



Diplomová práce

Zvlákňovací elektroda pro výrobu nanovláknenné stužky

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Miloš Licek

Vedoucí práce:

doc. Ing. Jan Valtera, Ph.D.

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Zvlákňovací elektroda pro výrobu nanovláknenné stužky

<i>Jméno a příjmení:</i>	Miloš Licek
<i>Osobní číslo:</i>	S22000238
<i>Studijní program:</i>	N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra textilních a jednoúčelových strojů
<i>Akademický rok:</i>	2024/2025

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši známých typů elektrod pro výrobu nanovláken ve střídavém elektrickém poli.
2. Proveďte analýzu elektrického pole zvolené elektrody pro výrobu nanovláknenné stužky.
3. Navrhněte optimální uspořádání elektrody pro kontinuální výrobu nanovláknenné stužky.
4. Vypracujte konstrukční návrh elektrody včetně výrobní dokumentace a případně experimentálně ověřte funkčnost navrženého zařízení.

Rozsah grafických prací: výkresová dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 45
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] LUKÁŠ, D. et al.: Physical principles of electrospinning (Electrospinning as a nano-scale technology of the twenty-first century) *Textile Progress* 41(2):59-140, June 2009, DOI: 10.1080/00405160902904641
- [2] LIN, Tong a Xungai WANG. *Needleless electrospinning of nanofibers: technology and applications*. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2014. ISBN 978-981-4316-35-4
- [3] Valtera, J. et al.: Fabrication of dual-functional composite yarns with a nanofibrous envelope using high throughput AC needleless and collectorless electrospinning, *Sci. Rep.* 9 (2019). doi:10.1038/s41598-019-38557-z
- [4] Manuál komerčního softwaru Ansys Electronics

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Valtera, Ph.D.
Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Konzultant práce: prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc., Ing. Ondřej Friedrich
Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Datum zadání práce: 1. ledna 2024

Předpokládaný termín odevzdání: 31. května 2025

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval/a samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom/a toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom/a následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

20. května 2024

Miloš Licek

Zvlákňovací elektroda pro výrobu nanovláknenné stužky

Anotace

Diplomová práce se zabývá návrhem nového zařízení pro výrobu lineární nanovláknenné struktury nazývané stužka ve střídavém elektrickém poli (AC electrospinning). Práce je zaměřena na konstrukční návrh lankové elektrody a optimalizaci prvků stínění intenzity elektrického pole v jejím okolí pro výrobu nanovláknenné stužky technologií AC electrospinning. V práci je představen konstrukční návrh laboratorního zařízení se svisle orientovanou lankovou elektrodou s předpokládanou délkou zvlákňovací oblasti 1000 mm. Byla provedena analýza elektrického pole v okolí lankové elektrody, zaměřená zejména na hledání ideální vzájemné polohy elektrody a stínících prvků. Dále bylo analýzou prověřeno, že elektroda bude zvlákňovat pouze v pracovní oblasti.

Klíčová slova

zvlákňovací elektroda, AC electrospinning, intenzita elektrického pole, nanovláknenná stužka

Spinning electrode for production of nanofibrous rowing

Annotation

The thesis deals with the design of a new device for the production of a linear nanofibrous structure called rowing in an alternating electric field (AC electrospinning). The thesis focuses on the structural design of the wire electrode and the optimization of the shielding of the electric field strength in its surroundings for the production of nanofibrous rowing by AC electrospinning. The work presents the structural design of a laboratory device with a vertically oriented wire electrode with an expected length of the working area of 1000 mm. An analysis of the electric field around the arc electrode was carried out, mainly focused on finding the ideal mutual position of the electrode and the shielding elements. It was also verified by the analysis that the electrode would only soften in the working area.

Keywords

spinning electrode, AC electrospinning, electric field intensity, nanofibrous rowing

Poděkování

Velké poděkování patří vedoucímu mé práce panu doc. Ing Janu Valterovi, Ph.D. za odbornou podporu při tvorbě práce, za věcné připomínky, a hlavně za čas, který mi věnoval. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Ondřeji Friedrichovi za připomínky ke konstrukci zařízení a výkresové dokumentaci.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Teoretická část	11
2.1	Výroba nanovláken.....	11
2.2	Technologie zvlákňování účinkem el. proudu	13
2.3	Fyzikální principy electrospinningu	15
2.4	Elektrody pro AC electrospinning	17
3	Koncept zařízení.....	22
4	Konstrukce zařízení	24
4.1	Sestava horní kladky.....	25
4.2	Sestava spodní kladky.....	26
4.3	Návrh pohonu	27
4.4	Konstrukce rámu.....	29
5	Simulace	30
5.1	Návrh geometrického uspořádání prvků ve zvlákňovací oblasti	30
5.1.1	Hledání funkcí s nejvyšší hodnotou gradientu.....	35
5.2	Simulace pracovní části lankové elektrody	39
5.3	Simulace dopravní části lankové elektrody	42
5.4	Simulace intenzity elektrického pole kolem elektrody v drážce kladky horní kladky 46	
6	Zhodnocení výsledků	48
7	Závěr.....	51
	Použitá literatura.....	51
	Seznam příloh	54

Seznam zkratek

AC	střídavý elektrický proud	
A_R	délkový poměr	m
l	délka	m
d	průměr	m
DC	stejnoseměrné elektrické zvlákňování	
E_{kr}	kritická intenzita elektrického pole	V/m
el.	elektrický	
F	síla	N
q	elektrický náboj	C
r	vzdálenost	m
E	veličina intenzity elektrického pole	V/m
ε	absolutní permitivita prostředí	F/m
v	rychlost	m/s
Z	délkový rozměr	m
U	napětí	V
U_{ampl}	amplituda napětí	V
t	čas	sec
T	perioda	1/sec
R	délkový rozměr	m
TUL	Technická univerzita v Liberci	
PUR	polyuretan	
i	převodový poměr	1
U_{ef}	efektivní napětí	V
h	konstanta vzdálenosti horizontálních os elektrody a stínění	m
a	parametr vzdálenosti vertikálních os elektrody a stínění	m
E-o	intenzita elektrického pole-obvod lankové elektrody měřený od jejího vrcholu	V/m
D	průměr stínícího řemene	m
φ	elektrický potenciál	V
d	průměr elektrody	m

1 Úvod

Hlavním úkolem této diplomové práce je konstrukce zvlákňovací elektrody, určené k výrobě polymerních nanovláken ve formě nanovláknenné stužky pomocí vysokého střídavého napětí (dále jen AC electrospinning).

Pro výrobu nanovláknenné stužky je využita technologie AC electrospinning, která umožňuje výrobu nanovláken z polymerního roztoku pomocí vysokého střídavého el. pole bez nutnosti použití elektricky aktivního fyzického kolektoru. To umožňuje vyrobená nanovláknena v okolí elektrody formovat do různých nanovláknenných struktur.

Nanovláknenná stužka je termín pro lineární strukturu tvořenou soudržným shlukem alespoň částečně orientovaných nanovláken, kterou je možné odvíjet a dále je zpracovávat, např. pro výrobu nanopříze.

Elektrody umožňující výrobu takovéto lineární struktury je nezbytné navrhnout tak, aby byla zajištěna tvorba nanovláken v určené rovině. Pro tyto účely je nezbytné vhodně modifikovat elektrické pole v okolí zvlákňovací elektrody. Návrh této elektrody je proveden za použití simulace intenzity elektrického pole metodou konečných prvků v softwaru ANSYS Electronics Desktop 2019.

Konstrukce zařízení se odvíjí od laboratorních pokusů provedených na katedře textilních a jednoúčelových strojů fakulty strojní TUL, kdy byla prokázána možnost tvorby stužky v důsledku úpravy elektrického pole elektrody. Při těchto krátkodobých testech se však objevila řada omezení, které se snaží tato práce odstranit.

Práce je svou strukturou rozdělena do tří základních oblastí. První část se věnuje rešerši střídavého elektrického zvlákňování tzv. AC electrospinning a elektrodám pro výrobu nanovláken touto technologií.

Druhá část práce popisuje navržený koncept zařízení a simulace elektrického pole v okolí lankové elektrody. Cílem je nalézt optimální rozložení intenzity elektrického pole kolem elektrody a stínících prvků v závislosti na geometrii jednotlivých prvků a použitým efektivním napětím. Dále jsou v této části ověřeny hodnoty maximální intenzity elektrického pole okolo částí elektrody, kde je zvlákňování nežádoucí.

Konstrukční návrh zvlákňovacího zařízení a popis jednotlivých konstrukčních uzlů je předmětem třetí části práce.

2 Teoretická část

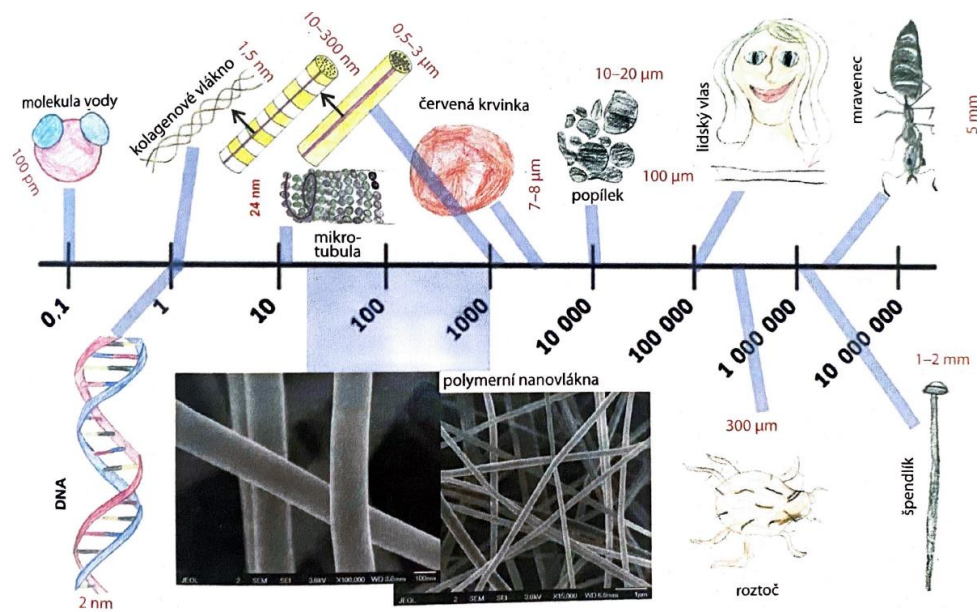
2.1 Výroba nanovláken

Pojem nanovláknem je dnes přijímán jako naprosto běžný, nicméně jeho definice není zcela jednoznačná. Skládá se ze dvou částí: nano-vyjadřující rozměr 10^{-9} , a vlákno – popisující útvar, jehož délka je výrazně větší než průměr. U textilních vláken je za typicky minimální délkový poměr A_R mezi délkou l a průměrem d je u textilních vláken považován poměr. [1]

$$A_R = \frac{l}{d} \geq 1000$$

Nanovláknem se pro své vlastnosti a aplikace dostávají i mimo textilní oblast, v některých případech se do konce vymykají z normy ISO/TS 80004-2:2015, která vymezuje oblast nanotechnologií a nanomateriálů. Podle této normy by měla mít nanovláknem průměr do 100 nm. Většina dnes používaných nanovláken nemusí splňovat tuto definici, ani podmínku na minimální délkový poměr v předchozí nerovnici. [1]

Pro nanovláknem se uvádí spíše následující definice: „Nanovláknem jsou obvykle válcovité struktury s vnějším průměrem pod 1000 nm a délkovým poměrem A_R větším než 50.“ V některých případech bývá průměr nanovláken vztažen i k vlnové délce viditelného světla (390–760 nm). Obr. 2.1 znázorňuje srovnání velikosti nanovláken vybranými známými předměty a částicemi. [1]



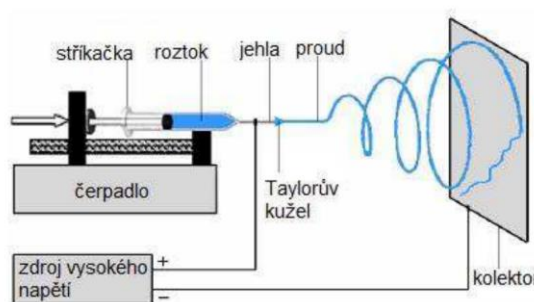
Obr. 2.1

Mravenec, špendlík, roztoč, lidský vlas, polétavý popílek, červené krvinky, kolagenové vlákno, mikrotubula DNA, molekula vody, včetně jejich obvyklých rozměrů ve srovnání s polymerními nanovlákný (snímek z elektronového rastrovacího mikroskopu elektricky zvlákněných polyakrylonitrilových nanovláken, měřítko 100 nm nalevo a 1000 nm napravo) [1]

2.2 Technologie zvlákňování účinkem el. proudu

Electrospinning nebo elektrostatické zvlákňování využívá energii elektrického pole pro výrobu nanovláken. Jde o nejrozšířenější a zatím nejefektivnější metodu výroby nanovláken.

V současnosti nejrozšířenějším typem elektrického zvlákňování je princip stejnosměrného zvlákňování (DC electrospinning) zobrazený na obr. 2.2, který spočívá je přivedení rozdílného potenciálu na elektrodu s polymerním roztokem a na kolektor. Ke kolektoru bývá přivedeno záporné napětí, nebo je rovno nule. Kolektor zpravidla bývá opatřen systémem odvodu vyrobeného nanovláknenného materiálu, kterým zpravidla bývá odvíjena netkaná textilie, na kterou je vrstva nanášena. [1, 2]



Obr. 2.2 *Princip stejnosměrného zvlákňování z jehlové elektrody a deskového kolektoru [2]*

Tab. 2.1 *Přehled technologií elektrického zvlákňování [1]*

Název technologie	Popis
DC electrospinning	
stejnosměrné elektrické zvlákňování či elektrické zvlákňování stejnoměrným proudem: jehlové (<i>needle electrospinning</i>) či tryskové (<i>multiplejet electrospinning</i>), bezjehlové elektrické zvlákňování či zvlákňování z volné hladiny (<i>needleless electrospinning</i>)	elektrické zvlákňování pomocí stejnoměrného proudu vyžaduje elektricky aktivní kolektor
AC electrospinning	
střídavé elektrické zvlákňování či elektrické zvlákňování střídavým proudem	elektrické zvlákňování pomocí střídavého proudu, nevyžaduje elektricky aktivní kolektor
electroblowing	

elektrické rozfukování polymerních roztoků	elektrické zvlákňování stejnoměrným proudem kombinované s aplikací proudícího vzduchu (s možností změny teploty) kolem trysek
bubble electrospinning	
elektrické zvlákňování z bublin	elektrické zvlákňování stejnoměrným proudem z pěny či z bublin polymerního roztoku
solvent-free electrospinning	
elektrické zvlákňování bez použití rozpouštědel	rozpouštědlem může být: superkriticky CO ₂ (tedy CO ₂ nad kritickou teplotou a tlakem, kdy je ve formě kapaliny) nebo <i>UV-curing electrospinning</i> (monomery bez rozpouštědel jsou elektricky zvlákňovány UV zářením v interní atmosféře) nebo <i>Anion-curing electrospinning</i> či <i>thermo-curing electrospinning</i> atd.
coaxial electrospinning	
koaxiální elektrické zvlákňování	produkce pomocí elektrického zvlákňování z kombinované koaxiální trysky či pomocí přeplovací zvlákňovací elektrody
triaxial electrospinning	
triaxiální elektrické zvlákňování	zvlákňování z triaxiální trysky
melt electrospinning	
elektrické zvlákňování z taveniny	elektrické zvlákňování z taveniny polymeru
wet electrospinning	
elektrické zvlákňování do kapalného kolektoru	pevná kolektor je nahrazen hladinou, respektive objemem kapalinového rezervoáru
vibration – electrospinning	
vibrační elektrické zvlákňování	elektrické zvlákňování z roztoků i tavenin s použitím ultrazvuku působícího na zvlákňovanou kapalinu in-situ pro snížení její viskozity
magneto-electrospinning	
magneto-elektrické zvlákňování	přídavek působení magnetického pole k procesu elektrického zvlákňování

Dominantní technologií pro výrobu nanovláken je v současnosti zvlákňování účinkem stejnosměrného elektrického napětí (DC Electrospinning) a významně se rozvíjející technologie zvlákňování pomocí střídavého elektrického napětí (AC Electrospinning). Obě technolo-

gie jsou v současné době dále rozvíjeny, přičemž vznikají zařízení s různými typy elektrod, pro různé materiály a vyrábí se vlákna se specifickými vlastnostmi pro speciální aplikace.

Princip zvlákňování je založen na vybuzení tzv. nadkritické intenzity elektrického pole E_{kr} . Tato hodnota významně závisí na použitém polymerním roztoku, vlastnostech prostředí a dalších parametrech. Pro potřeby této práce byla hodnota E_{kr} experimentálně stanovena jako:

$$E_{kr} = 3kV/mm$$

Po překročení E_{kr} dochází k nabourání silové rovnováhy a způsobení lokálního zvýšení elektrického tlaku nad hodnotu tlaku kapilárního, čímž dojde k hydrodynamické nestabilitě v podobě polymerních trysek, z nichž se vytváří po odpaření rozpouštědla polymerní nanovlákna.

2.3 Fyzikální principy electrospinningu

Electrospinning je elektro-hydrodynamický proces, při němž vznikají nanovlákna za pomoci elektrické síly. Tento proces je aplikovatelný pouze na polymery v kapalném skupenství, tedy ve formě polymerního roztoku, nebo taveniny. Proces zvlákňování je dynamický jev a jeho parametry mají velký vliv na vlastnosti vzniklého nanomateriálu. Významné jsou elektrické vlastnosti materiálu, povrchové napětí, viskozita roztoku, rozpustnost polymerů, rychlost vypařování polymerního roztoku. [3, 4]

Celý proces je vybuzen silovým působením elektrického pole ve zvlákňovacím prostoru. Elektrickou sílu mezi dvěma bodovými náboji popisuje Coulombův zákon. [4]

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Kde F je síla elektrického pole vyvolaná mezi dvěma bodovými náboji, q je elektrický náboj, ϵ představuje absolutní permitivitu prostředí a r je vzdálenost mezi dvěma bodovými náboji. [4, 5]

Pro popis elektrických polí okolo reálných objektů lze zavést veličinu E (intenzita elektrického pole). Je to vektorová fyzikální veličina vyjadřující velikost a směr elektrického pole, která popisuje silové působení elektrického pole na bodový náboj. Je definována jako

podíl elektrické síly F , která působí v tomto místě na kladný bodový náboj (nebo by působila), a velikosti tohoto náboje q . [4, 6]

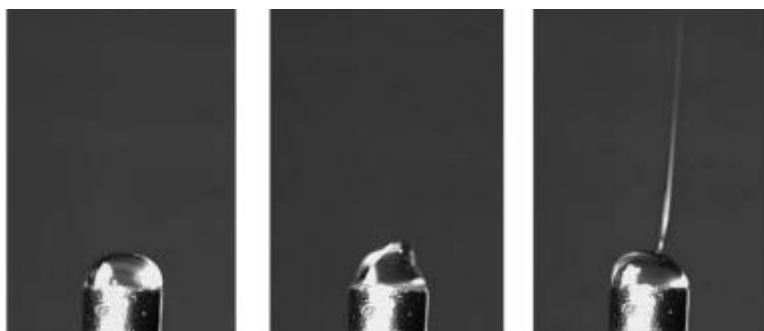
$$E = \frac{F}{q}$$

Do tohoto vztahu je možné dosadit vztah pro výpočet elektrické síly z Coulombova zákona – potom je velikost intenzity v daném bodě přímo úměrná velikosti náboje a nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti tohoto místa od náboje, a zároveň závisí i na prostředí. [4, 6]

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} * \frac{q}{r}$$

Elektrické pole dvou bodových nábojů lze snadno popsat pomocí Coulombova zákona, nicméně v případě vzájemného popisu více nábojů, nebo působení reálných těles je vhodnější zvolit pro popis interakcí potenciál elektrického pole E . [4]

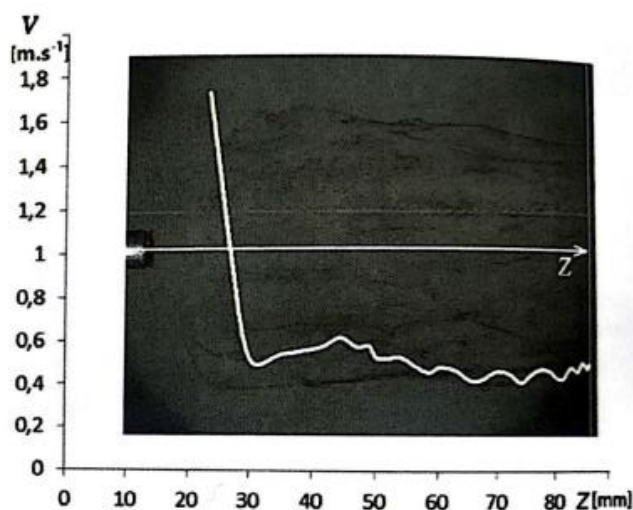
Electrospinning vyžaduje přítomnost elektrického pole tvořeného stejnosměrným, nebo střídavým napětím. Elektrické zvlákňování je založeno na tom, že rozdíl potenciálů, musí vybudit na hladině zvlákňované kapaliny, nejčastěji polymerního roztoku, nadkritickou hodnotu intenzity elektrického pole E . Ta způsobí lokálně zvýšenou hodnotu elektrického tlaku nad hodnotu kapilárního tlaku, který je důsledkem povrchového napětí a křivosti kapalinového tělesa. Tím se vytvoří hydrodynamická nestabilita, jež vede k tvorbě polymerních trysek viz obr. 2.3, z nichž se vytáhnou vlákna, která po odpaření rozpouštědla, nebo po zchlazení taveniny získají svůj finální tvar. [1, 4]



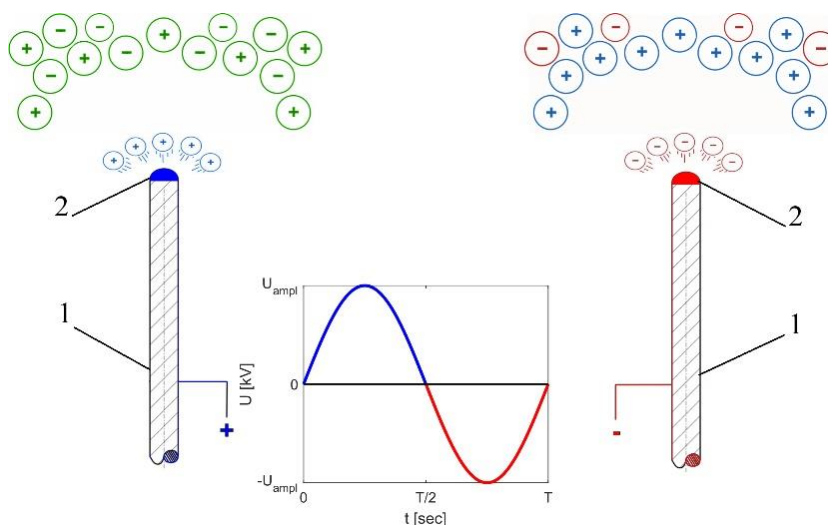
Obr. 2.3 *Tvorba trysky působením elektrostatického pole [7]*

2.4 Elektrody pro AC electrospinning

Způsob zvlákňování účinkem střídavého proudu byl vyvinut na Technické univerzitě v Liberci v roce 2012. Podstatou této metody je ionizování vzduchu či jiného plynu v okolí zvlákňovací elektrody. Elektrické pole se tak vytváří mezi elektrodou a ionty plynu vytvořenými v okolí elektrody, které jsou v důsledku střídání polarity proudu odtlačovány dalšími nově vzniklými ionty. V důsledku tohoto chování pozorujeme v okolí elektrody jev nazývaný elektrický vítr. Ten se projevuje prouděním vzduchu v okolí elektrody. Obr. 2.4 ukazuje, že rychlost elektrického větru se vzdáleností od vrcholu elektrody prudce klesá až do určitého místa, vzdáleného přibližně 30 mm, ve kterém klesá derivace rychlosti přibližně na nulu. Toto místo se označujeme jako virtuální kolektor. Vzniklá nanovlákna se působením elektrostatických sil shlukují do lineárního útvaru a pohybují se prostorem ve směru gradientu elektrického pole. [1, 8]



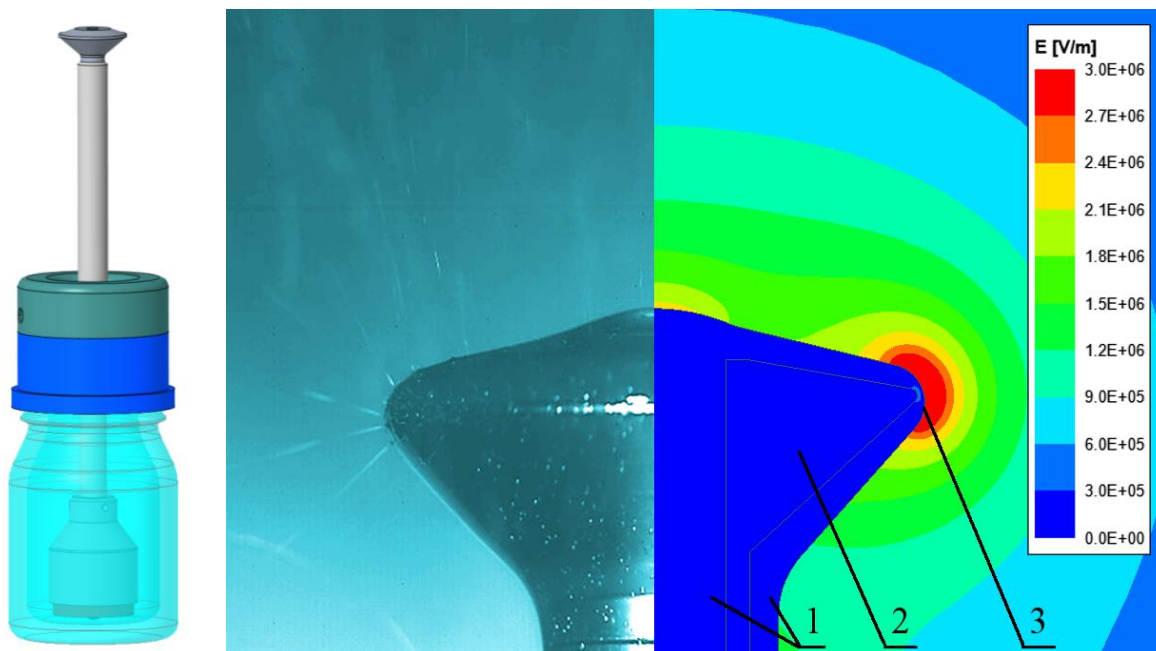
Obr. 2.4 Graf hodnot rychlostí v závislosti na souřadnici osy měřené od vrcholu zvlákňovací elektrody [1]



Obr. 2.5 *Ilustrační popis vytváření rozdílů elektrického potenciálu mezi elektrodou a jejím okolím při procesu AC zvlákňování. Tyčová elektroda (1), polymerní kapka (2) [1]*

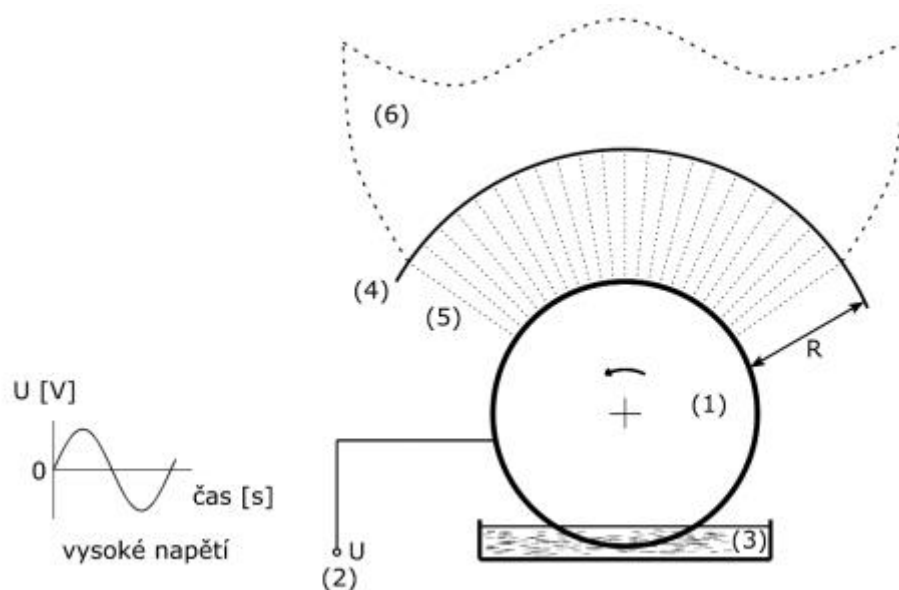
Příklad tyčové elektrody (1) s polymerní kapkou (2) na jejím vrcholu připojenou ke střídavému zdroji vysokého napětí se sinusovým signálem je zachycen na obr. 2.5. V levé části je zachycena elektroda po startu, kdy se z jejího povrchu emitují kladně nabitě částice do elektricky neutrálního okolí vzduchu. V pravé části je zachycena elektroda po přepólování, kdy jsou emitovány záporně nabitě ionty do okolí, v němž převažují opačně nabitě částice z předchozí fáze signálu. [1]

Z důvodu pravidelné změny polarity elektrod může docházet usazování vláken s nižší kinetickou energií zpět na povrch elektrody. Z tohoto důvodu je třeba povrch elektrod na zvlákňovací části a jeho okolí čistit. Pro AC electrospinning se tak uplatnili tzv. přeplavovací tyčové elektrody, viz obr. 2.6 vlevo. Jedná se o tyčovou elektrodu, jejíž dutinou se dopravuje polymerní roztok do zvlákňovací části, odkud gravitačně stéká zpět do zásobníků. Pro dlouhodobý provoz je tak nutné dávkování většího množství roztoku, než které se zvlákne na horní zvlákňovací části. Hlava přeplavovací elektrody s vyznačenou zvlákňovací oblastí s nadkritickou intenzitou elektrického pole je zobrazena na obr. 2.6 vpravo. [1]



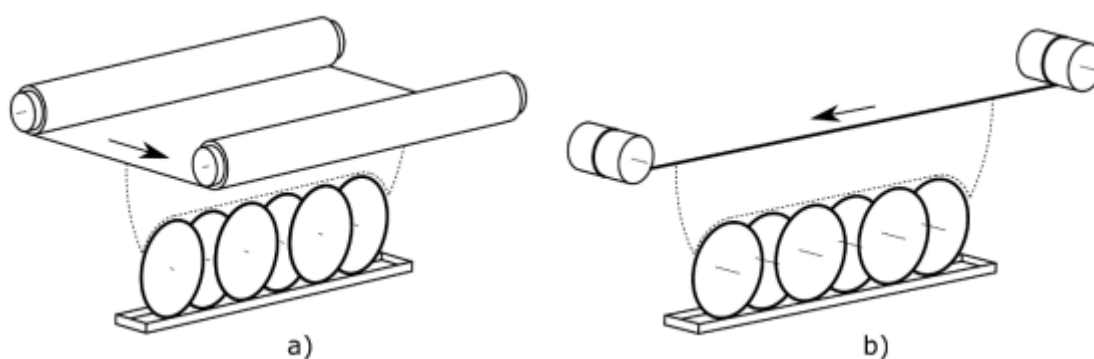
Obr. 2.6 *Přeplavovací elektroda, přívodní kanál polymerního roztoku (1), hlava přeplavovací elektrody (2), zvlákňovací oblast s nadkritickou intenzitou E (3) [1]*

Příkladem další pohyblivé zvlákňovací elektrody je rotační disková elektroda, která je částečně ponořena ve zvlákňovacím roztoku a svým pohybem vynáší do zvlákňovací oblasti tenkou vrstvu polymeru, kde dochází k jeho zvlákňování. Na obr. 2.7 je schematicky znázorněna disková AC elektroda. [7]



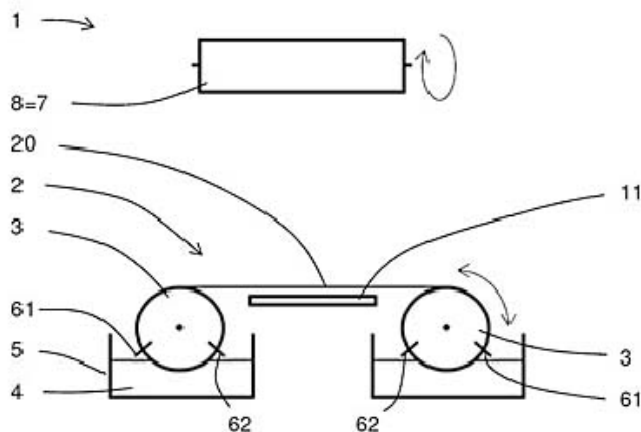
Obr. 2.7 Schematické znázornění tvorby nanovlákněné vlečky na diskové elektrodě. zvláknovací elektroda (1), připojení vysokého střídavého napětí (2), roztok polymeru (3), virtuální kolektor (4), oblast s vysokou rychlostí vláken (5), propojená nanovlákněná vlečka (6) [7]

Na obrázku obr. 2.8 jsou uvedené konfigurace více-diskové AC elektrody pro laboratorní výrobu plošné vrstvy a výrobu lineární nanovlákněné struktury, např. kompozitní nanovlákněné příze.



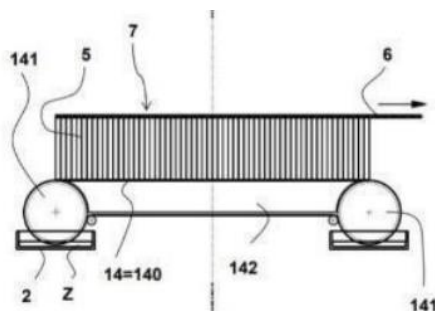
Obr. 2.8 Schematické znázornění vícediskové konfigurace pro tvorbu plošné nanovlákněné struktury (a), pro tvorbu lineární nanovlákněné struktury (b) [7]

S cílem dále zvýšit produktivitu a příčnou stejnoměrnost nanovlákněné membrány byla vyvinuta lanková AC elektroda. Jedná se lankovou elektrodu převíjenou pomocí kladek. Elektroda může být v provedení s nekonečným lankem a kontinuálním převíjením nebo s vratným převíjecím pohybem, kdy je zásoba lanka ukládána na kladce se spirálovitou drážkou viz obr. 2.9 [9]



Obr. 2.9 Lanková AC elektroda dle zveřejněné přihlášky 2021-69 [9]

Podle patentu CZ 2022 – 248 A3, ve kterém je popsán způsob výroby nanovláken pomocí diskové a převíjené lankové elektrody viz obrázek 2.10, jejíž kladky jsou smáčeny v roztoku a její pracovní část je vhodně stíněna pomocí stacionárních tyčí nabitých shodně s elektrodou, je možné vytvářet nanovlákná z elektrody ve formě lanka nebo pásku, která jsou vytvářena pouze částí obvodu elektrody a vytváří plošný nanovlákněný útvar. Nanovlákná jsou vytahována z trysek na elektrodě do oblasti virtuálního kolektoru, kde ztrácí většinu své kinetické energie a pokud jsou tahovou silou odebrána ve směru osy lankové elektrody, pak vytváří lineární útvar nanovláken nazývaný stužka. [10]



Obr. 2.10 Schematický obrázek lankové elektrody z patentu CZ 2022-248 A3 [10]

3 Koncept zařízení

Na základě provedené rešerše byla zvolena pro zařízení na výrobu nanovlákněné stužky elektroda s převíjeným lankem doplněným vhodnými prvky pro stínění elektrického pole.

Tato část práce se zabývá návrhem lankové elektrody, která by byla schopna vytvářet nanovlákněný útvar tzv. stužku. Na základě dosažených poznatků v této oblasti vznikly některé požadavky na novou elektrodu.

Podle laboratorních pokusů provedených na TUL má dosavadní uspořádání lankové elektrody několik funkčních nedostatků.

1. Při provozu laboratorního zařízení s převíjenou lankovou elektrodou se ukázalo, že stacionární stínící tyče jsou zanášeny nanovláknem, to vede ke ztrátě jejich funkce a přináší zdlouhavý proces čištění po ukončení provozu. Vhodným a ověřeným způsobem (např. u jedno i více stupňové přepřelavovací elektrody) čištění funkčních částí elektrod je jejich omývání v polymerním roztoku. Obsažená rozpouštědla v roztoku jsou schopna rozpouštět již vzniklá vlákna.
2. U laboratorního zařízení se vyskytl také problém, který způsobuje rozdílná hmotnost stužky podél elektrody. Vzhledem k tomu, že vytvářená stužka ve virtuálním kolektoru je odvíjena jedním směrem, je na počátku méně hmotná než na jejím konci. Tím dochází k nárůstu gravitační síly. Dochází k tomu, že hmotnost stužky v její hmotnější části je příliš vysoká na to, aby ji síla elektrického větru nadále udržela nad elektrodou a hrozí ztráta polohy stužky ve virtuálním kolektoru a její přilepení k povrchu elektrody. Takový stav je nežádoucí a je nutné, aby nová elektroda tento problém eliminovala.
3. Pro zahájení procesu výroby nanovlákněné stužky je nutné z plošné vlečky nanovláknem, která začne po nastartování procesu vznikat nad elektrodou odtahovat vlákna ve směru osy elektrody (tedy horizontálně). Proto bylo u laboratorního zařízení nutné ručně pomocí izolované tyče zachytit nově vznikající nanovláknem, začít je odtahovat a spojit je s volným koncem připravené stužky na odtahovém zařízení. Po připojení pak odtahové zařízení vnáší do stužky tahovou sílu a proces výroby stabilně probíhá. Je však zřetelná nevýhoda ručního zavádění spočívající v zajištění požadovaného tahu.

Cílem práce je navrhnout zařízení schopné kontinuální výroby nanovlákněné stužky z lankové elektrody tak, aby konstrukce eliminovala výše uvedené nedostatky pozorované při předchozích testech na laboratorních zařízeních

Při návrhu zařízení je primárně požadována technologická funkčnost zařízení, je brán zřetel na bezpečnost obsluhy, snadnou demontáž k čištění, snadnou změnu geometrie součástí, kompaktní konstrukce. Snadná demontáž je poměrně zásadním požadavkem kvůli nutnosti čištění po každém provozu. Proto je zařízení navrženo tak, aby se dalo demontovat s minimálním počtem nástrojů a bylo při tom povolováno minimum šroubů.

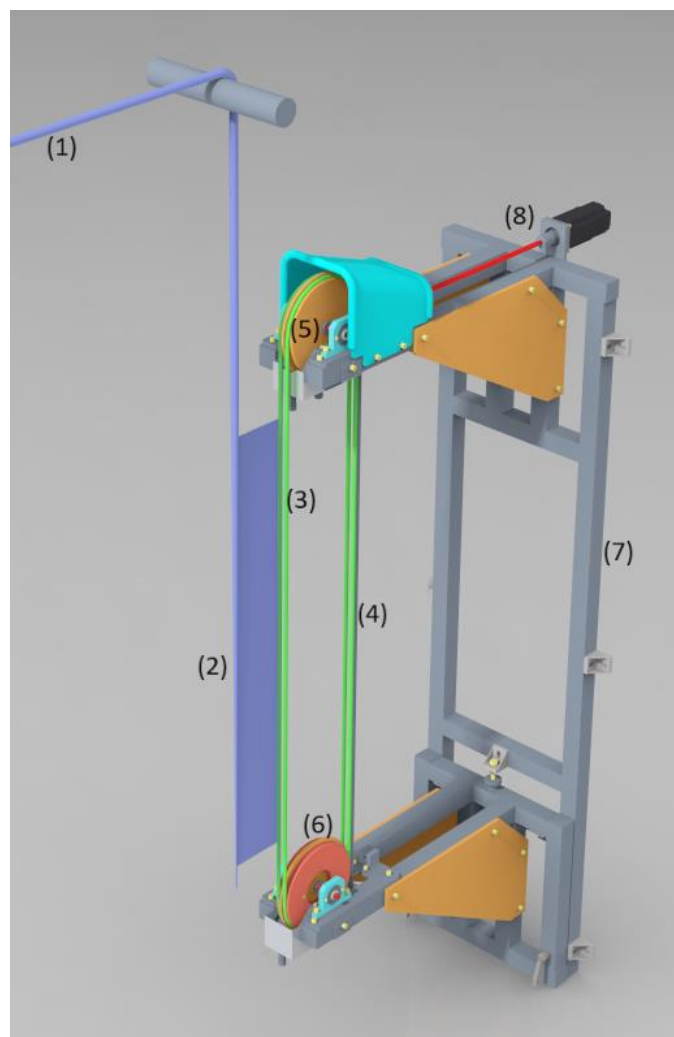
Lanková elektroda je koncipována jako nekonečná smyčka z drátku napnutého mezi dvěma kladkami, z nichž jedna je poháněná motorem. Lanko je ve své spodní části smáčeno v polymerním roztoku, na který je přivedeno vysoké napětí. V důsledku působení střídavého elektrického pole a vysoké prostorové křivosti lanka je dosaženo v těsném okolí zvláknovací části lankové elektrody nadkritické intenzity elektrického pole E_{kr} a z polymerního roztoku se začnou vytvářet trysky polymerních vláken. Laboratorní zařízení ukázalo, že je možné vhodným umístěním dvou nabitých kovových tyčí odstínit část obvodu lanka tak, že nadkritická intenzita elektrického pole se objeví jen na určité části povrchu elektrody.

Stínící ocelové stacionární tyče byly velmi rychle zanášeny. Pokud by byly stínící tyče nahrazeny řemeny odvíjejícími se společně s elektrodou, bude zaručeno, že vlákna ulpívající na povrchu stínících elementů budou opět rozpuštěna v polymerním roztoku, kterým se budou smáčet jak elektrody, tak i stínící řemeny. Vzhledem k zaručené elektrické vodivosti roztoku, který je nanášen na stínící řemen, nemusí být řemen z vodivých materiálů. Z tohoto důvodu je navržen PUR kruhový řemen o průměru 8 mm jako stínící prvek.

U horizontální lankové elektrody se ukázalo, že při odvíjení vyrobené nanovlákněné stužky vzniká problém s její narůstající hmotností podél osy elektrody, který by mohl vést v krajních případech i k spadení stužky samotnou elektrodou. Zařízení v horizontální poloze je tudíž limitováno délkou lankové elektrody a výrobním výkonem. Pokud bude osa elektrody ve svislém směru, bude pak tahová síla působit proti směru gravitačního pole ve směru osy elektrody a přestane existovat riziko kontaktu nanovlákněné stužky s elektrodou.

4 Konstrukce zařízení

Bylo navrženo zařízení viz obrázek 4.1 pro výrobu nanovláknenné stužky (1), která vzniká v oblasti virtuálního kolektoru (2) z vláken, která do něj putují ze zvlákňovací větve elektrody (3). Druhá větev elektrody musí být navržena tak, aby nezvlákňovala. Zařízení s lankovou elektrodou a dvojicí stínících řemenů napnutých mezi dvě kladky (5,6) tak, že osy přímých větví lankové elektrody jsou svislé tzn. kladky jsou nad sebou, je poháněno krokovým motorem NEMA 23 (8). Obě kladky je nutné smáčet v polymerním roztoku tak, aby byla zaručena čistící funkce všech funkčních ploch a zároveň aby bylo zaručeno nanosení definované vrstvy polymerního roztoku na povrch lankové elektrody. K nanosení požadované vrstvy slouží stírátko, která v případě dolní kladky kopírují reliéf kladky včetně elektrody a stínících řemenů, a v případě horní kladky kopírují pouze reliéf kladky. Mezera mezi stírátkem a kladkou definuje vrstvu polymeru, která je nanosena na elektrodu a zabraňuje viskóznímu roztoku, aby se na kladku nanosil v příliš velké vrstvě. Velké množství roztoku na kladce by v procesu zvlákňování mohlo znamenat stékání a tvorbu kapek na kladce. Kapka by mohla vytvářet vlivem prostorové křivosti lokální místa s nadkritickou intenzitou elektrického pole, ve kterých by mohly vznikat polymerní trysky a vytvářet vlákna v nežádoucích místech. Rám zařízení (7) je tvořen kombinací vodivých a nevodivých profilů. Je koncipován tak, aby bylo možné nastavit nasazením různých délek lankových smyček různé šířky zvlákňovacích oblastí.

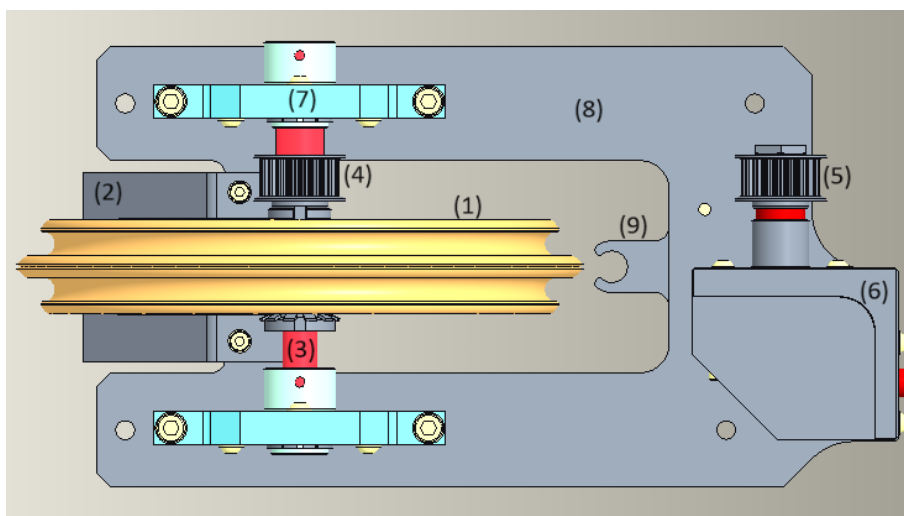


Obr. 4.1 *Model zvláknovací elektrody s popisky, nanovláknenná stužka (1), tvorba stužky ve virtuálním kolektoru (2), pracovní větev elektrody (3), dopravní větev elektrody (4), horní (hnací) kladka (5), spodní (napínací) kladka (6), rám (7), pohon motorem (8)*

4.1 Sestava horní kladky

Horní kladka (1) na obrázku 4.2 byla zvolena jako hnací, přenos momentu mezi hřídelí (3), kladkou a řemenicí (4) je zprostředkován perem. Kladka i řemenice jsou axiálně zajištěny na hřídeli KM maticí s MB podložkou. Hřídel je zasazena do ložiskových domků (7), ve kterých se po vložení zajistí utažením červíků. Ložiskové jsou usazeny na kolíkách, které zajistí po každém rozebrání k čištění, nebo k jiným úpravám vždy totožnou polohu kladek na výrobním zařízení, aby byla zajištěna opakovatelnost polohového nastavení při výrobě nanovláknenných struktur. Horní kladka v obou ložiskových domcích je tedy kolíky usazena v ocelové desce tvaru U (8), která usazuje v jednoznačně definovaných polohách kladku, všechny sou-

částky (ložiskové domky (7), převod (6), držáky stínící tyče (9), stírátko (2), apod.) připevněné k rámu.



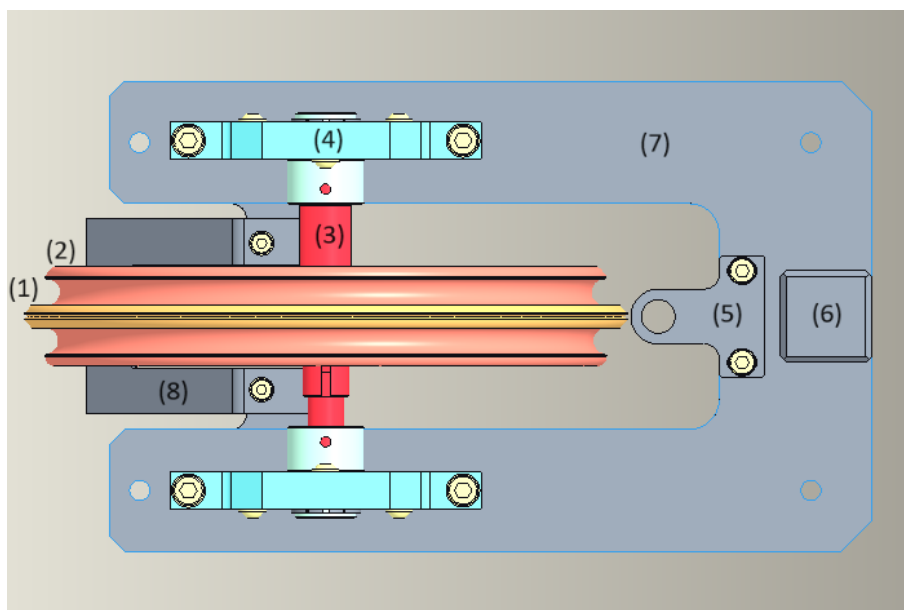
Obr. 4.2 *Sestava horní kladky s popisem součástí, (1) horní kladka, (2) stírátko horní kladky, (3) hřídel, (4) ozubená řemenice hnaná, (5) ozubená řemenice hnací, (6) úhlový převod s kuželovým ozubením, (7) ložiskový domek, (8) montážní deska, (9) držák stínící tyče*

4.2 Sestava spodní kladky

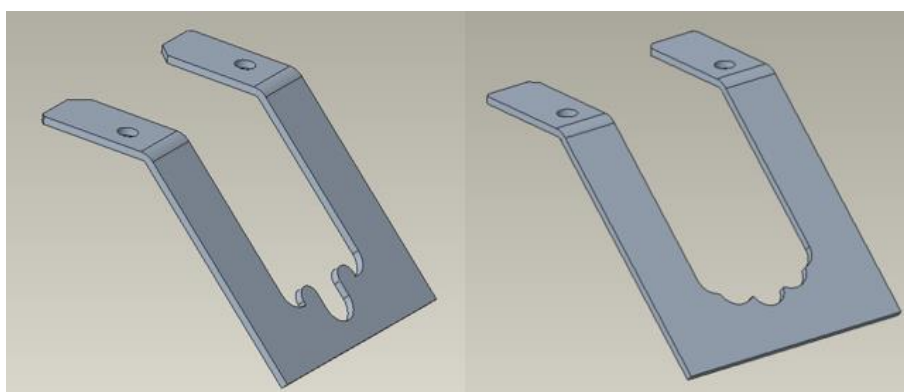
Spodní kladka na obrázku 4.3 splňuje funkci napínání lanka a stínících řemenů. Kladka je tvořena ze 3 částí. Drážka pro řemen je vyrobena na dvou samostatných řemenicích (2), které se šroubují z obou stran kladky (1). Je tak umožněno při výrobě nanovláken rozšířit rozteč mezi řemeny přidáním podložek mezi kladku a řemenice. Taková úprava umožní testovat výrobu vláken s proměnným elektrickým polem podél osy elektrody. Kladka je axiálně upevněna na hřídeli pomocí KM matice s MB podložkou. Hřídel (3) je vložena do ložiskových domků (4) a zajištěna červíky. Ložiskové domky jsou usazeny kolíky a šrouby dotaženy ocelové montážní desce (7). Na montážní desku je připevněno šroubky stírátko (8), držák stínící tyče (5) a kostka pro přívod vysokého napětí (6).

Na obrázku 4.4 jsou zobrazena obě stírátká, která jsou používána v zařízení. Stírátko horní kladky kopíruje vnější profil kladky bez elektrody a řemenů obrázků Obr. 4.4 vlevo. Slouží k nanesení definované tloušťky polymerního roztoku, ale zejména proti ulpívání příliš velkého množství viskózního roztoku na kladce během její rotace. Stírátko spodní kladky kopíruje spodní kladku včetně lankové elektrody a stínících řemenů s definovanou mezerou. Její

funkce je nanést na elektrodu a řemeny požadovaný film polymerního roztoku viz obrázek 4.4 vpravo.



Obr. 4.3 *Sestava spodní kladky s popisem součástí, (1) spodní lanová kladka (2) dvojice řemenic připevněných k lanové kladce z obou stran, (3) hřídel, (4) ložiskový domek, (5) držák, stínící tyče, (6) kostka s otvorem na konektor zdroje vysokého napětí, (7) montážní deska, (8) stírátko spodní kladky*

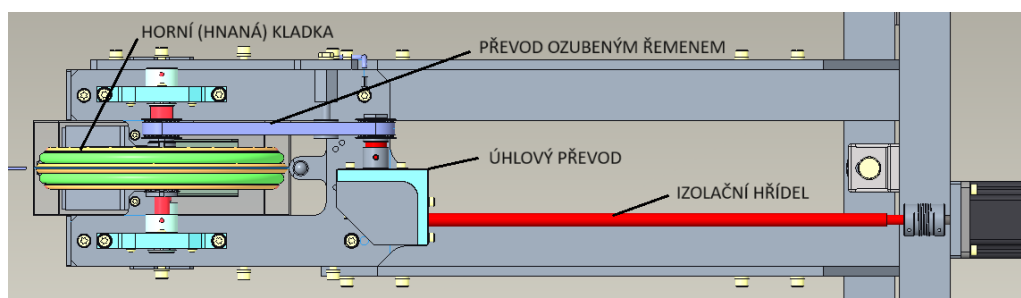


Obr. 4.4 *Stírátko horní kladky VLEVO, stírátko horní kladky VPRAVO*

4.3 Návrh pohonu

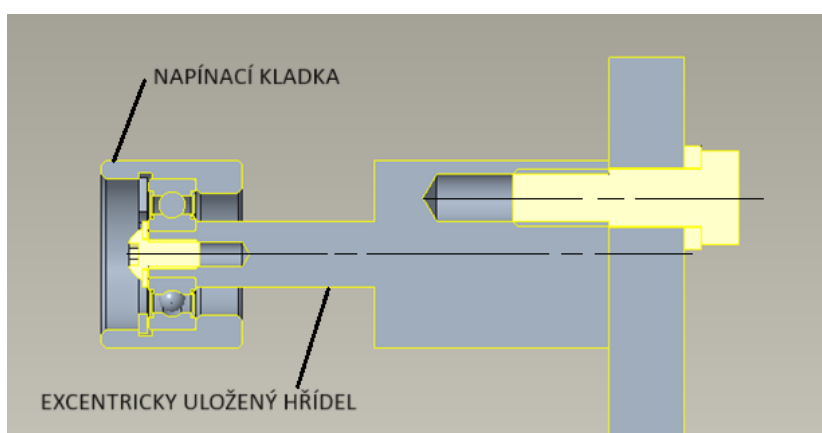
Převod momentu je zprostředkován od hřídele kladky přes řemenový převod na výstupní hřídel úhlového kuželového převodu, který je přes sklotextitovou (izolační) hřídel spojen s motorem. Sklotextitová hřídel zaručuje izolaci pracovní nabitě části zařízení od uzemně-

ného rámu a motoru. Důvodem k volbě úhlového převodu při konstrukci zařízení jsou rozměry zařízení. Pokud by na vytvořeném rámu měla být kladka poháněna motorem relativně souosým s hřídelí kladky, znamenalo by to i s přidáním vlnitého izolačního hřídele, který má lepší izolační vlastnosti a může být výrazně kratší (oproti hladkému hřídeli), enormní nárůst šířkového rozměru celého zařízení. Vzhledem ke konstrukčnímu požadavku na snadnou demontovatelnost celého zařízení byl zařazen mezi hřídel kladky a úhlový převod řemenový převod, který zajistí s navrženým systémem napínání jednoduché odpojení od pohonné jednotky při demontáži. Všechny převody jsou realizovány s převodovým poměrem $i=1$. Popis jednotlivých částí pohonu je na obr. 4.5.



Obr. 4.5 *Popis jednotlivých částí pohonu od motoru až k hnané kladce*

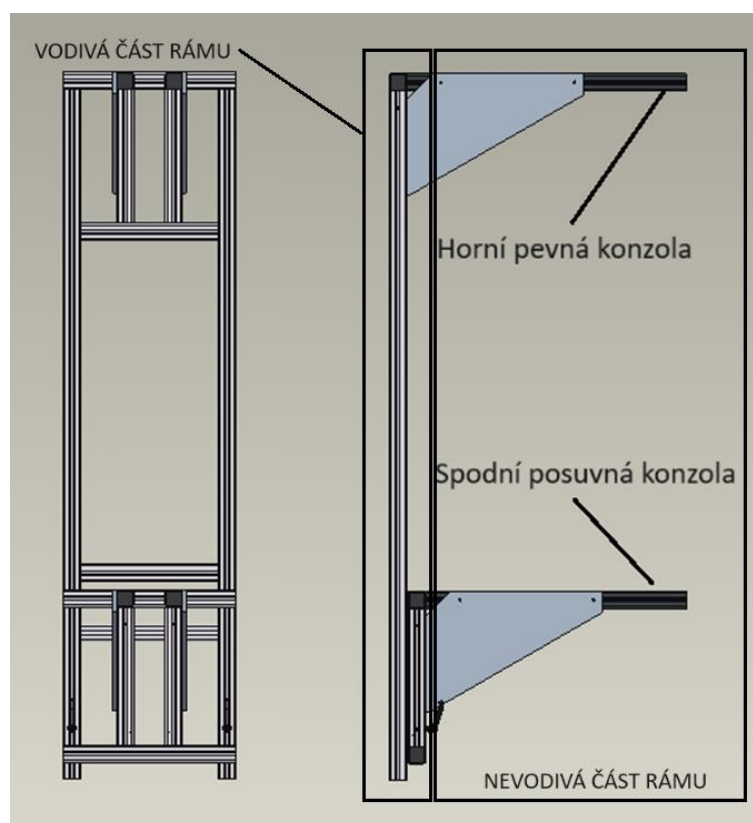
Pro napínání ozubeného řemenu byla navržena excentricky uložená kladka viz Obr. 4.6. Byla vhodně zvolena excentricita napínání a délka řemene, aby po uvolnění napínací kladky bylo možné řemínek přetáhnout přes hnací řemenici. K napnutí řemene je zapotřebí použít klíč *vel. 17*, kterým po otočení excentru definujeme míru předpětí a klíčem *vel. 10* je pak možné zajistit polohu napínací kladky.



Obr. 4.6 *Systém pro napínání ozubeného řemene*

4.4 Konstrukce rámu

Rám je tvořen dvěma konzolami viz obr. 4.7, horní konzola byla navržena jako pevně spojená s rámem zařízení, zatímco spodní konzola je k rámu uchycena čtveřicí profilových kluzáků, které umožňují aretovat polohu dvou jimi vzájemně spojených profilů. Rám je navržen tak, aby uzemněná část rámu byla z hliníkových profilů, které jsou vzájemně vodivě propojeny. Nosník konzol je dřevoplastový profil 40 a žebra podepírající dřevoplastové nosníky jsou ze silonových desek. Rám má zajistit vhodnou a tuhou oporu pro montáž a napnutí lankové elektrody. Zároveň musí vhodně izolovat nabitou a uzemněnou část konstrukce, proto byly použity profily z nevodivých materiálů s odizolovanou vzdáleností min. 300 mm, která je považována za bezpečnou. Je navržen způsob napínání elektrody rýhovanou maticí, která podle způsobu montáže bude lankovou elektrodu napínat, nebo ji povolovat v případě, že by se napínací síla vlastní vahou spodní konzoly ukázala při testování jako příliš velká.



Obr. 4.7 *Rám zařízení z hliníkových profilů ve vodivé části a z izolačních materiálů ve zbytku konstrukce*

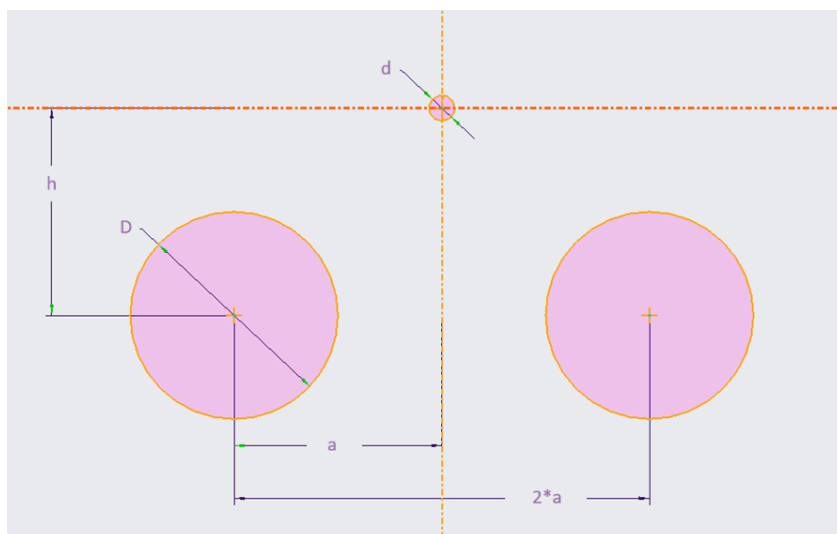
5 Simulace

5.1 Návrh geometrického uspořádání prvků ve zvlákňovací oblasti.

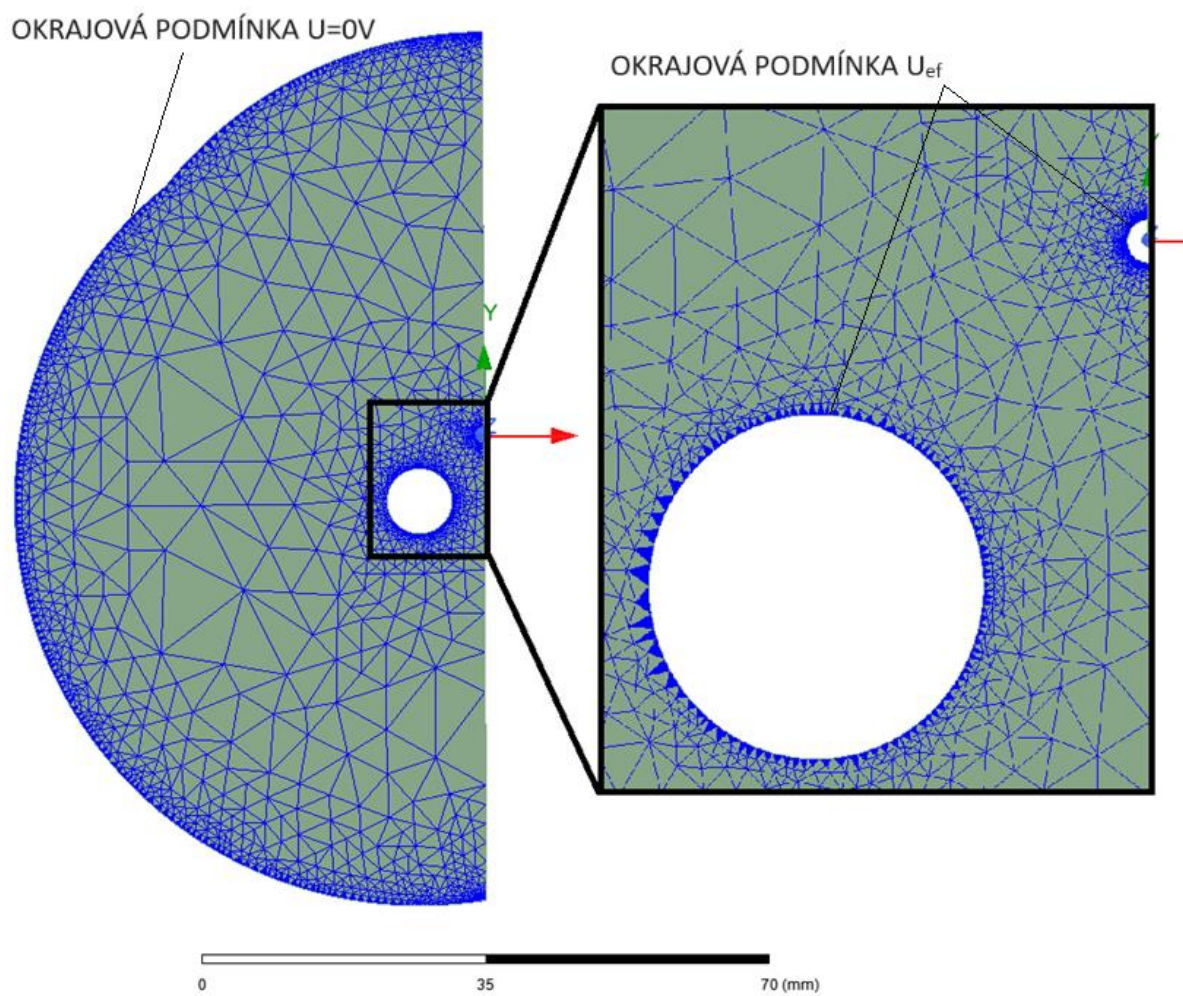
Na obrázku 5.1 je naznačeno uspořádání prvků, které se nacházejí ve zvlákňovací oblasti zařízení. Průměr elektrody byl zvolen 1 mm a průměr stínících řemenů 8 mm . Pokusy ukázaly, že vzájemná poloha elektrody a stínících tyčí má vliv na rozložení a velikosti intenzity elektrického pole v těsném okolí lankové elektrody. Aby bylo možné navrhnout funkční zařízení byl vytvořen v programu ANSYS Electronics Desktop 2019 s využitím symetrie úlohy poloviční model vzduchového okolí lankové elektrody. Pracovní část elektrody byla popsána jako 2D úloha v kartézském souřadném systému. Je předpoklad, že virtuální kolektor se vytváří v určité vzdálenosti od lankové elektrody závislé na frekvenci proudu, na efektivní hodnotě napětí. Vzdálenost virtuálního kolektoru byla pro případ simulací v této práci zvolena pevně ve vzdálenosti 50 mm od každého elementu s okrajovou podmínkou efektivního napětí U_{ef} . Do virtuálního kolektoru byla umístěna okrajová podmínka $U=0\text{ V}$. Byla generována síť, která byla v exponovaných místech zjemněna přidáním podmínky pro maximální velikost elementu. V případě okolí lankové elektrody byla zvolena max. velikost elementu $0,001\text{ mm}$ a kolem stínícího řemene byla zvolena max. velikost elementu $0,01\text{ mm}$. Síť viz obr. 5.2 s označenými okrajovými podmínkami U_{ef} , $U=0\text{ V}$. Pole rozložení elektrického potenciálu je vidět na obr. 5.3.

Od lankové elektrody je požadováno, aby zvlákňovala pouze z části obvodu (cca úhel 90°) odvrácené od stínících prvků. Aby bylo možné najít ideální geometrické uspořádání elektrody a řemenů, byla provedena variační analýza při referenční hodnotě efektivního napětí $U_{ef}=35\text{ kV}$, při níž se mění parametr $a=8\div 12\text{ mm}$ a parametr $h=2\div 10\text{ mm}$ a bylo hledáno takové uspořádání, při kterém je gradient funkce $E-o$ (intenzita elektrického pole-obvod lankové elektrody měřený od jejího vrcholu) co nejvyšší. Čím je funkce růst, nebo pokles funkce intenzity elektrického pole v závislosti na vzdálenosti od vrcholu elektrody měřené po jejím obvodu (dále jen $E-o$) strmější, tím vyšší maximální E dostaneme při minimálním úhlu překročení E_{kr} na lankové elektrodě. Bylo tedy vyšetřeno 64 variant geometrického uspořádání elektrody. Na obrázku 5.4 je graf závislosti $E-o$ pro $h=\text{konst.}$ a $U_{ef}=35\text{ kV}$, na kterém lze pozorovat vliv změny hodnoty parametru a na vzdálenosti od vrcholu elektrody, ve které je překročena kritická intenzita elektrického pole E_{kr} . Obrázek 5.5 ukazuje ten samý graf

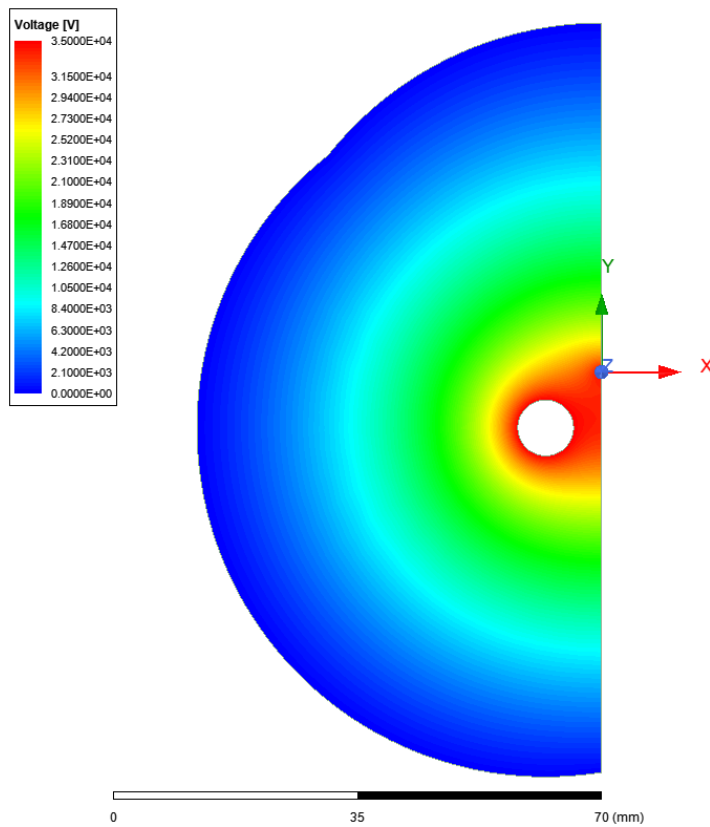
v polárních souřadnicích pro lepší představu o úhlu překročení E_{kr} měřeném od vrcholu elektrody.



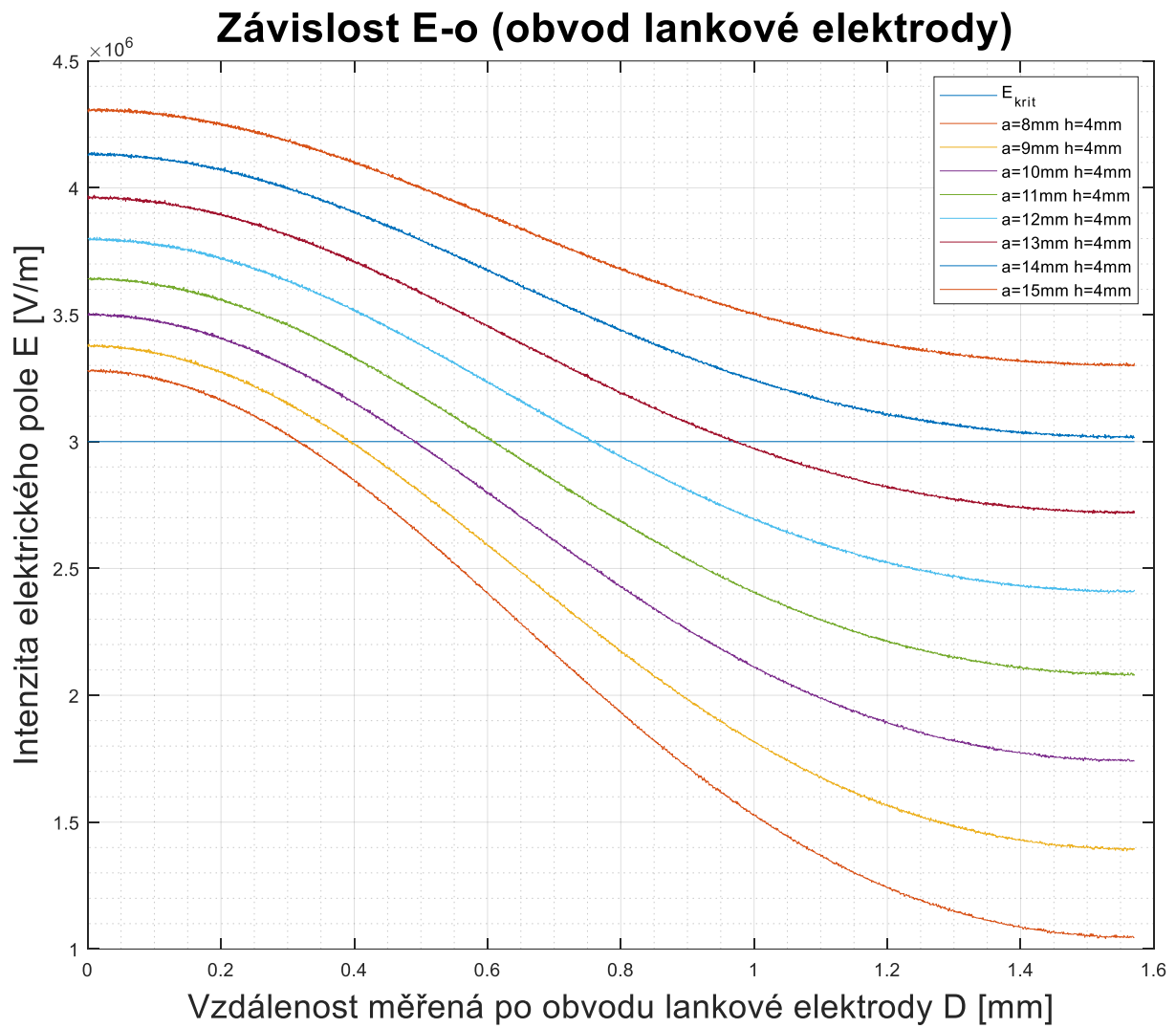
Obr. 5.1 *Schéma uspořádání prvků nacházejících se ve zvlákněvacím prostoru, d je průměr elektrody, D je průměr stínícího řemene, a je vzdálenost vertikálních os elektrody a stínění, h je vzdálenost horizontálních os elektrody a stínění*



Obr. 5.2 *Model vzduchového okolí lankové elektrody a řemene s vytvořenou sítí*

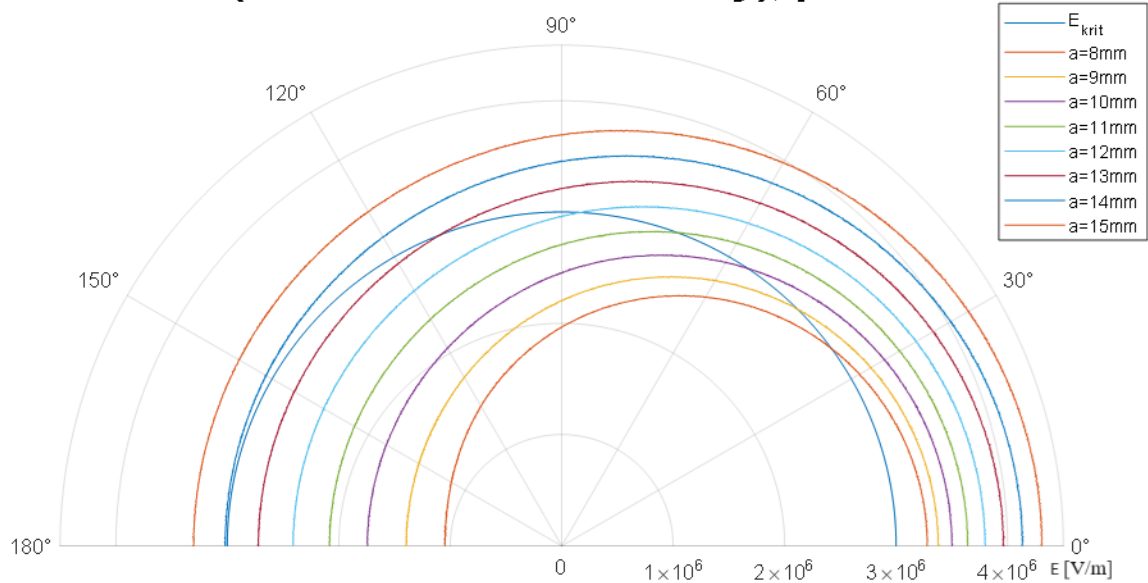


Obr. 5.3 *Pole potenciálu φ při hodnotě efektivního napětí $U=35\text{ kV}$ kolem lankovém elektrody*



Obr. 5.4 *Závislost E-o na povrchu lankové elektrody s konstantním parametrem h a proměnným a vynesena v kartézských souřadnicích*

Závislost E - θ (obvod lankové elektrody), parametr $h=4\text{mm}$



Obr. 5.5 Závislost E - θ na povrchu lankové elektrody s konstantním parametrem h a proměnným a vynesena v polárních souřadnicích

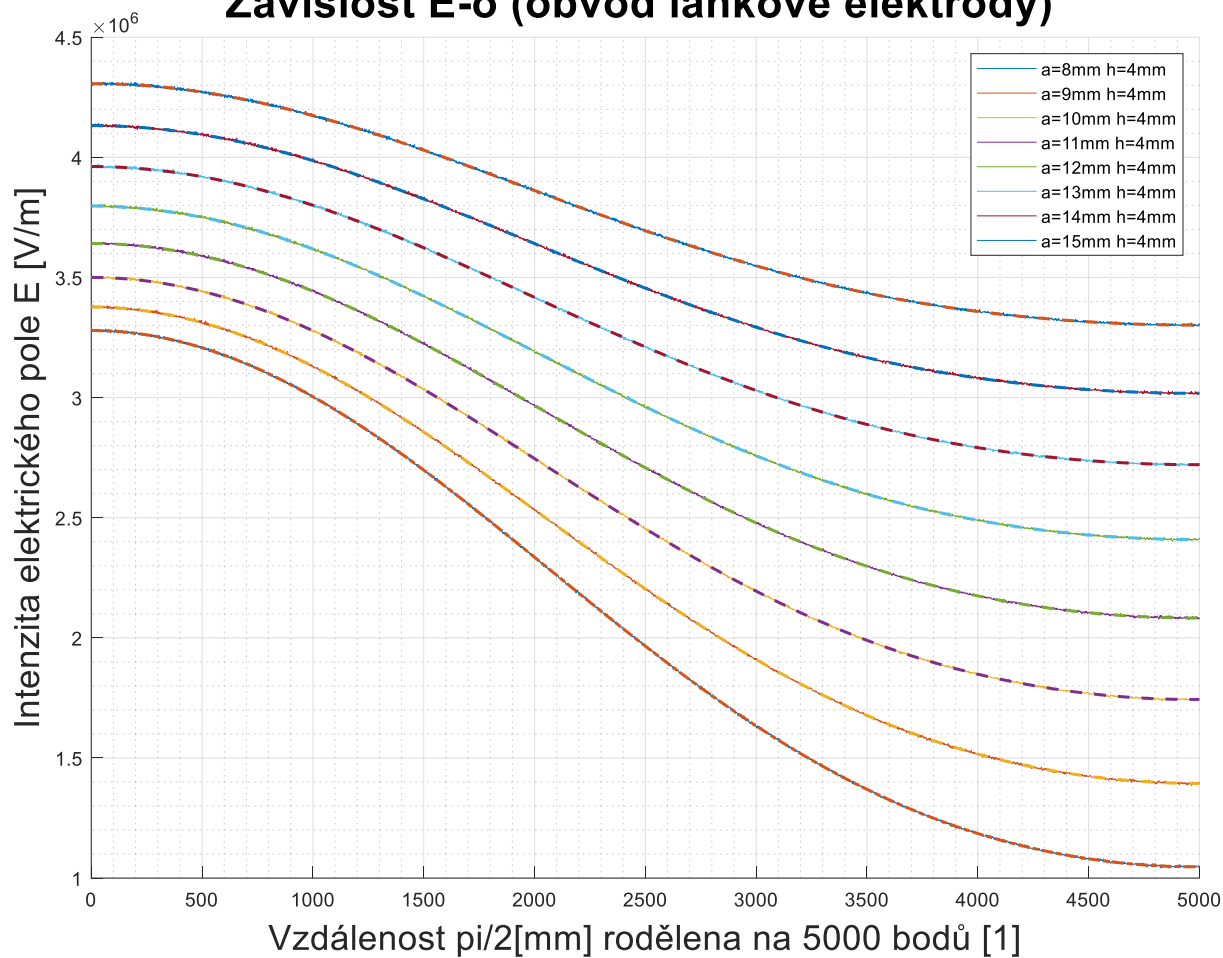
5.1.1 Hledání funkcí s nejvyšší hodnotou gradientu

Při hledání optimálního uspořádání elektrod bylo nutné se zaměřit na kvalitu přechodu kritické intenzity elektrického pole E_{kr} . Je žádoucí, aby pokles křivky s narůstající vzdáleností od osy symetrie zvláknovací elektrody byl co možná nejstrmější proto, aby bylo dosaženo nejostřejšího přechodu kritické intenzity el. pole.

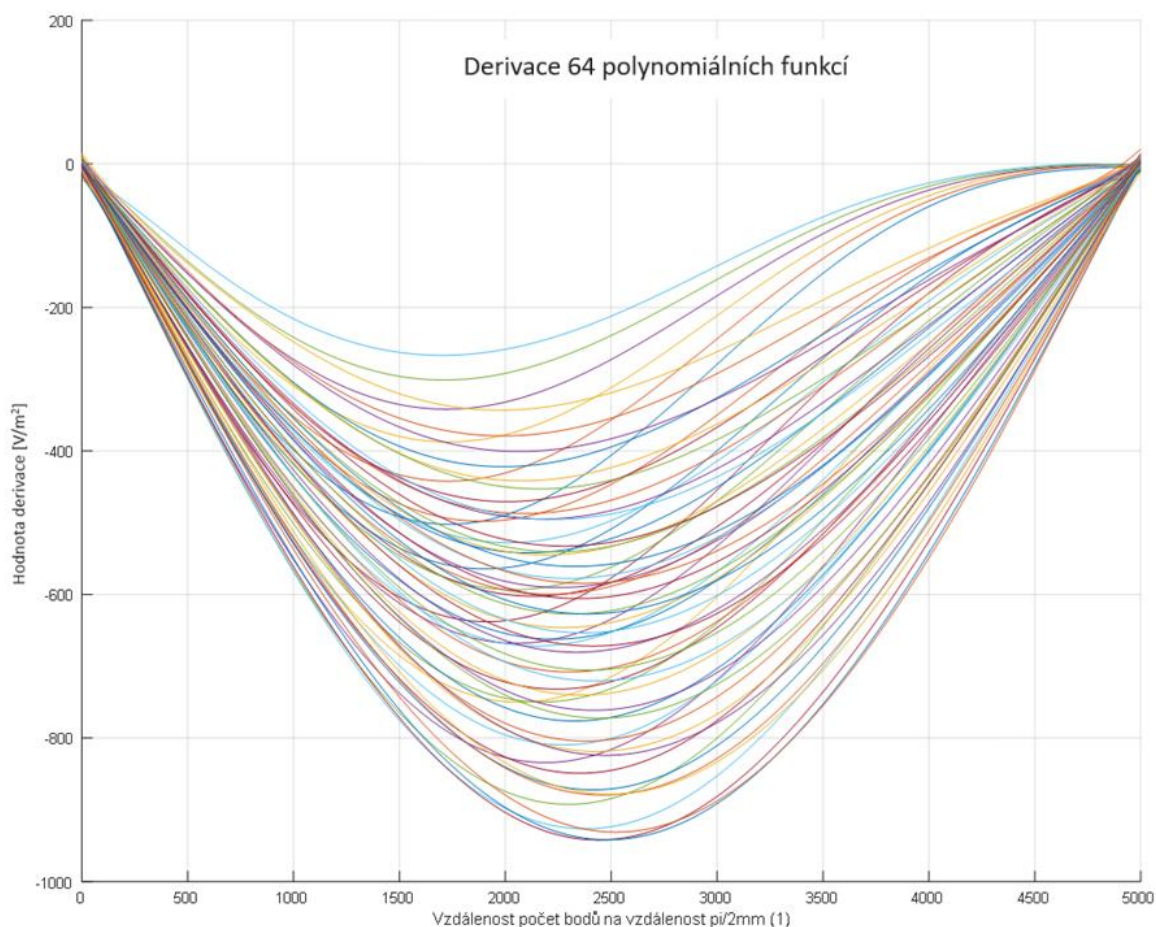
Všech 64 křivek závislostí E - θ z předchozí variační analýzy bylo v software Matlab aproximováno polynomem 9 stupně, aby bylo možné provést derivaci křivek. Obr. 5.6 zobrazuje graf namátkou vybraných variací zobrazených plnou čarou, čárkovaně je zobrazeno nahrazení jednotlivých křivek polynomem.

Následně byla v Matlabu provedena derivace polynomiálních funkcí viz obr. 5.7, na němž s nachází graf derivací všech 64 aproximovaných fcí. K dalšímu zpracování bylo vybráno několik variant s nejvyšší absolutní hodnotou derivace viz obr. 5.8.

Závislost E-o (obvod lankové elektrody)

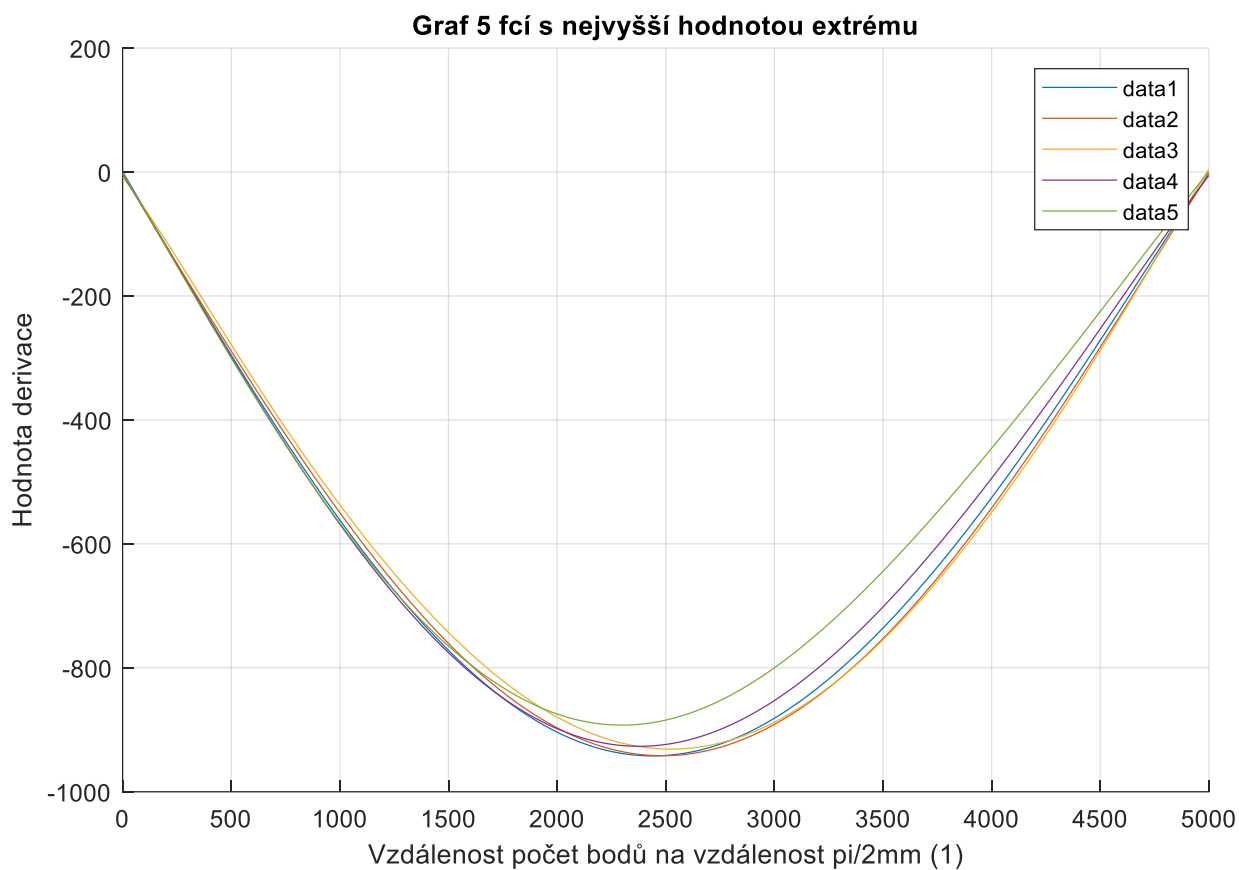


Obr. 5.6 Graf závislosti E-o pro konstantní parametr h a proměnný parametr a zobrazuje přesnost aproximace funkcí, původní fce jsou plné, aproximované čárkovaně



Obr. 5.7 Graf všech 64 derivací funkcí E -o aproximovaných polynomem

V Tab. 5.1 jsou zobrazeny 3 varianty s nejstrmějším poklesem E podél obvodu lankové elektrody ze 65 simulovaných variant polohy stínících prvků a to v rozmezí $a=(8\div 15)$ mm, $h=(2\div 10)$ mm. Pro těchto několik variant byla dále provedena variační analýza s napětím zdroje v rozmezí $(20\div 40)$ kV. Vzhledem k tomu, že hodnota derivace s parametry $a=8$ mm a $h=8$ mm, má nejvyšší absolutní hodnotu v průběhu první poloviny grafu derivací funkcí, má toto uspořádání v každém místě první poloviny elektrody nejstrmější pokles ve směru od vrcholu elektrody. Proto je tato varianta zvolena jako navržené uspořádání stínících řemenů a lankové elektrody. Protože první polovina grafu odpovídá 45° od vrcholu elektrody, je tato hodnota derivace v této části v zájmové oblasti.



Obr. 5.8 Graf zobrazující 5 variant derivací fce E -o(intenzita-obvod) s nejvyšší absolutní hodnotou extrému derivované fce

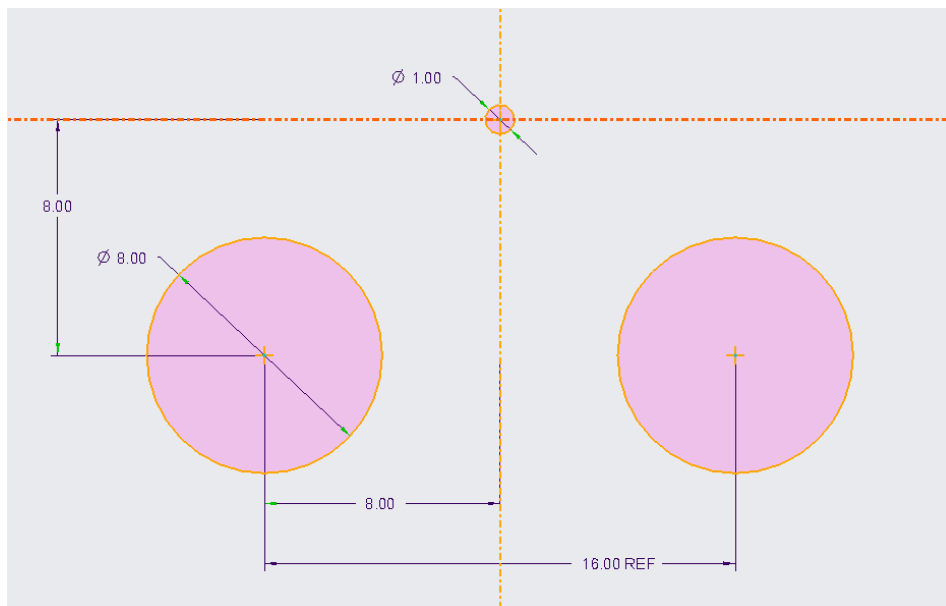
Tab. 5.1 Seřazení geometrií podle strmosti poklesu E podél obvodu elektrody

Pořadí	Geometrie	Extrém derivace [V/m ²]
1	a=8 mm, h=8 mm	-942
2	a=8 mm, h=9 mm	-941
3	a=8 mm, h=10 mm	-931
4	a=8 mm, h=7 mm	-926
5	a=8 mm, h=6 mm	-892

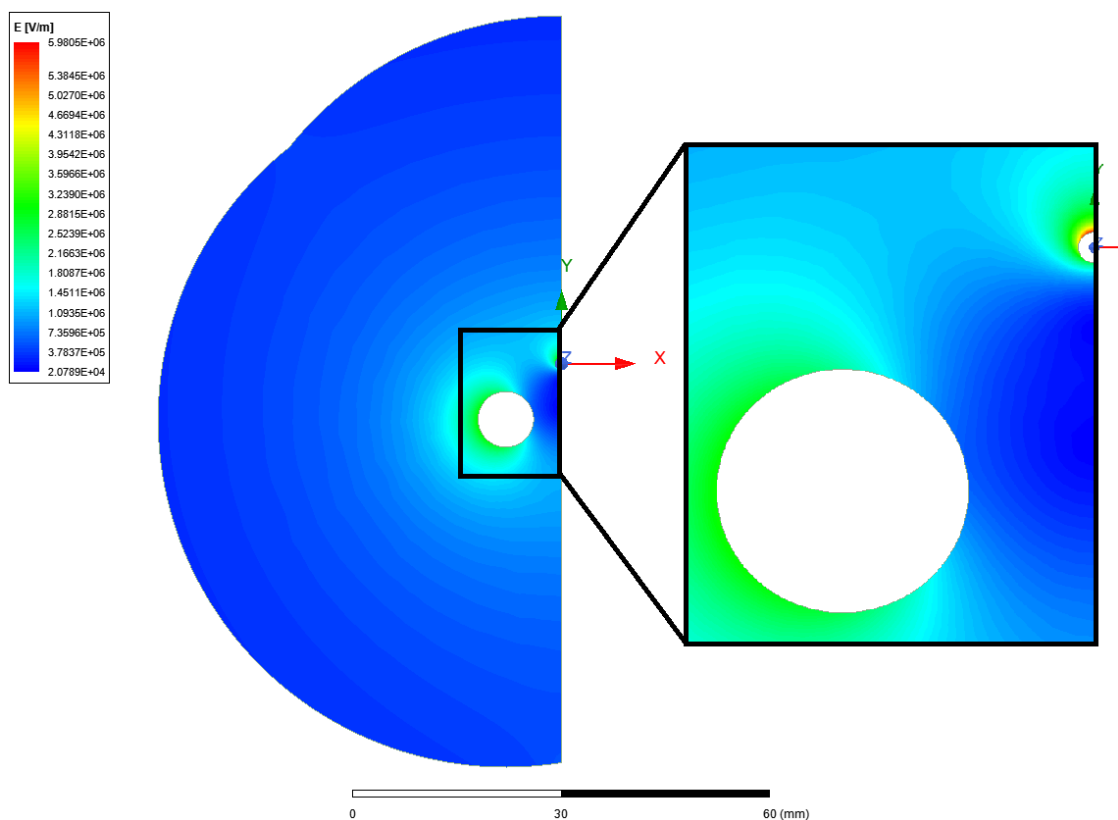
5.2 Simulace pracovní části lankové elektrody

V pracovní části elektrody byla provedena s předchozím modelem v ANSYS Electronics Desktop 2019 simulace pro zvolenou variantu geometrického uspořádání elektrody viz obr. 5.9. V tomto uspořádání byla provedena variační analýza pro proměnný parametr efektivního napětí $U_{ef}=(20, 25, 30, 35,40) \text{ kV}$. Na obrázku 5.11 je zobrazen graf závislosti intenzity elektrického pole E na vzdálenosti měřené na jejím obvodu s počátkem na vrcholu elektrody. Vrcholem elektrody je myšlen bod ležící na ose souměrnosti ve zvláknovací části na druhé straně od řemene. Z grafu je patrné, že se zvyšujícím se U_{ef} na elektrodě se zvětšuje část povrchu elektrody s nadkritickou intenzitou elektrického pole.

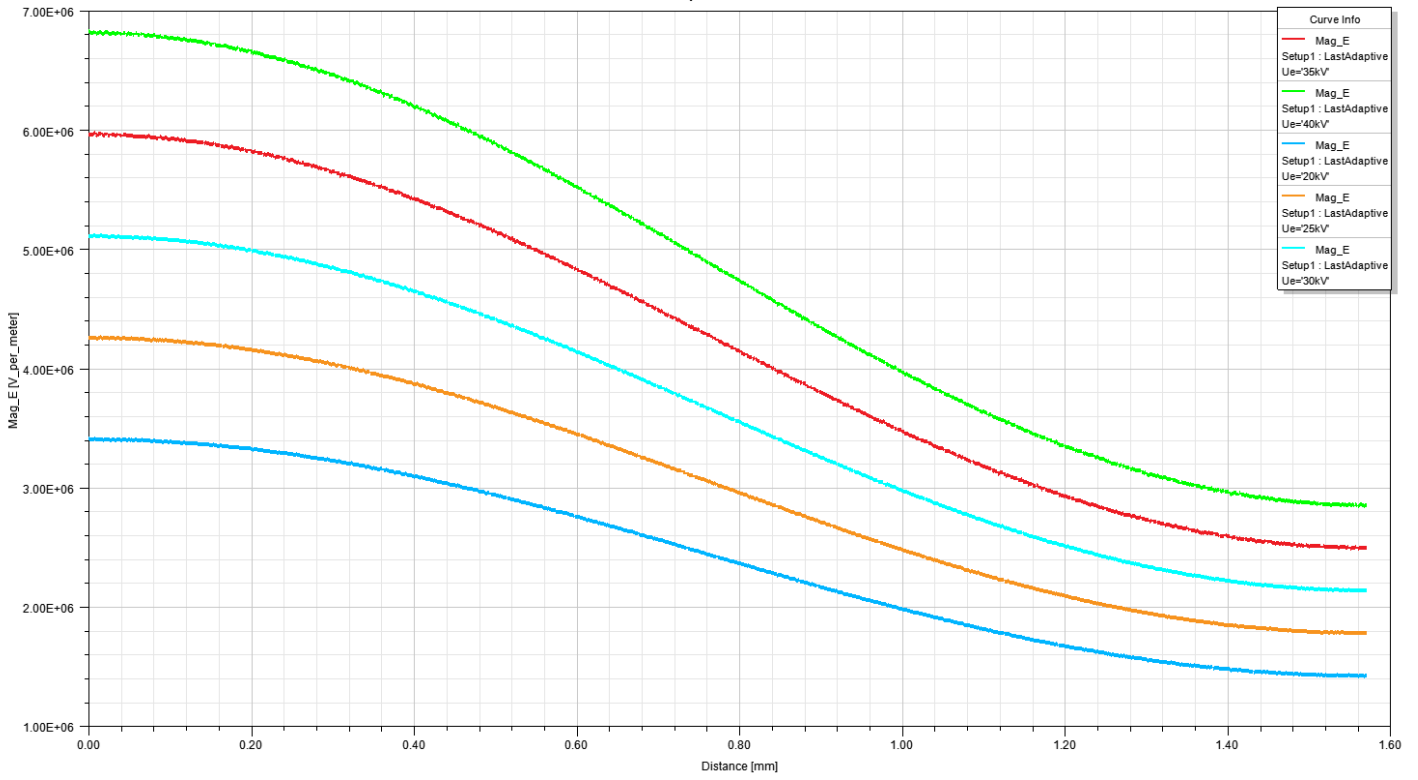
Na obrázku Obr. 5.10 je zobrazeno rozložení intenzity elektrického pole v okolí lankové elektrody při hodnotě $U_{ef}=35 \text{ kV}$, kde v zobrazeném detailu můžeme vidět místa s nadkritickou hodnotou E . Z obrázku je patrné, že zvláknovací oblast se nachází pouze na vrcholu lankové elektrody.



Obr. 5.9 Náčrt vzájemné polohy lankové elektrody a stínících řemenů



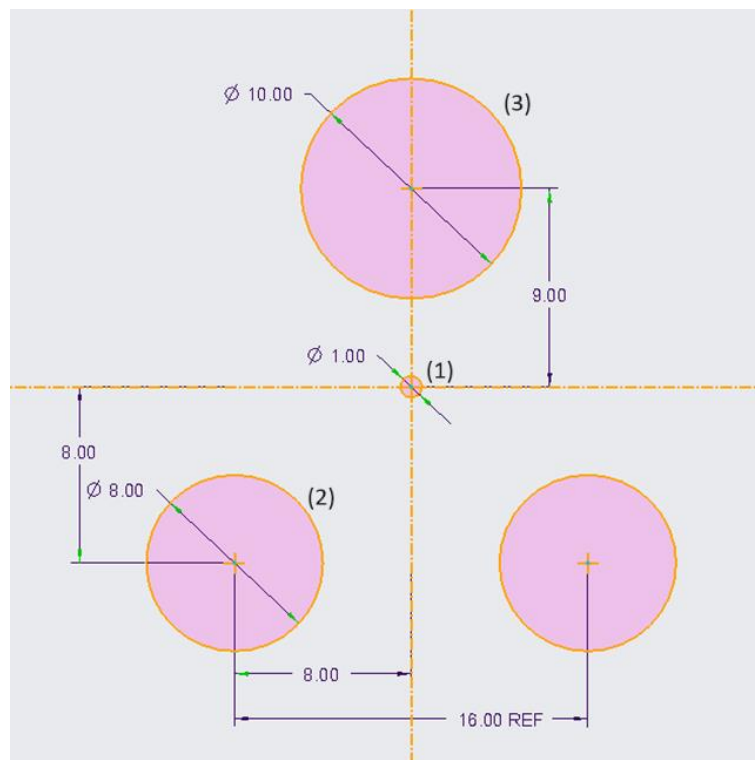
Obr. 5.10 *Rozložení intenzity elektrického pole E kolem lankové elektrody a stínícího řemene při hodnotě efektivního napětí $U_e=35$ kV*



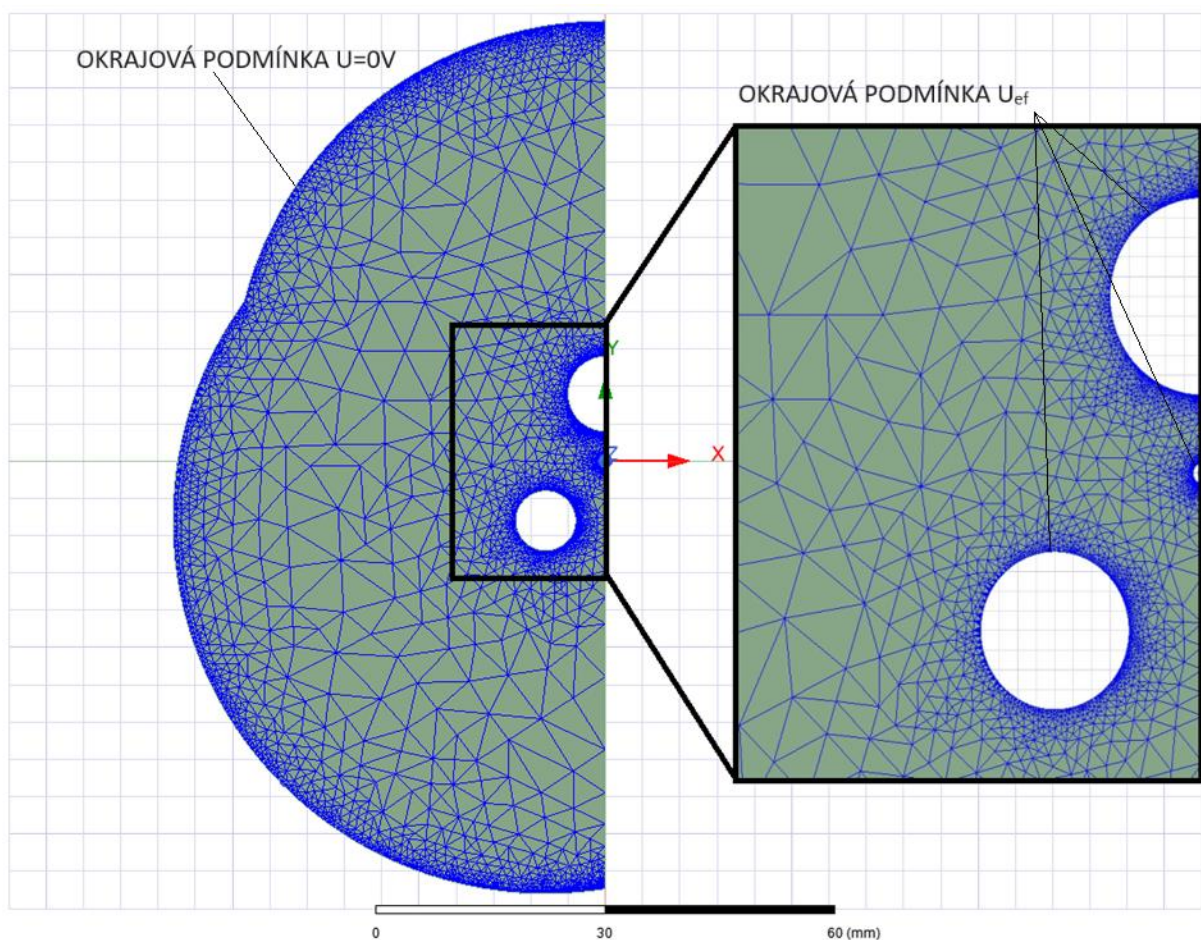
Obr. 5.11 Graf závislosti intenzity elektrického pole E [V/m] na vzdálenosti od vrcholu lankové elektrody d [mm]

5.3 Simulace dopravní části lankové elektrody

Vzhledem ke konstrukčnímu uspořádání lankové elektrody, vzniká na obě větve lankové elektrody jiný požadavek. Od funkční části je požadována zvlákňovací funkce, zatímco u vratné části lankové elektrody je zvlákňování nežádoucí. Aby byl zajištěn takový stav vratné větve, musí být vhodně zastíněna nezvlákňovací část lankové elektrody tak, aby po celém jejím obvodu byla při požadovaných rozdílech potenciálů intenzita elektrického pole pod kritickou hodnotou E_{kr} . Geometrické rozložení elektrody a stínících řemenů je jak v pracovní, tak v dopravní části elektrody stejné. Proto je nutné zajistit stínění povrchu elektrody tak, aby intenzita elektrického pole na jejím povrchu byla bezpečně pod kritickou hodnotou. Z toho důvodu byl do zařízení vložen další stínící prvek v podobě ocelové tyče o průměru 10 mm , která je umístěna před lankovou elektrodou v dopravní části elektrody viz obrázek 5.12. Umístění stínícího prvku je zvoleno osově ve vzdálenosti 9 mm od osy lankové elektrody.

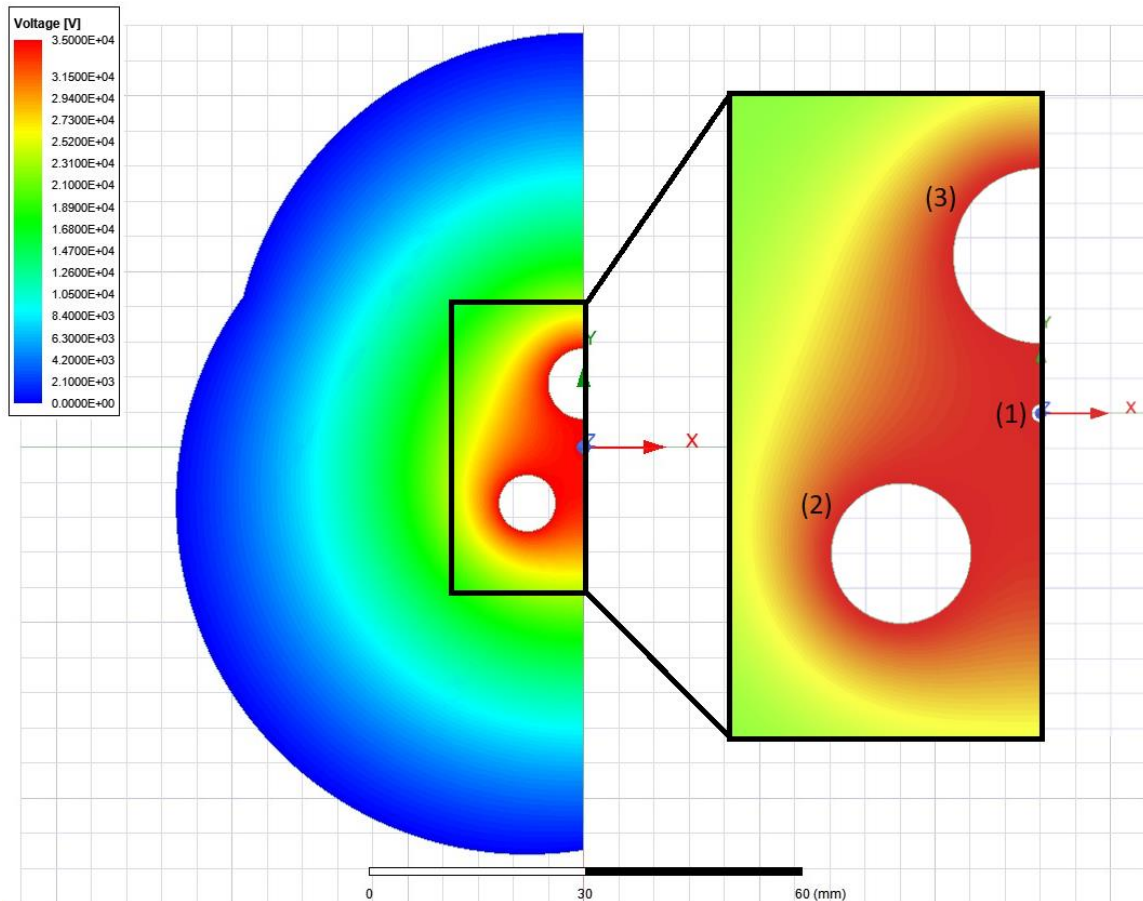


Obr. 5.12 Schéma geometrického uspořádání lankové elektrody (1), stínících řemenů (2) a stínící tyče (3)



Obr. 5.13 Model vzduchového okolí lankové elektrody s vytvořenou sítí

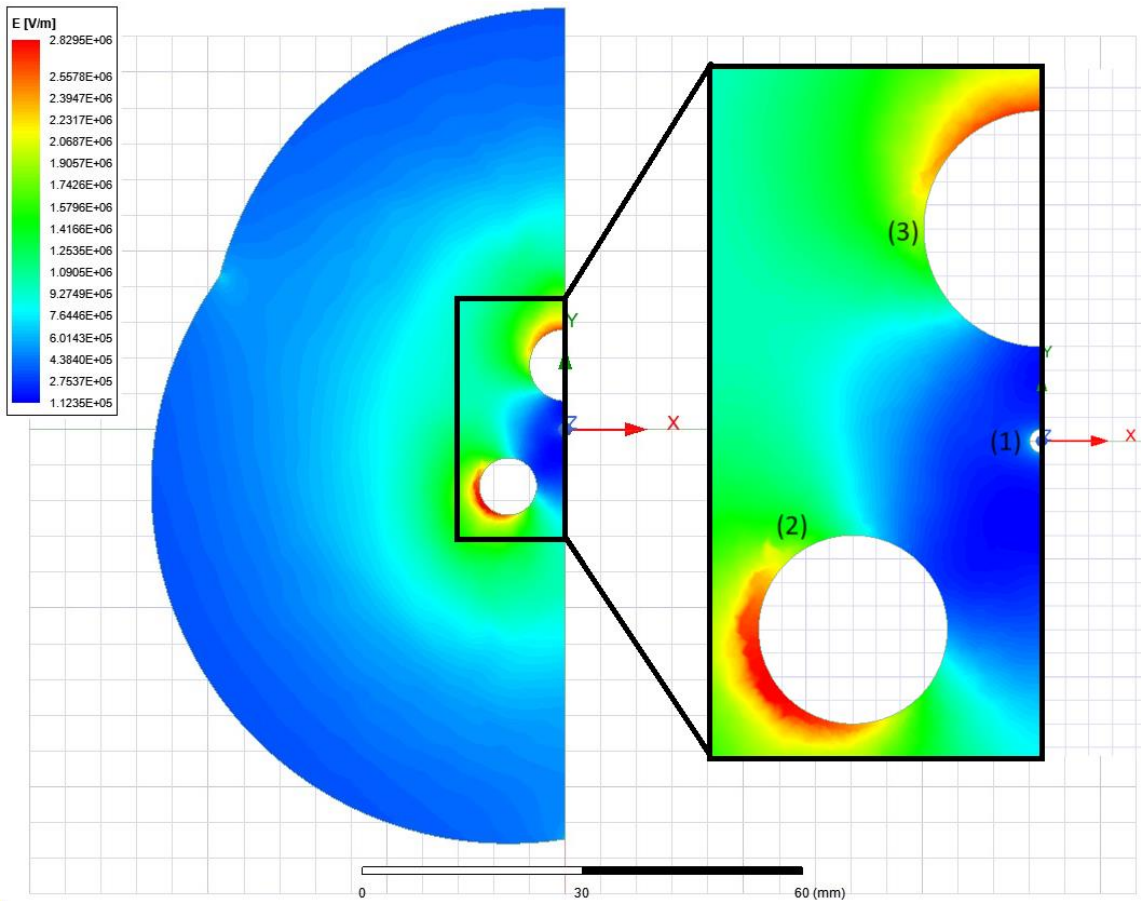
V sw ANSYS Electronics Desktop 2019 byl vytvořen 2D model vzduchového okolí viz obr. 5.13 a pomocí nástroje MAXWELL 2D DESIGN bylo simulováno rozložení elektrického potenciálu a intenzity elektrického pole viz obr. 5.14 ve virtuálním kolektoru lankové elektrody. Tvorba sítě byla upravována totožně jako u předchozího modelu. Rozložení potenciálu odpovídá přivedenému napětí U_e na elektrodu i stínící elementy, protielektrodou je virtuální kolektor s napětím $U=0 V$ v odhadované vzdálenosti $50 mm$ od prvků pod napětím.



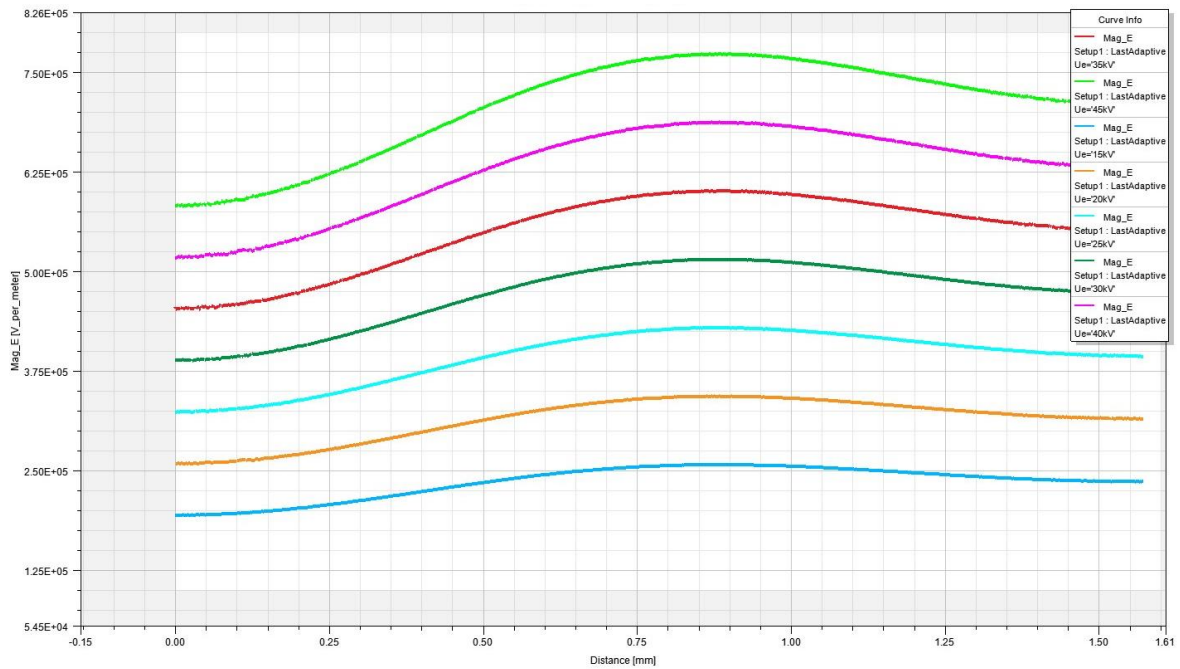
Obr. 5.14 Pole potenciálu φ při hodnotě efektivního napětí $U_{ef}=35$ kV kolem lankové elektrody (1), stínícího řemene (2), stínící tyče (3)

Na obr. 5.15 můžeme vidět rozložení intenzity elektrického pole z numerické simulace kolem lankové elektrody, stínícího řemene a stínící tyče pro efektivní napětí $U_{ef}=35$ kV. Simulace byla provedena ve variantách $U=15, 20, 25, \dots, 45$ kV. Hodnoty intenzity elektrického pole na obvodu lankové elektrody pro všechny varianty napětí byly vyneseny do grafu viz obr. 5.16. Nezávisle proměnnou je vzdálenost měřená po obvodu lankové elektrody od jejího vrcholu, jde tedy o polovinu obvodu lanka o průměru $d=1$ mm. Závisle proměnná je intenzita elektrického E pole v závislosti na místě na obvodu elektrody.

Cílem provedené simulace je ověření, že dopravní část elektrody nebude zvláknovat, nebude tedy v žádném místě na elektrodě překročena hodnota E_{kr} . Podle dat ze simulace zobrazených v grafu dosahuje po zastínění elektroda při maximálním rozdílu potenciálu (pro 40 kV) maxima $E=0.826$ kV.mm⁻¹. Intenzita se tedy pohybuje bezpečně pod kritickou hodnotou E_{kr} .



Obr. 5.15 Rozložení intenzity elektrického pole E při hodnotě efektivního napětí $U_{ef}=35kV$ kolem lankové elektrody (1), stínícího řemene (2), stínící tyče (3)

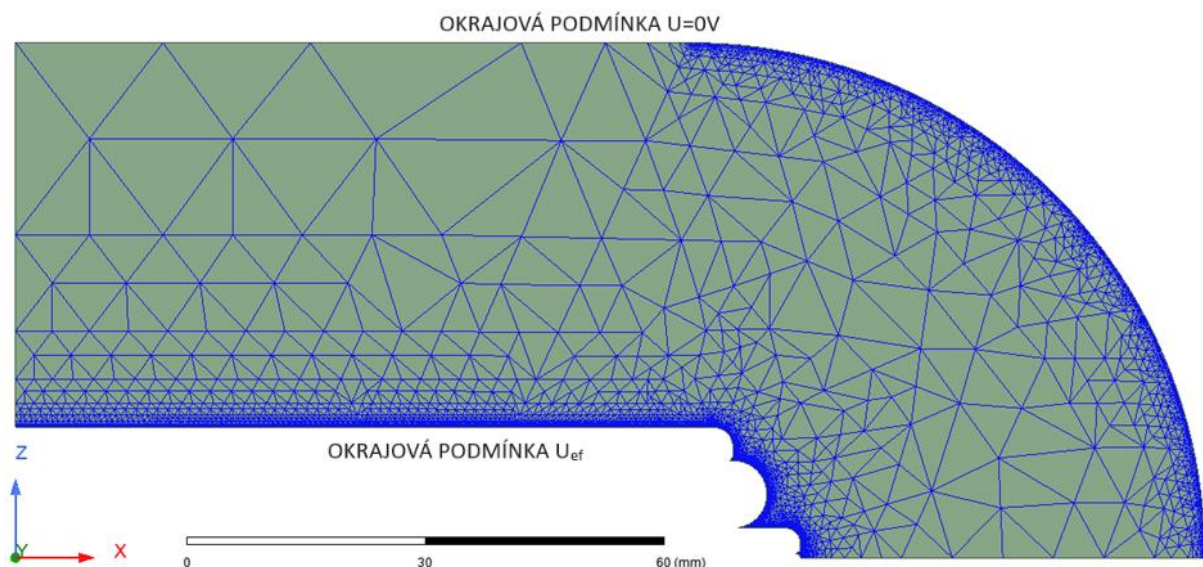


Obr. 5.16 Graf závislosti intenzity elektrického pole E okolo obvodu lankové elektrody d

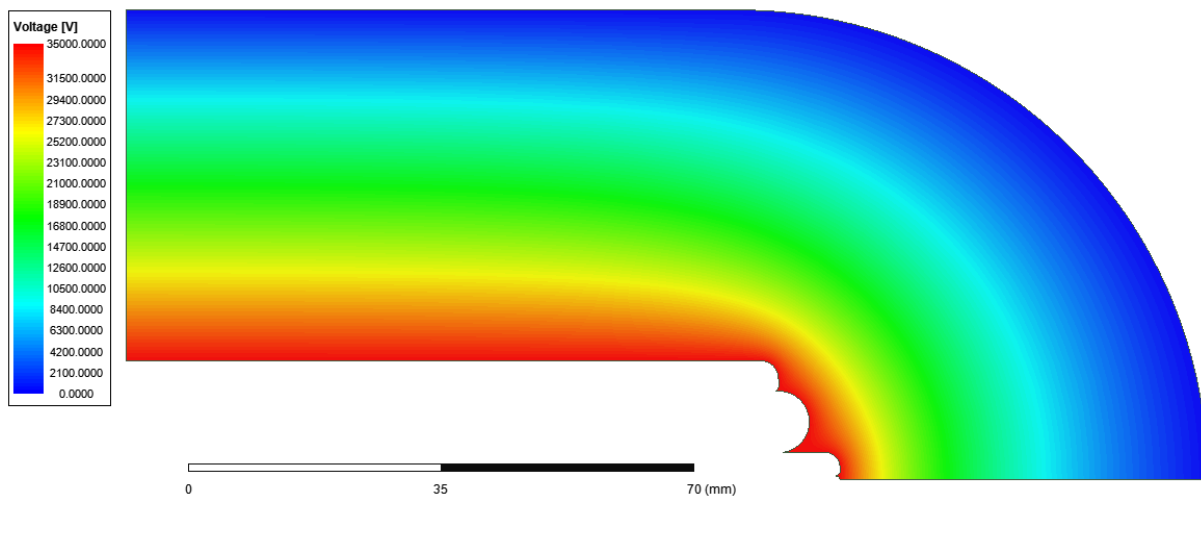
5.4 Simulace intenzity elektrického pole kolem elektrody v drážce kladky horní kladky

Když se elektroda nachází v drážce kladky, je prostorová křivost elektrody vyšší než v pracovní, nebo dopravní oblasti. Proto je nutné zkontrolovat, že elektroda nebude v drážce kladky zvlákňovat. Byl vytvořen 2D model okolí kladky včetně lankové elektrody a stínícího řemene ve válcových souřadnicích s osou souměrnosti z . Model s vytvořenou sítí je na obr. 5.17. V místě profilu kladky byla zjemněna síť zadáním podmínky maximální velikosti elementu na $0,001\text{ mm}$. Model obsahuje okrajovou podmínku $U_{ef}=35\text{ kV}$ vloženou na celý obrys kladky a druhou okrajovou podmínku $U=0\text{ V}$ vloženou do virtuálního kolektoru vzdáleného 50 mm od obrysu kladky.

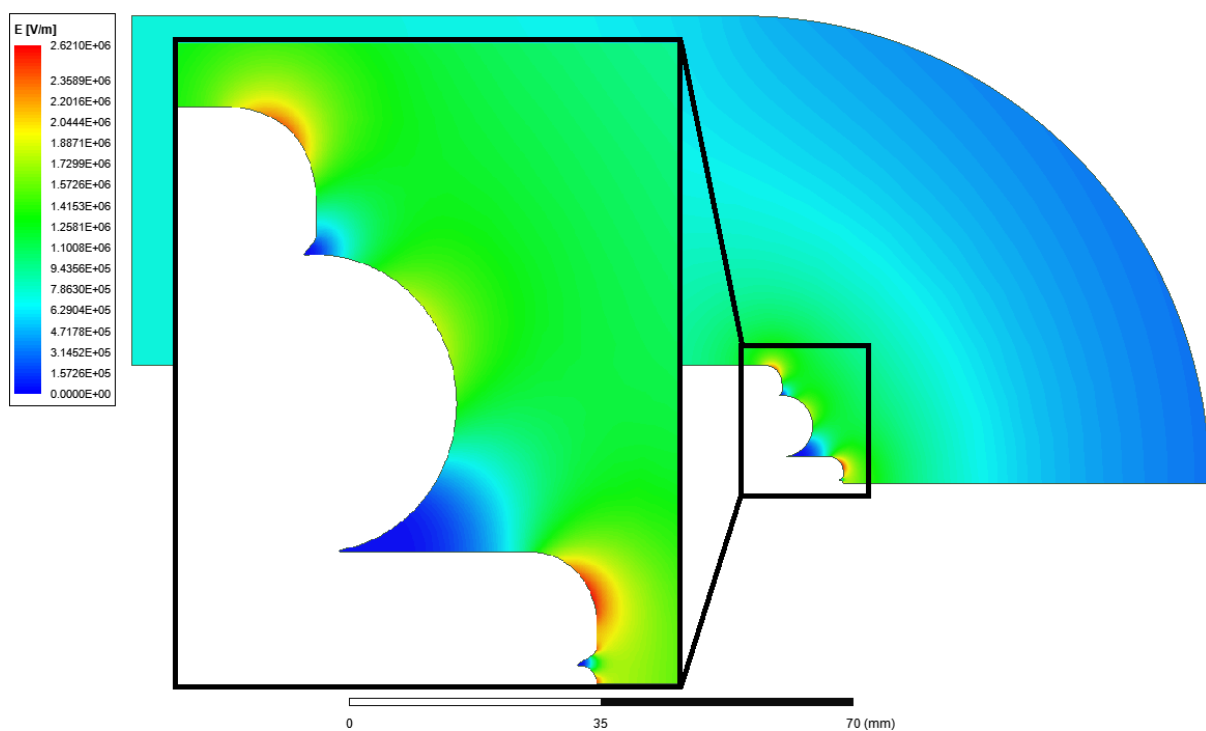
Na obr. 5.18 se nachází pole potenciálu při $U_{ef}=35\text{ kV}$. Obr. 5.19 zobrazuje rozložení intenzity elektrického pole E okolo kladky, lankové elektrody a stínícího řemene. V detailu jsou vidět místa s maximální intenzitou elektrického pole E , která se však nachází pod stanovenou kritickou hodnotou E_{kr} . V místě, kde se elektroda nachází v kontaktu s kladkou, nebude docházet ke zvlákňování.



Obr. 5.17 Model vzduchového okolí kladky elektrody včetně lankové elektrody a stínícího řemene s vygenerovanou sítí



Obr. 5.18 *Pole potenciálu ϕ při hodnotě efektivního napětí $U=35$ kV kolem kladky s elektrodou a řemeny*



Obr. 5.19 *Rozložení intenzity elektrického pole E v modelu okolí kladky s lankem a řemeny. V detailu je zobrazena oblast s maximem E*

6 Zhodnocení výsledků

Podle principu ověřeného na laboratorním zařízení v laboratoři TUL byla navržena nová lanková elektroda tvaru nekonečné smyčky, jejíž funkce je založena na zvlákňování polymerního roztoku z lanka o průměru 1 mm účinkem střídavého elektrického pole. Polymerní roztok je na elektrodu nanášen smáčením části smyčky elektrody v polymerním roztoku a je dopravován společně s lankem napnutým mezi dvěma kladkami do zvlákňovací oblasti. Je požadováno, aby elektroda zvlákňovala pouze z částí vlastního povrchu ideálně tak, aby vlákna vystupovala z elektrody pouze jedním směrem a shlukovala se v oblasti virtuálního kolektoru, kde se při odtahu vláken tvoří nanovláknenná stužka. Ta je čistým, lineárním nanovláknenným útvarům. Vhodným vložením stínících prvků (v tomto případě prvků se stejným potenciálem) je elektrické pole modifikováno tak, aby nedocházelo ke zvlákňování z celého obvodu průřezu elektrody, ale pouze z jeho určené části. Tím je možné dosáhnout kýženého výsledku, aby vlákna vznikající na elektrodě byla vytvářena přibližně v jednom směru. Jako stínící prvek je v konstrukci navržena dvojice kruhových řemenů o průměru 8 mm , které jsou napnuty mezi kladkami a otáčeny jedním směrem společně s elektrodou. Řemeny jsou pokrývány polymerním roztokem při jejich smáčení v lázni polymerního roztoku. Definovanou vrstvu polymerního roztoku na řemenu a elektrodě zajišťuje stírací plech. Mezera mezi stíracím plechem definuje tloušťku nanesené vrstvy.

Hledání vhodné vzájemné osové polohy elektrody a stínících prvků bylo provedeno za použití nástroje numerické simulace elektrického pole pomocí software ANSYS Electronics Desktop 2019. Byl vytvořen 2D model v kartézských souřadnicích popisující okolí lankové elektrody simulující rozložení prvků v pracovní oblasti elektrody. Bylo simulováno 64 variant vzájemné polohy elektrody a stínících prvků, z nichž byl vybrán nejvhodnější způsob vyhodnocením dvou kritérií. Je požadováno, aby na elektrodě ve zvlákňovací oblasti byla co nejvyšší intenzita elektrického pole E a zároveň je žádoucí co nejužší oblast na obvodu průřezu lankové elektrody, na které se objeví intenzita elektrického pole E nad kritickou hranicí E_{kr} . Byla vybrána nejvhodnější geometrická varianta s osovou vzdáleností ve vodorovném i svislém směru 8 mm . Aby bylo zaručeno, že elektroda ve své druhé (dopravní) větvi nebude zvlákňovat, byla přidána ocelová stínící tyč o průměru 10 mm osově vzdálená 9 mm od osy elektrody ve směru tvorby vláken. Funkce nového stínícího prvku byla ověřena 2D simulací v kartézských souřadnicích elektrického pole s modelem zahrnujícím prvky v dopravním prostoru elektrody. Simulace ukázala, že intenzita elektrického pole se pohybuje pro tento případ hluboko pod kritickou hodnotou. K tvorbě vláken zde tedy nebude docházet. Byl vytvořen

třetí 2D výpočetní model kladky ve válcových souřadnicích, kterým bylo prověřeno, že při přivedení předpokládaného zvlákňovacího napětí nedojde na žádné části kladky k dosažení nadkritické hodnotě intenzity pole. S pomocí numerických simulací el. polí byla elektroda rozměrově vhodně nastavena, tak aby byla schopna vyrábět nanovláknennou stužku. Z výsledků simulace ve zvlákňovací větvi je patrný trend, který ukazuje na možnost zvýšit maximální intenzitu el. pole na vrcholu zvlákňovací oblasti a rozšířit oblast překročení E_{kr} zvýšením efektivní hodnoty napětí. Z toho plyne, že při testování zařízení bude možné přidávat zvlákňovací výkon, dokud bude elektroda vytvářet vlákna v definovaném směru se zanedbatelným rozptylem směru pro shlukování vláken ve virtuálním kolektoru tak, aby stále elektroda produkovala stužku.

Z důvodu eliminace potíží s příliš hmotnou stužkou, která v horizontálním uspořádání mohla spadnout na elektrodu, byla elektroda navržena ve svislém uspořádání. Takové řešení eliminuje riziko kontaktu elektrody se stužkou. Je předpoklad, že lanková elektroda s pracovní oblastí ve svislé poloze umožňuje volit libovolně velký zvlákňovací prostor. Elektroda byla navržena tak, aby odhadovaný zvlákňovací prostor byl cca 1000 mm . Při konstrukci elektrody byl brán ohled na možnost zvětšení zvlákňovacího prostoru. K tomu je zapotřebí vyměnit smyčku lankové elektrody, řemeny a stínící tyč za delší. Rám zařízení je navržen tak, že je možné vzdálenost kladek zvětšit nebo zmenšit a aretovat v libovolném místě vodičího profilu rámu.

Vzhledem k tomu, že se při simulacích el. polí ve zvlákňovací části elektrody ukázalo, že na intenzitu elektrického pole ve zvlákňovací oblasti má vliv rozteč stínících řemenů. Pro potřeby testování lankové elektrody s proměnným elektrickým polem ve zvlákňovací oblasti byla navržena dělená spodní kladka sestávající se ze středové kladky pro elektrodu a ze dvojice řemenic, které se ke kladce šroubují z boku. Tato varianta je schopna zajistit snadnou změnu rozteče řemenů přidáním podložek mezi kladku a řemenice. Změna rozteče řemenic nepůsobí rozdílnou obvodovou rychlost řemenic na rozdíl od varianty změny pole, která by byla provedena zvětšením roztečného průměru řemenic. Pokud bude zvětšena rozteč bude nutné vyměnit pouze stírátko s upraveným tvarem.

Další výhodou svislé orientace zvlákňovací elektrody je využití odvodu příze vzhůru ve svislém směru. Stužka vznikající ve virtuálním kolektoru by pak měla svou vlastní vahou zavádět tah do stužky, který je nezbytný pro manipulaci se stužkou. Mohlo by být testováno, zda by bylo možné před počátkem procesu zvlákňování zavést již vyrobenou nanovláknennou stužku do prostoru virtuálního kolektoru a nechat po zahájení procesu vlákna zachytávat na

vloženou stužku, než dojde k aktivaci odtahu. Bylo by tak možné navrhnout k zařízení systém automatického zahájení výroby.

7 Závěr

Výsledkem diplomové práce je návrh elektrody pro výrobu nanovláknenné stužky, který byl podpořen numerickými simulacemi elektrického pole v okolí lankové elektrody.

Rešeršní část práce byla věnována principu výroby nanovláken účinkem střídavého elektrického proudu a známých typů zvláknovacích elektrod pro AC electrospinning. Byla dohledána řešení zabývající se výrobou nanovláknenné stužky lankovou elektrodou. Principem výroby stužky lankovou elektrodou je vhodné zastínění elektrického pole okolo elektrody.

V kapitole koncept je popisován princip výroby stužky lankovou elektrodou, kapitola obsahuje popis nevýhod současného řešení a koncepční návrh nového řešení, který si klade za cíl nevýhody odstranit.

Byl vypracován konstrukční návrh zařízení, který probíhal na základě rozvrženého konceptu a byl podpořen numerickými simulacemi intenzity elektrického pole metodou konečných prvků v softwaru ANSYS Electronics Desktop 2019, které byly provedeny na polovičnických 2D modelech s využitím osové symetrie úlohy. Tyto modely zohledňují v jednom případě pouze vzájemnou interakci lankové elektrody a stínících prvků a v druhém případě interakci elektrody, stínících prvků a kladky. Výsledky simulací by mohly být zpřesněny vytvořením 3D výpočetního modelu, který by zohledňoval vliv všech součástí zařízení na elektrické pole v 3D prostoru. Z časových důvodů nebyly 3D simulace provedeny.

Pomocí provedených simulací byla hledána ideální vzájemná poloha stínících prvků a lankové elektrody. Byla analyzována místa na elektrodě, kde je zvláknování nežádoucí. Byly popsány stěžejní konstrukční uzly a bylo zhodnoceno výsledné řešení z hlediska budoucí výroby nanovláken, nebo další modifikace zařízení.

Konstrukce zařízení umožňuje s minimálními konstrukčními zásahy změnit osovou vzdálenost mezi kladkami a tím případně dle potřeby nastavit délku zvláknovací oblasti.

V tuto chvíli probíhá výroba dílů podle příložené výkresové dokumentace. Hodnocení vyrobené stužky a samotného zařízení v provozu bude předmětem dalšího zkoumání a případně dalších prací na KTS FS TUL.

Čistá nanovláknenná stužka je lineární nanovláknenný útvar, u kterého je předpokládáno, že bude sloužit mj. jako polotovar k výrobě vysoce jemné nanovláknenné příze. Čistá nanovláknenná příze je moderní materiál s obrovským potenciálem využití v tkáňovém inženýrství, ve farmacii, filtraci, k výrobě speciálních tkanin apod. V současnosti je vyvíjeno velké úsilí k nalezení průmyslového způsobu její výroby. Spolehlivá kontinuální výroba nanovláknenné

stužky, již se tato práce zabývá, tak významně přispěje k vývoji těchto nových lineárních nanovlákných struktur včetně čistě nanovlákné příze.

Použitá literatura

- [1] DAVID LUKÁŠ A KOL. *Nanovlákná Teorie, technologie a použití*. první. Praha: Academia, nedatováno. ISBN 978-80-200-3400-7.
- [2] BAŤKA, Ondřej. *Zařízení na výrobu jádrové příze* [online]. B.m., 2015 [vid. 2024-04-17]. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/17433>
- [3] RAMAKRISHNA, SEERAM. *An introduction to electrospinning and nanofibers*. nedatováno. první. ISBN ISBN : 9786611880750.
- [4] PROF. RNDR. ZDENĚK HORÁK, DRSC. *Fyzika*. Praha: SNTL/ALFA, nedatováno.
- [5] SR, MEFANET, síť lékařských fakult ČR a. *Coulombův zákon a permitivita prostředí – WikiSkripta* [online]. [vid. 2024-04-15]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Coulomb%C5%AFv_z%C3%A1kon_a_permitivita_prost%C5%99ed%C3%AD
- [6] *Elektrostatické pole – WikiSkripta* [online]. [vid. 2024-04-14]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Elektrostatick%C3%A9_pole
- [7] FRIEDRICH, Ondřej. OPTIMALIZACE ZVLÁKŇOVACÍHO ZAŘÍZENÍ S DISKOVOU ELEKTRODOU [online]. 2021 [vid. 2024-04-17]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/160734>
- [8] BERAN, Jaroslav, Jan VALTERA, Martin BĀ-LEK, Josef SKŘIVÁNEK, Ondřej BAŤKA, David LUKÁŠ, Pavel POKORNÝ, Tomáš KALOUS, Julie SOUKUPOVÁ a Eva KOŠŤÁKOVÁ. Způsob výroby polymerních nanovláken elektrickým zvlákňováním roztoku nebo taveniny polymeru, zvlákňovací elektroda pro tento způsob, a zařízení pro výrobu polymerních nanovláken osazené alespoň jednou touto zvlákňovací elektrodou [online]. CZ306772B6. 28. červen 2017. [vid. 2024-04-17]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/CZ306772B6/cs>
- [9] *PPVCZ2021_0069A3.pdf* [online]. [vid. 2024-05-20]. Dostupné z: https://isdv.upv.gov.cz/doc/FullFiles/Applications/2021/PPVCZ2021_0069A3.pdf
- [10] *PPVCZ2022_0248A3.pdf* [online]. [vid. 2024-05-20]. Dostupné z: https://isdv.upv.gov.cz/doc/FullFiles/Applications/2022/PPVCZ2022_0248A3.pdf

Seznam příloh

Zvlášť svázaná výkresová dokumentace