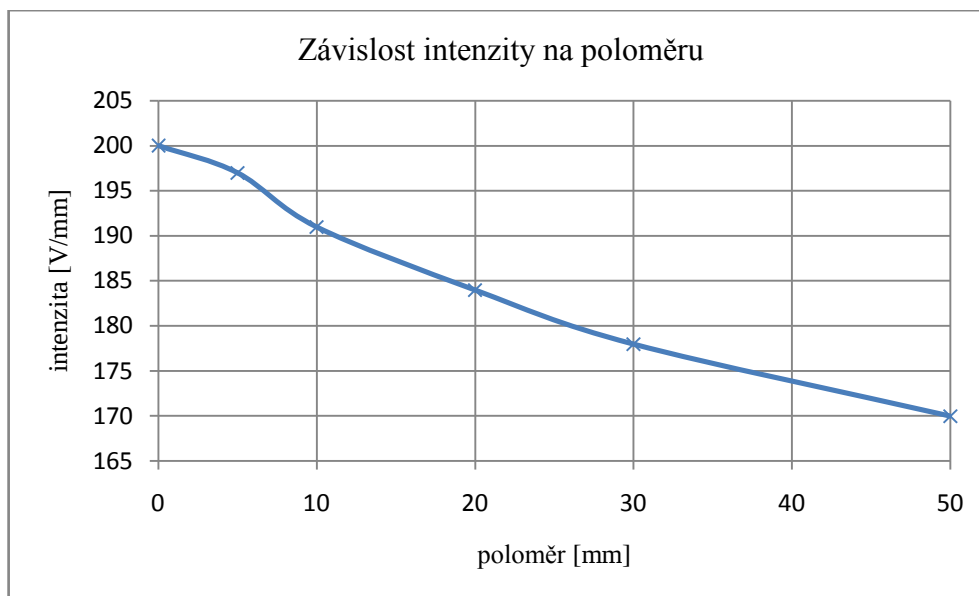
Graf 10: Průběh E_{max} v rovině xy v závislosti na poloměru zakončení kolektoru.



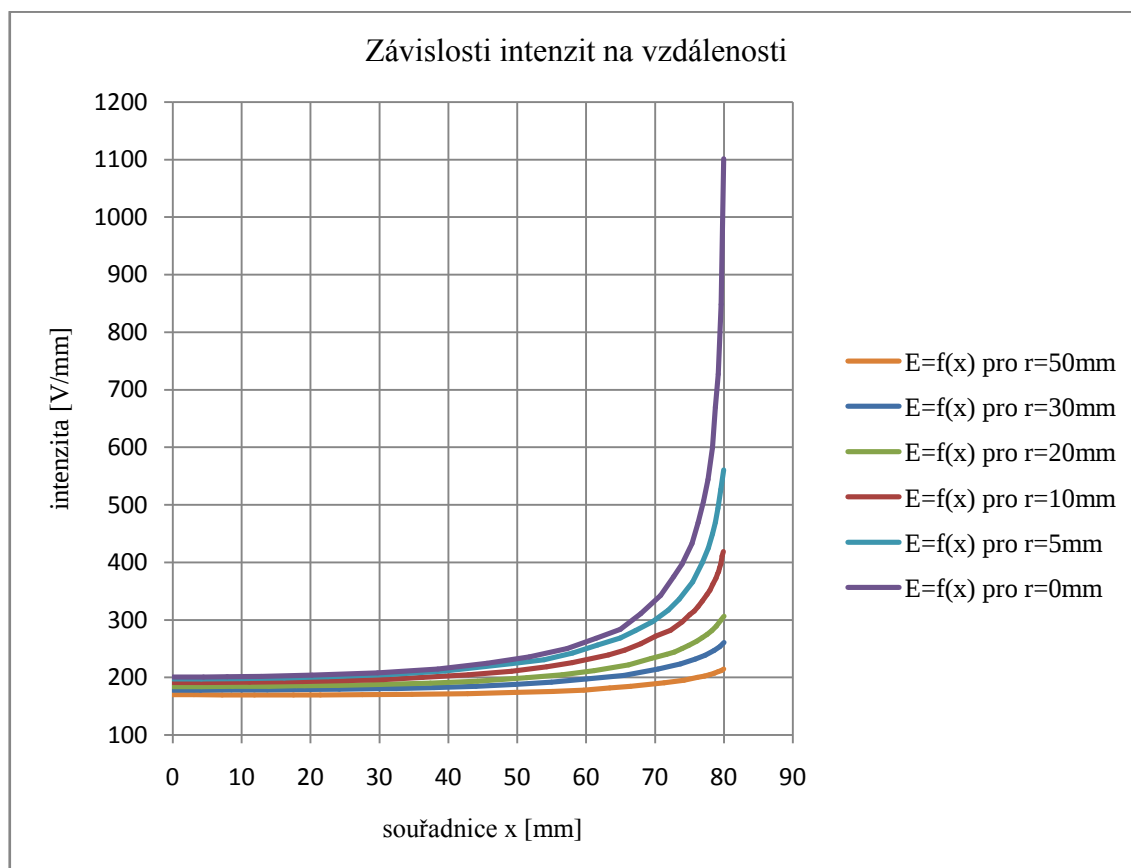
Graf 11: Průběh $E_{zvlák}$ v rovině yz v závislosti na poloměru zakončení kolektoru.



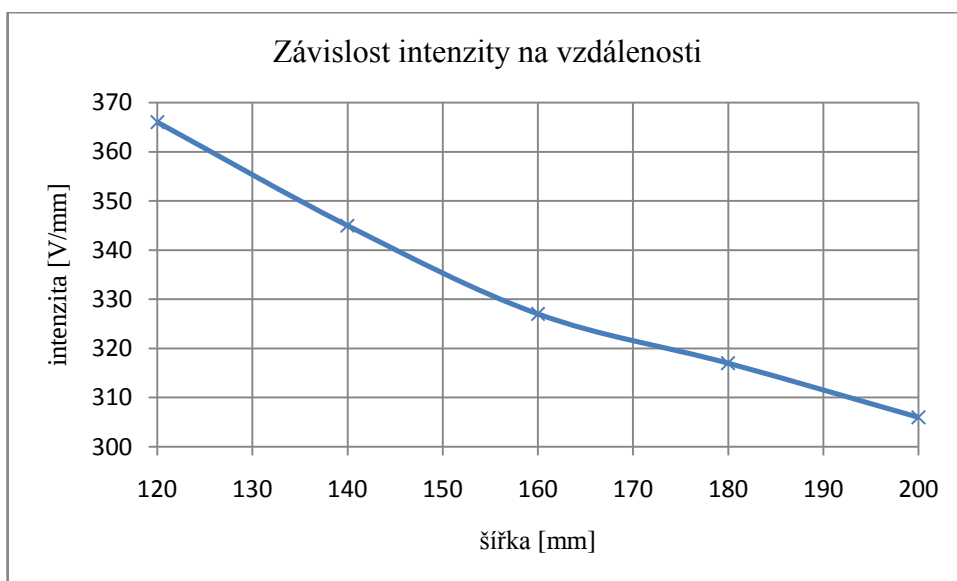
Graf 12: Průběh $E_{zvlák}$ v rovině xy v závislosti na poloměru zakončení kolektoru.



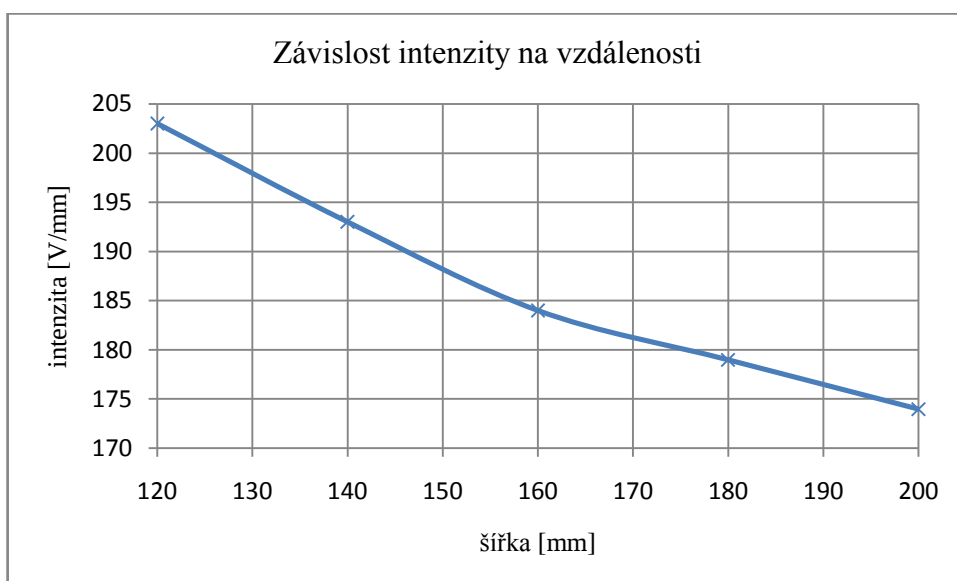
Graf 13: Průběh $E_{střed}$ v rovině yz v závislosti na poloměru zakončení kolektoru.



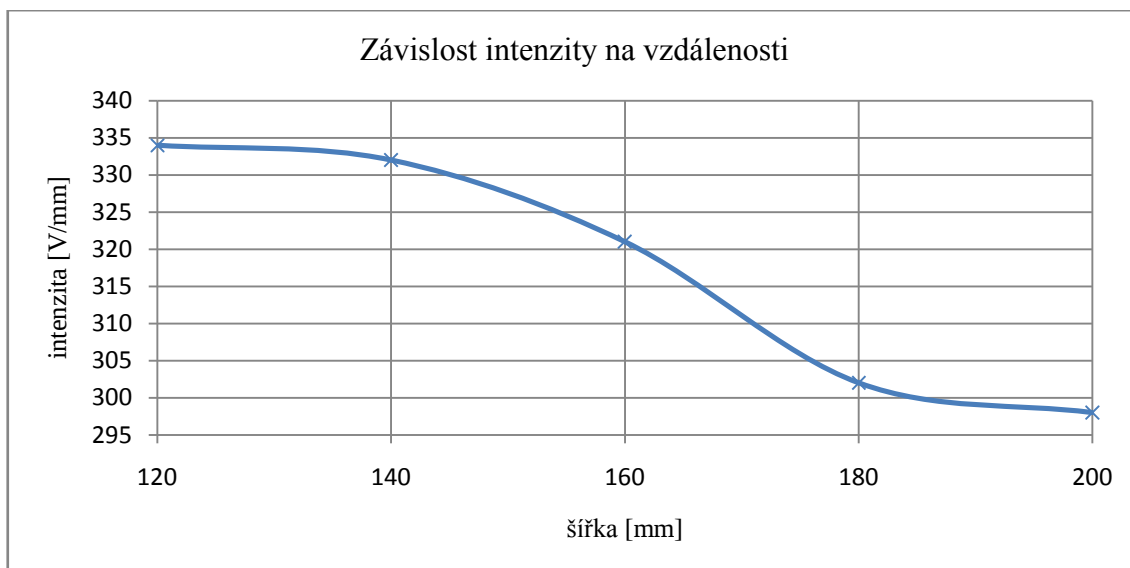
Graf 14: Porovnání průběhů intenzit pro různé poloměry zakončení kolektoru podél šířky v rovině xy.

Příloha 3: Změna šířky

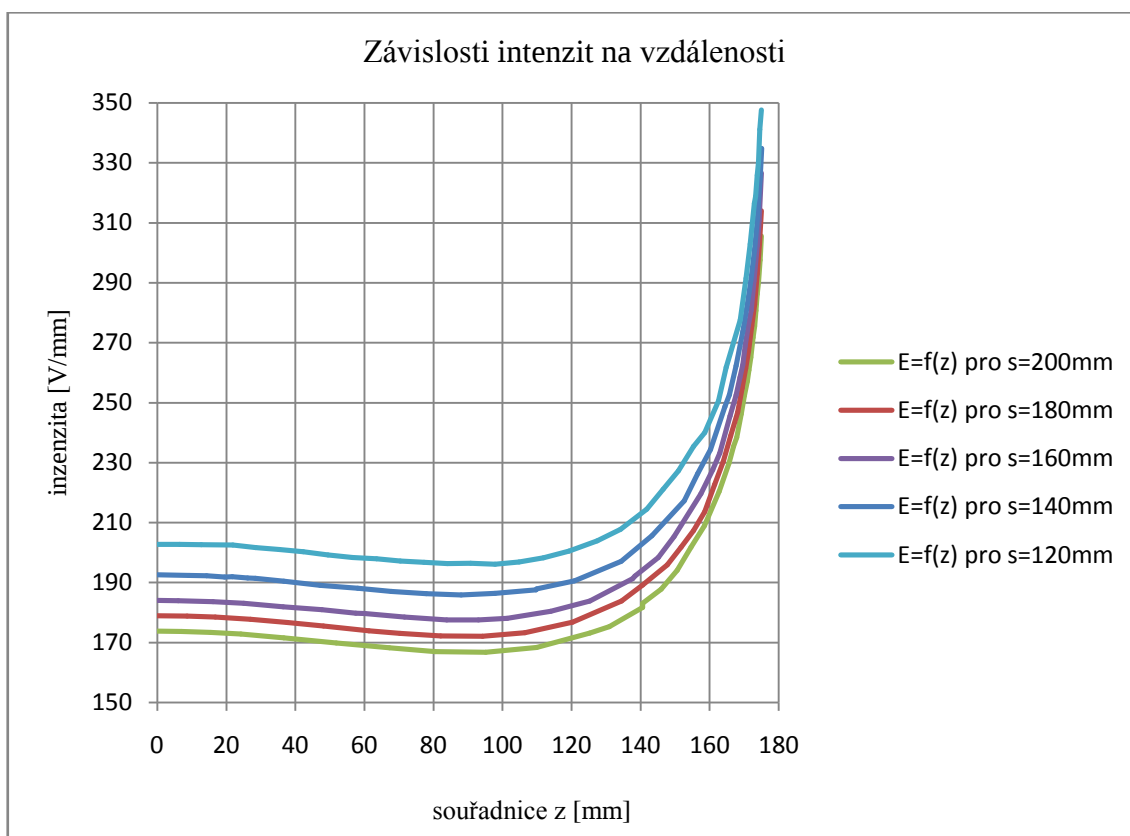
Graf 15: Průběh $E_{zvlák}$ v rovině yz v závislosti na šířce kolektoru.



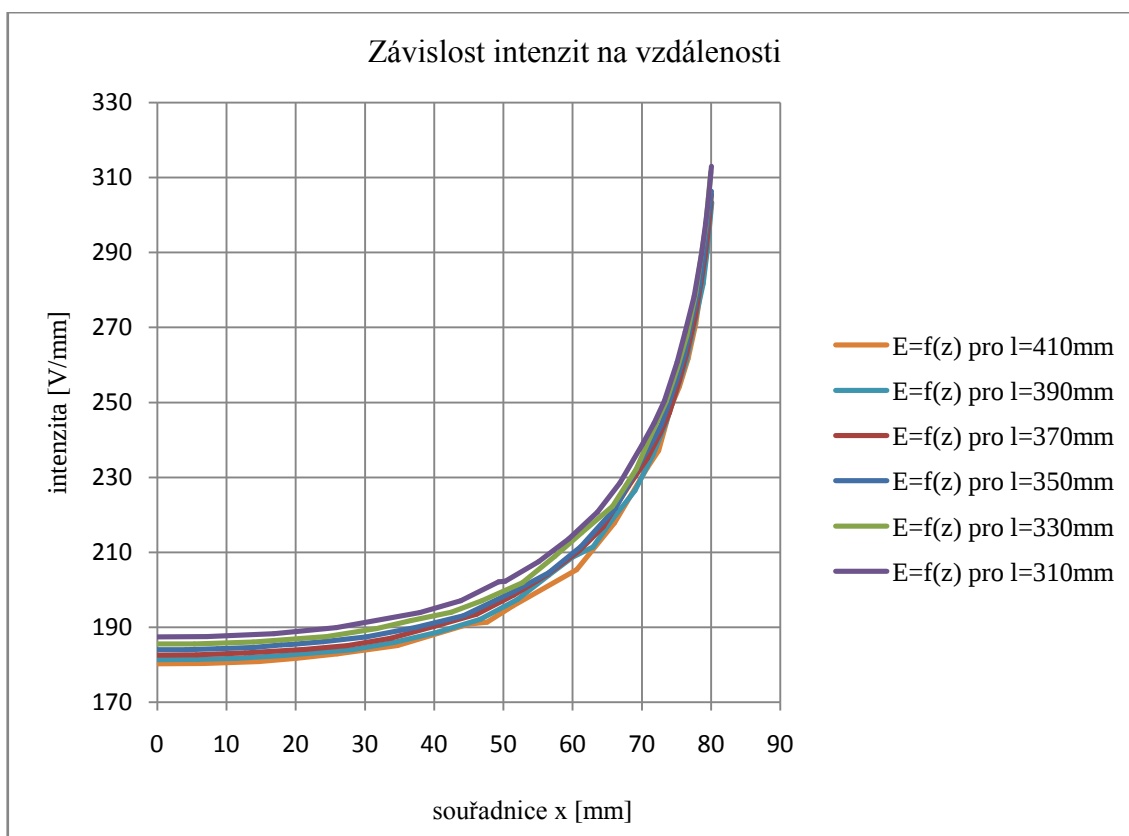
Graf 16: Průběh $E_{střed}$ v rovině yz v závislosti na šířce kolektoru.



Graf 17: Průběh $E_{zvlák}$ v rovině xy v závislosti na šířce kolektoru.

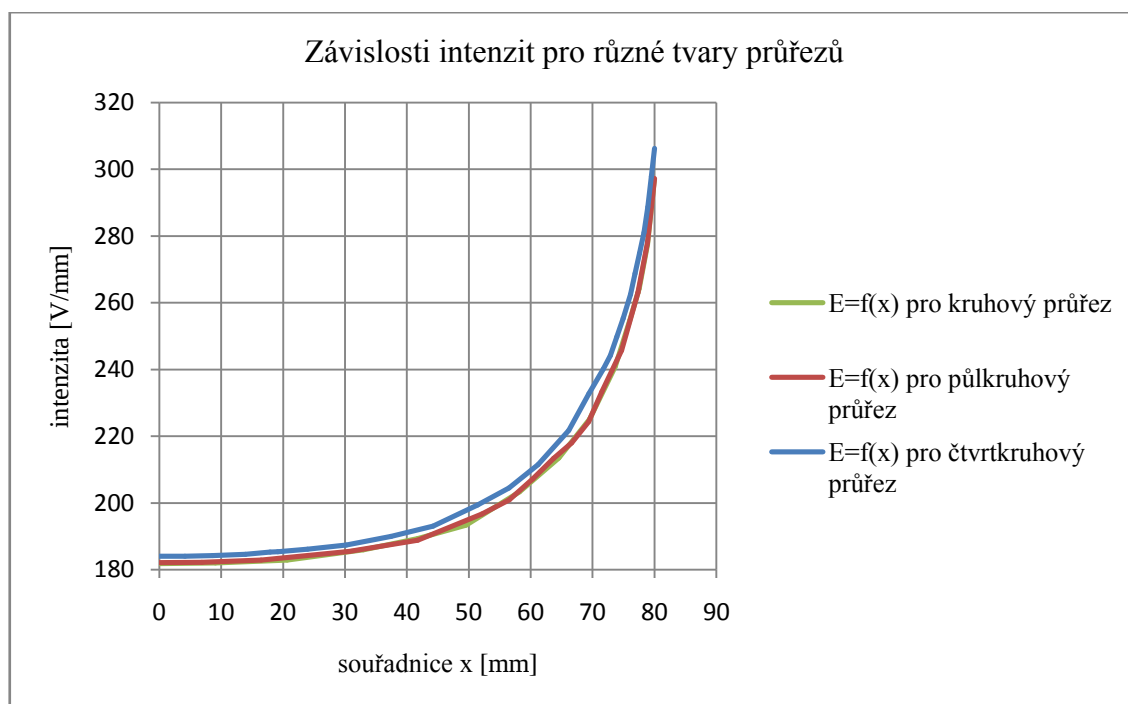


Graf 18: Porovnání průběhů intenzit pro různé šířky kolektoru podél délky v rovině yz.

Příloha 4: Změna délky

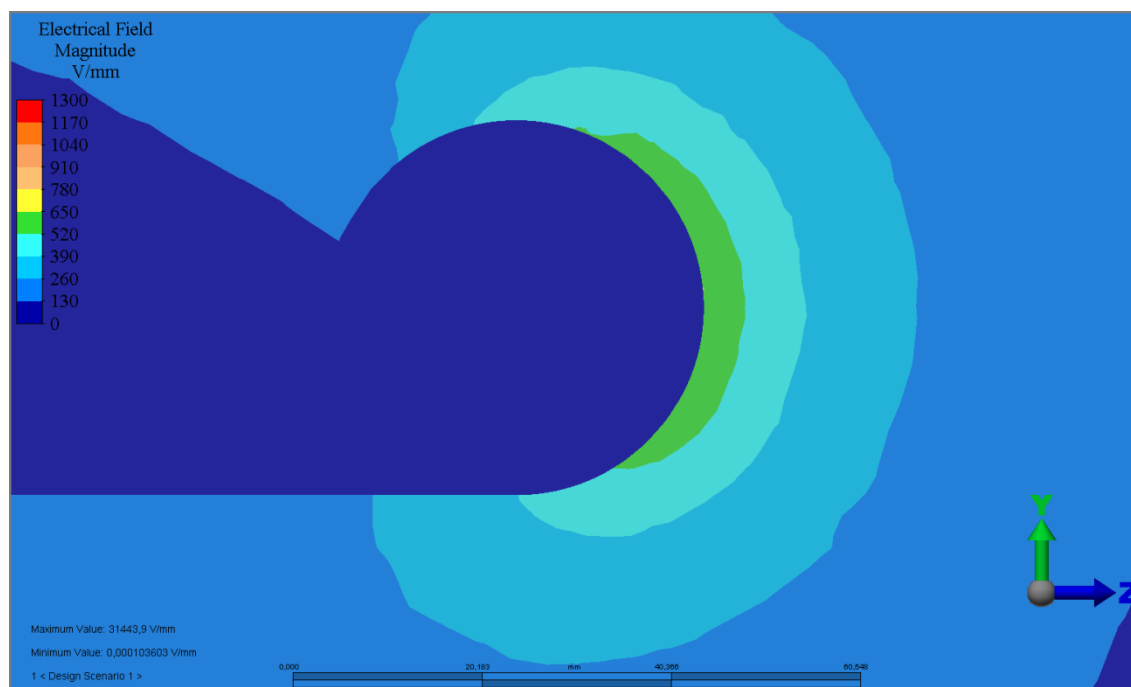
Graf 19: Porovnání průběhů intenzit pro různé délky kolektoru podél šířky v rovině xy.

Příloha 5: Změna tvaru průřezu

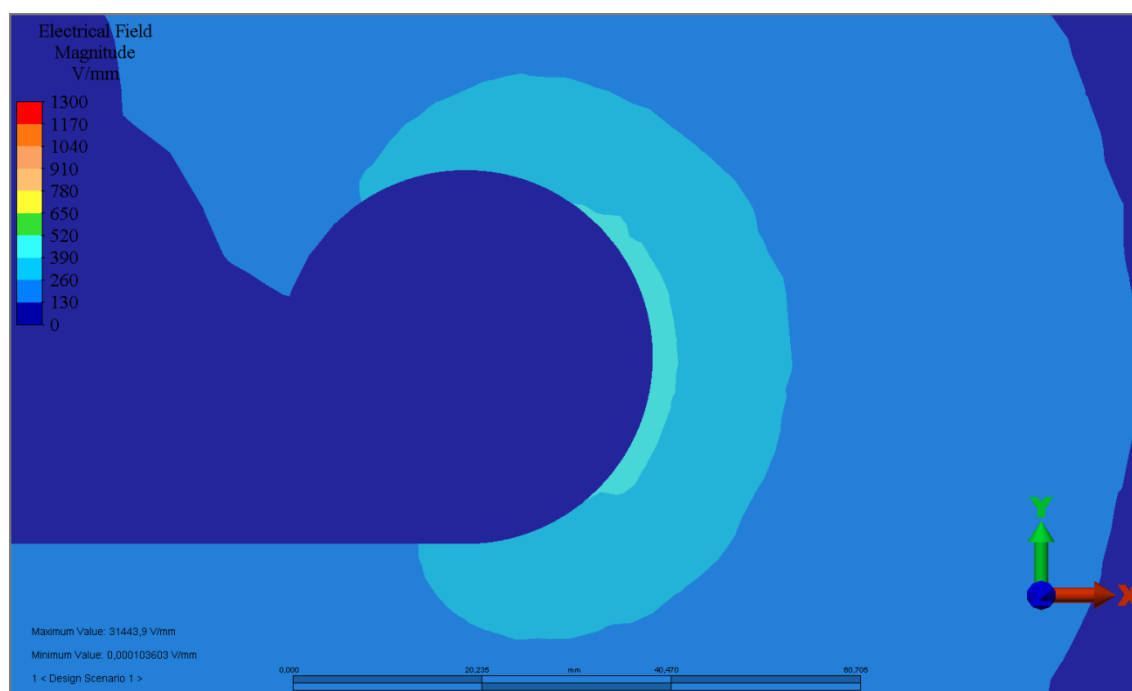


Graf 20: Porovnání průběhů intenzit pro různé průřezy zakončení podél šířky v rovině xy.

Příloha 6: Navržený kolektor



Obr. 18: Rozložení intenzity v okolí zakončení navrženého kolektoru v rovině yz.



Obr. 19: Rozložení intenzity v okolí zakončení navrženého kolektoru v rovině xy .

Příloha 7: Výkres desky kolektoru

Příloha 8: Výkres svařence kolektoru