



Diplomová práce

Zvlákňovací elektroda s převíjeným páskem pro výrobu plošného nanovláknenného materiálu metodou zvlákňování ve střídavém elektrickém poli

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Bc. Ondřej Vele

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Komárek, Ph.D.

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Zvlákňovací elektroda s převíjeným páskem pro výrobu plošného nanovláknenného materiálu metodou zvlákňování ve střídavém elektrickém poli

Jméno a příjmení:

Bc. Ondřej Vele

Osobní číslo:

S22000232

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Zadávající katedra:

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Akademický rok:

2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši známých typů elektrod pro výrobu nanovláken ve střídavém elektrickém poli.
2. Proveďte analýzu elektrického pole elektrody s převíjeným páskem.
3. Navrhněte dávkovací systém polymerního roztoku.
4. Vypracujte konstrukční návrh elektrody včetně výrobní dokumentace a případně experimentálně ověřte funkčnost navrženého zařízení.

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

Seznam odborné literatury:

- [1] LUKÁŠ, David. *Nanovlákná: teorie, technologie a použití*. Vydání první. B.m.: Academia, 2023. Gerstner. ISBN 978-80-200-3400-7.
- [2] 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
- [3] LIN, Tong a Xungai WANG. *Needleless electrospinning of nanofibers: technology and applications*. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2014. ISBN 978-981-4316-35-4
- [4] 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
- [5] Manuál komerčního softwaru Ansys Electronics

Vedoucí práce: Ing. Jiří Komárek, Ph.D.
Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Datum zadání práce: 21. listopadu 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 31. května 2025

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

L.S.

doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.
garant studijního programu

Prohlášení

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

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

NÁZEV PRÁCE

Zvlákňovací elektroda s převíjeným páskem pro výrobu plošného nanovláknenného materiálu metodou zvlákňování ve střídavém elektrickém poli

ANOTACE

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí zvlákňovací elektrody s převíjeným páskem pro výrobu plošného nanovláknenného materiálu metodou zvlákňování ve střídavém elektrickém poli. V rámci práce byl proveden návrh konstrukce zvlákňovací elektrody a navržení systému nanášení polymerního roztoku. Byly provedeny analýzy intenzity elektrického pole pro návrh páskové elektrody. V rámci analýzy intenzity elektrického pole byla sledována jeho hodnota pro určení zvlákňovacího napětí. Pro následnou výrobu byla vypracována výkresová dokumentace.

Klíčová slova: zvlákňování ve střídavém elektrickém poli, nanášení polymeru, intenzita elektrického pole, napětí

TITLE

Spinning electrode with a rewound tape for the production of flat nanofibrous material by the method of spinning in an alternating electric field

ANNOTATION

The presented diploma thesis deals with the design and construction of a spinning electrode with a rewound tape for the production of flat nanofibrous material by the method of spinning in an alternating electric field. As part of the work, the design of the construction of the spinning electrode and the design of the polymer solution application system were carried out. Analyzes of the electric field strength were performed for the design of the strip electrode. As part of the analysis of the electric field intensity, its value was monitored to determine the spinning voltage. Drawing documentation was developed for subsequent production.

Key words: spinning in an alternating electric field, polymer deposition, electric field strength, voltage

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svým rodičům za to, že mě po dobu studia podporovali. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Komárkovi, Ph.D. a panu doc. Ing. Janu Valterovi, Ph.D. Děkuji za jejich odborné vedení a za poskytnutí cenných rad, podkladů pro vypracování práce a také za jejich čas, který mi věnovali.

OBSAH

| | |
|---|----|
| SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ..... | 10 |
| 1 Úvod | 12 |
| 2 Rešerše známých typů elektrod pro výrobu nanovláken ve střídavém elektrickém poli 13 | |
| 2.1 Historie výroby nanovláken | 13 |
| 2.2 Technologie pro výrobu nanovláknenných materiálů..... | 14 |
| 2.2.1 Zvlákňování stejnosměrným elektrickým proudem | 15 |
| 2.2.2 Střídavé elektrické zvlákňování..... | 15 |
| 2.3 Zvlákňovací elektrody | 16 |
| 2.3.1 Stacionární elektrody | 16 |
| 2.3.2 Nestacionární elektrody | 17 |
| 3 Návrh zvlákňovací elektrody s převíjeným páskem..... | 18 |
| 3.1 Pásková elektroda | 19 |
| 3.2 Řemenice | 20 |
| 3.3 Hřídele | 21 |
| 3.4 Pohon zařízení..... | 22 |
| 3.5 Stojny | 23 |
| 3.6 Kryty | 23 |
| 3.7 Stínící tyče | 24 |
| 3.8 Stínící disk | 24 |
| 3.9 Napínání elektrody..... | 25 |
| 4 Návrh systému nanášení polymerního roztoku | 26 |
| 4.1 Nanášení jednou tryskou..... | 26 |
| 4.2 Nanášení polymerního roztoku soustavou trysek | 27 |
| 4.3 Nanášení válečkem | 28 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.4 | Nanášecí průvlak..... | 29 |
| 4.5 | Výběr řešení nanášení polymeru..... | 30 |
| 4.6 | Stírání polymerního roztoku | 31 |
| 5 | Analýza elektrického pole elektrody s převíjeným páskem | 31 |
| 5.1 | Analýza rozložení intenzity elektrického pole v okolí elektrody | 32 |
| 5.1.1 | Výsledky simulace pro optimální šířku páskové elektrody | 41 |
| 5.2 | Analýza rozložení intenzity elektrického pole se stínícími tyčemi | 43 |
| 5.2.1 | Výsledky analýzy páskové elektrody se stínícími tyčemi | 50 |
| 5.3 | Simulace stínících disků | 52 |
| 5.3.1 | Výsledky 3D simulace..... | 55 |
| 6 | Závěr..... | 56 |
| 7 | Zdroje: | 59 |
| 8 | Seznam příloh..... | 60 |

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

| Označení | Význam | jednotka |
|----------|----------------------------------|----------|
| a | Tloušťka elektrody | Mm |
| b | Šířka páskové elektrody | mm |
| C | Dynamická únosnost ložiska | N |
| C_0 | Statická únosnost ložiska | N |
| d | Vzdálenost od okolí | mm |
| D | Průměr řemenice | Mm |
| F_A | Axiální zatížení ložiska | N |
| F_{A1} | Axiální síla na ozubeném kole 1 | N |
| F_{A2} | Axiální síla na ozubeném kole 2 | N |
| F_R | Radiální zatížení ložiska | N |
| F_{R1} | Radiální síla na ozubeném kole 1 | N |
| F_{R2} | Radiální síla na ozubeném kole 2 | N |
| F_{t1} | Tečná síla na ozubeném kole 1 | N |
| F_{t2} | Tečná síla na ozubeném kole 2 | N |
| h | Vzdálenost od digestoře | mm |
| i | Převodový poměr | [-] |
| t_p | Tloušťka vrstvy polymeru | mm |
| L | Vzdálenost mezi stínícími tyčemi | mm |

| | | |
|----------|--------------------------------|------|
| L_h | Hodinová trvanlivost ložiska | h |
| M | Hnací moment | Nm |
| M_1 | Moment na hnací hřídeli | Nm |
| M_2 | Moment na hnané hřídeli | Nm |
| n | otáčky | ot/s |
| n_p | Otáčky na výstupu z převodovky | ot/s |
| P | Výsledné zatížení ložiska | N |
| R_{AY} | Reakce | N |
| R_{BX} | Reakce | N |
| R_{BY} | Reakce | N |
| R_p | Poloměr stínícího disku | mm |
| R_s | Poloměr stínících tyčí | mm |
| r_l | Poloměr ozubeného kola | mm |
| v | Obvodová rychlost | m/s |
| X | Koeficient | [-] |
| Y | Koeficient | [-] |

1 Úvod

Technologie výroby nanovláken ve střídavém poli, spolu se zvlákňováním stejnosměrným proudem, je jednou ze základních technologií zvlákňování. Využívá se pro výrobu vrstev nanovláken na základový materiál, jako je například netkaná textilie. Tyto materiály lze následně použít například pro výrobu chirurgických roušek, a různých typů filtrů.

Zvlákňování se dělí na dvě základní skupiny. První je zvlákňování pomocí stejnosměrného elektrického proudu a druhá je zvlákňování pomocí střídavého proudu. Zvlákňování stejnosměrným proudem vyžaduje použití druhé elektricky aktivní elektrody (kolektoru), na kterém se zachytávají nanovlákná. Zvlákňování pomocí střídavého proudu použití elektricky aktivního kolektoru nevyžaduje. V tomto případě vzniká, díky střídání fáze proudu, virtuální kolektor.

Úkolem práce je navržení zvlákňovací elektrody s převíjeným páskem pro výrobu plošného nanovláknenného materiálu metodou zvlákňování ve střídavém elektrickém poli. Jedná se o inovativní design elektrody, která má přinést určité výhody, především nanášení rovnoměrné vrstvy nanovláken na podkladovou textili. Toto zahrnuje návrh konstrukce zvlákňovací elektrody, výběr optimální převíjené páskové elektrody a systém nanášení a stírání polymerního roztoku.

Konstrukce zařízení musí splňovat technologické podmínky potřebné pro zvlákňování. Důležité je dodržení vzdálenosti od okolních předmětů a krytů, aby nedošlo k nechtěnému přeskočení elektrického výboje. Dále pak musí být zařízení zcela izolováno od základního rámu a pohonné jednotky. Důvodem je vysoké zvlákňovací napětí o hodnotě 32kV, které je přivedené na elektrodu. Kdyby se toto napětí dostalo na základní rám, mohlo by dojít k úrazu elektrickým proudem.

Dalším krokem je návrh řešení nanášení a stírání polymerního roztoku na páskovou elektrodu. Důvodem je, že běžné způsoby nanášení, jako je brodění jsou v tomto případě neekonomické. Je potřeba velké množství polymerního roztoku. Dalším požadavkem je, aby přebytečný nezvlákněný polymerní roztok nestékal z elektrody a nezanášel stroj.

Následně bude provedena analýza elektrického pole převíjené páskové elektrody, s cílem určit nejvhodnější parametry pro převíjenou páskovou elektrodu. Následně bude řešen průběh intenzity elektrického pole mezi počátkem a koncem zvlákňovacího prostoru.

Účelem analýz je určení nejvhodnějších parametrů pro samotnou páskovou elektrodu, stínící tyče, stínící disky a určení rovnoměrnosti zvlákňování.

2 Rešerše známých typů elektrod pro výrobu nanovláken ve střídavém elektrickém poli

2.1 Historie výroby nanovláken

Historie elektrického zvlákňování sahá poměrně do hluboké historie. Vyšetřování fyzikálních jevů spojených se zvlákňováním sahá až do roku 1600, kdy pan William Gilbert popsal chování magnetických těles a elektrického působení. Roku 1888 navrhl fyzik Charles Vernon Boys torzní váhu pro měření univerzální gravitační konstanty. Konstrukce jeho váhy byla založena na takzvaném torzním vlákne. Boys přemýšlel o výrobě vlákna pomocí, tou dobou málo probádané metody, elektrického zvlákňování. Jedná se o první prokázané použití elektrického zvlákňování. Boysova zvlákňovací aparatura byla sestavena z Petriho misky na elektricky izolované podložce. Do které byla, v roztoku polymeru, vložena jedna z elektrod. Po spuštění elektrického pole se na kraji misky projevila nestabilita a objevil se jev elektrického zvlákňování. Takto získaná vlákna však neměla požadované mechanické vlastnosti pro jeho torzní váhu.

Další metodou je metoda elektrospinningu pro výrobu koaxiálních nanovláken. Pochází z patentové přihlášky [1] pana J. F. Cooleyho z roku 1899. Jeho zařízení bylo sestaveno ze skleněné trubice, která vyúsťuje do trysky malého průměru ve spodní části. Trubice slouží k dopravě polymerních roztoků do jádra trysky.

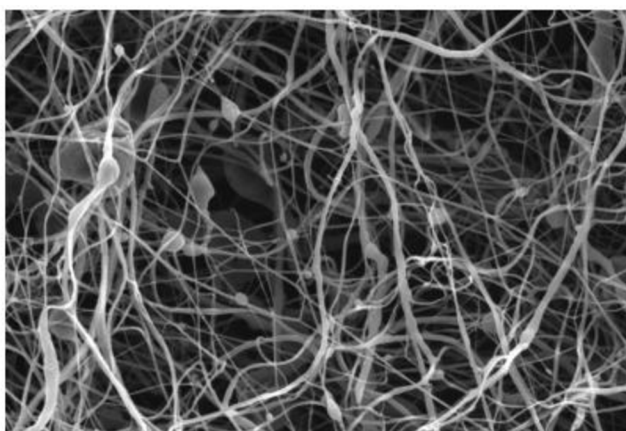
Jehlové zvlákňování má původ v pracích Johna Zeleného z roku 1914. Zelený navrhl rozprašovací zařízení, pro studium elektrických výbojů z takzvaných kapalinových elektrod. Jeho aparát se s drobnými změnami dodnes používá jako základní laboratorní zařízení pro elektrospinning.

Další důležitou osobností pro rozvoj elektrospinningu je A. Formhals a jeho práce z roku 1934. Ta popisuje výrobu nanovlákných pryží. Vlákna byla vytvářena pomocí diskové elektrody a elektricky aktivním diskovým kolektorem. Cílem byla výroba nanovlákné příze pro zpracování běžnými textilními technologiemi.

Žádná z těchto prací a patentů nebyla po zveřejnění použita v průmyslovém měřítku. Nalezení aplikací pro nanovlákná vyráběná elektrickým zvlákňováním trvalo poměrně dlouhou dobu. [2]

2.2 Technologie pro výrobu nanovláknenných materiálů

Pojem nanovlákná nemá zcela jednoznačnou definici. Skládá se z výrazu nano - vyjadřující rozměr, a z výrazu vlákno - útvar délkou výrazně větší než průměrem. Nanovlákná se dostávají pro své vlastnosti a aplikaci i mimo textilní oblast. (Obr. 1)



Obr. 1 Nanovlákná [3]

Stejnoseměrné elektrické zvlákňování a střídavé elektrické zvlákňování patří mezi technologie, které využívají k přeměně zvlákňované kapaliny na nanovlákná elektrické síly. Obě tyto technologie jsou dnes široce rozvíjeny.

Zvlákňování v elektrickém poli je založeno na tom, že se vytvoří potenciálový rozdíl na hladině zvlákňovaného polymerního roztoku, který vybudí takzvanou nadkritickou hodnotu intenzity elektrického pole. Ta způsobí zvýšenou hodnotu elektrického tlaku, který přesáhne tlak kapilární a dojde k hydrodynamické nestabilitě, ta se projeví vznikem polymerních trysek, ze kterých vznikají výsledná nanovlákná. [2] (Obr. 2)



Obr. 2 Vznik nanovláken (nestabilita polymeru a vznik trysky spolu s vláknem) [4]

2.2.1 Zvlákňování stejnosměrným elektrickým proudem

Zvlákňování stejnosměrným proudem, tzv. DC electrospinning je v současnosti nejpoužívanější způsob výroby nanovláken z polymeru.

Principem všech druhů elektrického zvlákňování je dopravení zvlákňovaného polymerního roztoku na pracovní plochu zvlákňovací elektrody ve zvlákňovacím prostoru. Tento prostor je u stejnosměrného zvlákňování vymezen dvěma elektrodami. Elektroda, na kterou se přivádí polymerní roztok je zvlákňovací a vytváří se na ní polymerní trysky, přes které vstupuje polymer do zvlákňovacího prostoru. Druhá elektroda se nazývá kolektor, na ní se zachytávají vzniklá vlákna. Mezi těmito elektrodami je nastaven rozdíl elektrických potenciálů pomocí zdroje vysokého napětí. Za nejjednodušší případ stejnosměrného elektrického zvlákňování lze považovat zařízení se zvlákňovací jehlou. Získaný materiál je vrstva vláken s náhodnou orientací. [2, 7]

2.2.2 Střídavé elektrické zvlákňování

V poslední době se rozvíjí zvlákňování pomocí střídavého zdroje elektrického proudu, zvané také AC electrospinning. U prvních pokusů byly používány podobné sestavy zvlákňovacích zařízení jako u stejnosměrného elektrického zvlákňování, tedy se zvlákňovací elektrodou a elektricky aktivním kolektorem. Až později se zjistilo, že pro střídavé elektrické zvlákňování není potřeba elektricky aktivní kolektor. Toto zjištění přineslo technologické výhody a nová řešení, která byla u DC electrospinningu obtížná.

Trysky u střídavého elektrického zvlákňování vznikají za pomoci opačně nabitých částí nanovláken vzniklých v předešlé půlplně. Tyto úseky vytváří pro nově vznikající trysky

virtuální protielektrodu. Trysky jsou k protielektrodě přitahovány až do vzdálenosti zhruba tři centimetrů, což je poháněcí silou pro pohyb trysek. Ve větší vzdálenosti jsou nanovláknena nesena proudem souhlasně nabitých iontů, také nazývaným elektrický vítr, až do vzdálenosti kolem třiceti centimetrů. Při dosažení této vzdálenosti se už nanovláknenná vlečka musí zachytit a odvádět, protože dál už převáží působení gravitace a vlečka začne padat dolů. [2, 5]

2.3 Zvlákňovací elektrody

Zvlákňovací elektrody jsou klíčovou částí zvlákňovacího zařízení. Jejich úkolem je zajištění stabilních podmínek pro vznik nanovláken. Jde o zajištění destabilizace a vznik polymerních trysek, vytvářejících nanovláknena, pomocí působení elektrických sil. Tyto síly vznikají díky rozdílu elektrického potenciálu mezi kolektorem a elektrodou.

Konstrukce elektrod musí splňovat určité podmínky.

- Přivedení vysokého střídavého nebo stejnosměrného napětí
- Přivedení polymerního roztoku
- Udržení konstantní hodnoty nadkritické intenzity elektrického pole ve zvlákňovací oblasti elektrody

2.3.1 Stacionární elektrody

U tohoto typu elektrod je polymerní roztok přiváděn tělem elektrody do zvlákňovacího prostoru. Stacionární elektrody mohou být přeplavované polymerním roztokem. Při zvlákňování ale nedojde ke zvlákňování celého objemu polymerního roztoku, a zbytkový roztok polymeru přeteče bez zvlákňování. Následně se opět odvádí do zásobníku. Roztok je dopravován většinou pomocí čerpadla do zvlákňovací oblasti, kde volně vytéká na povrch elektrody a dále stéká po jejím povrchu. Je tedy přiváděno více roztoku než vyžaduje zvlákňování. Toto zajišťuje čištění povrchu elektrody. [2]

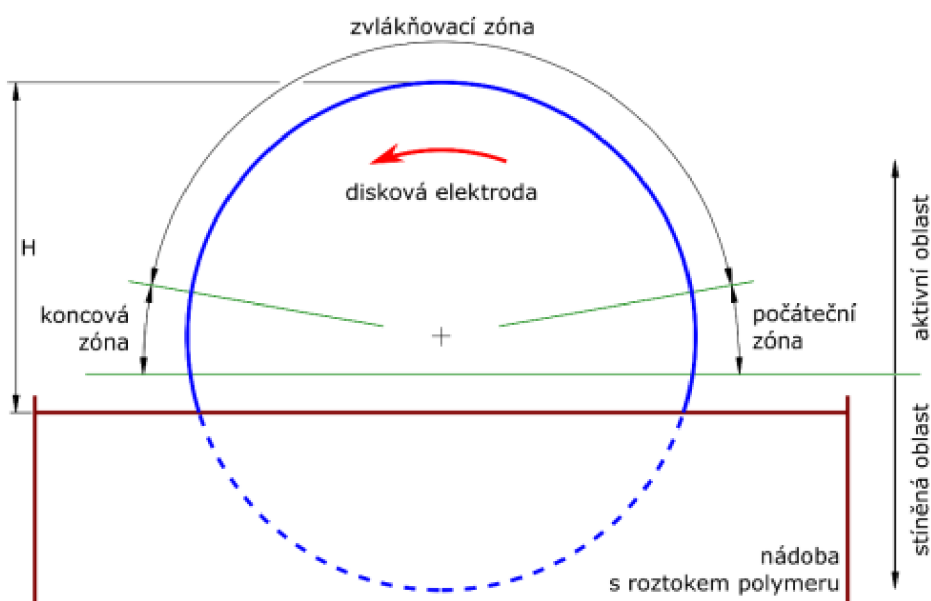
Jedním z typů stacionárních elektrod jsou tyčové elektrody. Ty mají většinou přeplavovací hlavu, po které se přeplavuje roztok polymeru. Jsou složeny ze zásobníku polymeru, šnekového čerpadla a zvlákňovací hlavy. Zvlákňovací hlavy jsou rotačně symetrické s osou dopravování polymeru. Dopravovaný polymerní roztok přetéká přes

zvlákňovací hlavu, která má konstrukčně navržené hrany pro vytvoření nadkritické intenzity elektrického pole. Na těchto místech pak vznikají vlákna. Přebytný polymer stéká zpět do zásobníku, čímž zároveň zajišťuje čištění elektrody. [6]

2.3.2 Nestacionární elektrody

U těchto elektrod se polymerní roztok dopravuje do nanášecího zásobníku. Odtud je dopravován do zvlákňovacího prostoru pomocí pohybu samotné elektrody. Zvlákňovací část elektrody se při pohybu noří do roztoku, který ulpí na jejím povrchu a je vnesen do zvlákňovacího prostoru, kde dojde ke zvláknění. Čištění povrchu elektrody se provádí periodickým ponořováním do zásobníku s roztokem polymeru. [2]

Jedním z typů nestacionárních elektrod je Disková elektroda. Jedná se o tenký disk, který rotuje kolem své horizontální osy. (Obr.3) Jeho malá tloušťka zajišťuje na ostré hraně nadkritickou hodnotu intenzity elektrického pole, která je potřeba k tvorbě vláken. Disk je částečně ponořen do polymerního roztoku, a jeho rotací dochází ke kontinuálnímu nanášení polymeru. K tvorbě vláken dochází v aktivní oblasti s nadkritickou intenzitou pole. V oblasti zásobníku polymeru intenzita klesá pod kritickou hodnotu, a ke zvláknění nedochází, z důvodu shodného elektrického potenciálu polymerního roztoku a elektrody. Pomocí otáček lze nastavit dobu, po kterou je polymer v aktivní oblasti. [4]

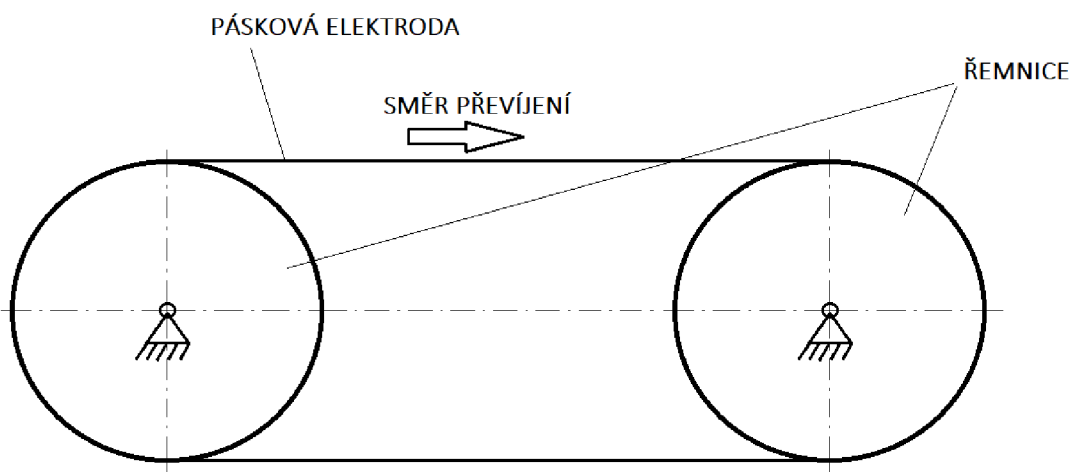


Obr. 3 Schematické znázornění diskové elektrody [4]

3 Návrh zvlákňovací elektrody s převíjeným páskem

Úkolem práce bylo navržení konstrukce převíjecího zařízení páskové elektrody, která by umožňovala převíjení a zvlákňování s použitím elektrody ve formě kovového nekonečného pásku. Na tento pásek bude nanášen polymerní roztok, který se bude rovnoměrně rozvádět ve své horní větvi na pracovní šířku, která odpovídá šířce netkané podkladové textilie, která bude převíjená nad elektrodou. Elektroda je pohyblivá část, a tak není možné přivést vysoké napětí přímo na elektrodu. Napětí bude tedy přivedeno na pevné části, jako je ložiskový domek, a přes kovové díly se napětí dostane až na elektrodu. Od této konstrukce se očekává možnost nanášení nanovláken na podkladovou plochu rovnoměrně v celé šíři podkladové textilie. Zařízení se skládá ze tří hlavních dílů, dvou řemenic a páskové elektrody. (Obr.4)

Během procesu zvlákňování vznikají po délce zvlákňovací páskové elektrody z polymerního roztoku nanovlákná, která jsou nanesena na netkanou textili. Produktem je rovnoměrná vrstva nanovláken nanesená na celé šířce podkladové textilie. Produkt může sloužit k výrobě filtrů, roušek a dalším aplikacím v medicínském průmyslu.



Obr.4 Základní schéma

Konstrukce musí splňovat požadavky na izolaci napětí od okolí, odstínění elektrického pole v oblasti dolní větve elektrody, usměrnění zvlákňování stínícími disky, dále musí umožňovat také napínání páskové elektrody. Dalšími požadavky je rychlost převíjené

elektrody kolem 1m/s, odizolování pohonu od částí elektrody pod napětím a nanesení a setření polymerního roztoku.

Části zařízení, na které je přivedeno zvláknovací napětí, jako je pásková elektroda, kryty a stínící disky, musí být dostatečně izolovány od okolí a pohonu. To je důležité z hlediska bezpečnosti a zabránění zničení pohonu.

Stínění v oblasti dolní větve páskové elektrody slouží k zamezení nechtěnému zvláknování zbylého polymerního roztoku, který se nestihl dokonale zvláknit na horní větvi.

Stínící disky mají zamezit zvláknování v místě, kde elektroda s vrstvou polymeru opouští oblast odstíněnou kryty. To by mělo za následek ulpívání vláken a zanesení zařízení. Disky tedy odstiňují počátek a konec zvláknovacího prostoru, tak aby vznikající nanovláknina nemohla ulpívat na zařízení a byla všechna nanesena na podkladovou textilii.

Zařízení musí umožnit napínání převíjené elektrody, pro přenos výkonu na páskovou elektrodu. Montáž páskové elektrody v předepnutém stavu je nevhodná a ze zástavbových důvodů není možné umístění napínací kladky.

Pohon musí být také odizolován od součástí pod napětím. Důvodem je, že při případném přenosu napětí na motor s převodovkou, by došlo ke zničení motoru.

Polymerní roztok je do zařízení přiveden pomocí hadičky a čerpadla. Dávkování roztoku je zajištěno nanášecím a stíracím systémem.

Zařízení funguje na principu pásového dopravníku, kdy je na jedné straně nanesen polymerní roztok, který prochází zvláknovací oblastí. Na druhé straně jsou případně zbytky polymerního roztoku setřeny.

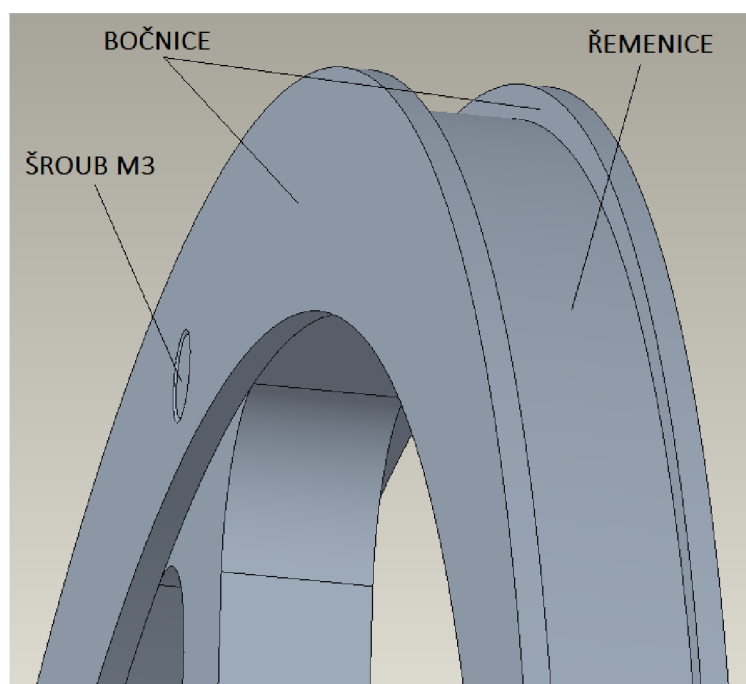
3.1 Pásková elektroda

Nejprve bylo potřeba najít firmu, která by pásek vyrobila. U páskové elektrody je velmi důležitý požadavek na dokonalé začištění svaru tak, aby byl neznatelný. To je důležité pro samotné zvláknování, kdy by se na nedokonale začištěných hranách koncentrovalo napětí, a zvyšovala by se intenzita elektrického pole. To by mělo za následek nerovnoměrné zvláknování v okolí spoje. Ale hlavně by nekvalitně začištěný svar neprošel stíracím zařízením. Dále by nekvalitní svar mohl prasknout. Z těchto důvodů byl vybrán pásek od firmy Pilana s.r.o, Žižkova 335, Hulín. Tato firma se zabývá výrobou pilových pásů pro

pásové pily a mají zkušenosti se svařováním a začištěním svarů na pilových pásech. Svar je tedy kvalitní a určen pro stejně náročné úkoly na pásové pile. S touto firmou byla dohodnuta výroba dvou nekonečných pásků vybraných z jejich katalogu. Firma nabízí pásy široké 6, 8, 10, 12, 15, 20 mm a další. Nakonec bylo rozhodnuto o použití pásků šířky 10 mm s tloušťkou 0,4mm, a druhý široký 6 mm s tloušťkou 0,5 mm.

3.2 Řemenice

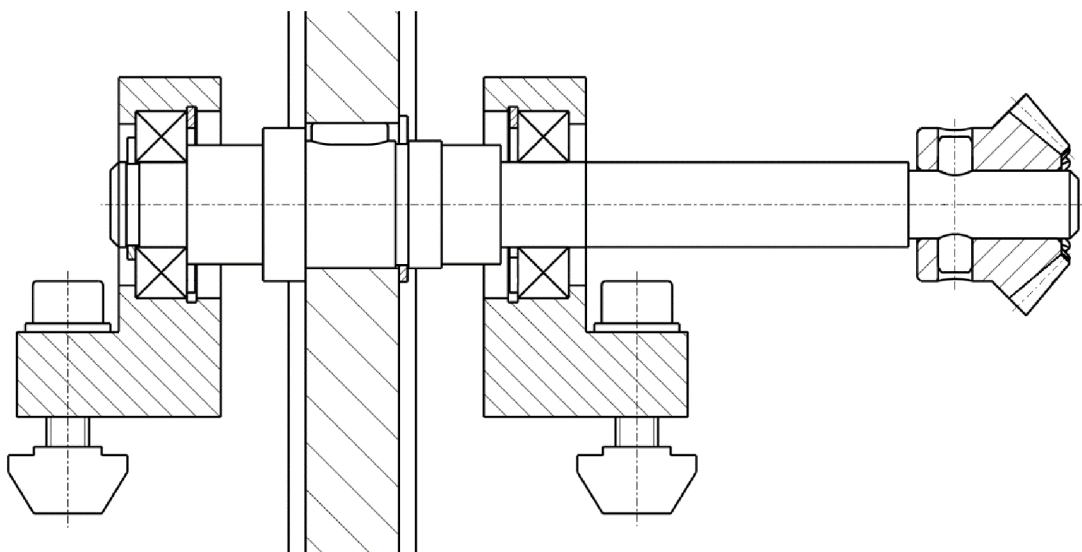
Výrobce byl doporučen průměr řemenic minimálně 300mm. Já jsem zvolil průměr 320 mm. Řemenice byly navrženy jako výpalky na laseru z 11 mm ocelového plechu s bočnicemi pro zamezení sklouznutí pásku z řemenice. Bočnice jsou také výpalky na laseru z 2 mm ocelového plechu, které jsou k řemenici vždy šroubovány pomocí čtyř šroubů M3 se zapuštěnou hlavou (Obr.5). Přenos výkonu z hřídele je zajištěn perem a axiální posuv pojistným kroužkem.



Obr.5 Řemenice

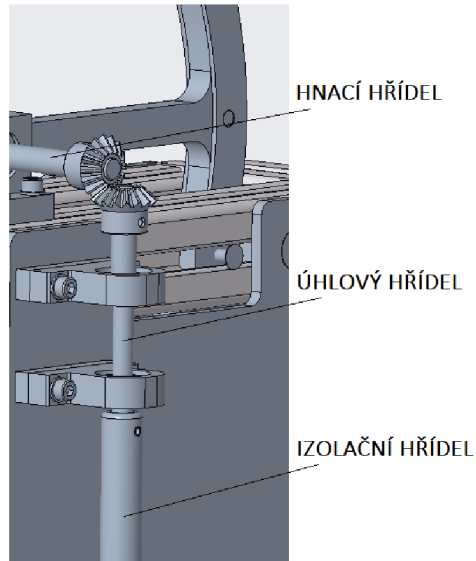
3.3 Hřídele

Hřídele jsou v zařízení dva. Jeden pro hnací řemenici a druhý pro hnanou řemenici. Uložení hřídelů je standardní, tedy jedno ložisko je uloženo pevně na hřídeli i na rámu a druhé je uloženo pevně na rámu s možností axiálního posunu hřídele. Kontrola únosnosti ložiska na axiální zatížení viz. Příloha VII. Hnací hřídel je na jednom konci osazen kuželovým ozubeným kolem pro změnu orientace osy přenášejí výkon na hřídel. Kuželová kola jsou spojena s hřídelem pomocí pružného kolíku, z důvodu jednoduchosti a není potřeba přenášet velké výkony. (Obr.6)



Obr.6 Uložení hnacího hřídele a kuželového ozubeného kola

Toto je realizováno pomocí krátkého (úhlového) hřídele, na který je připojen izolační hřídel pro izolování napětí od motoru. Když je izolační hřídel delší než 300mm není potřeba na hřídeli připravovat vlnovec. Hřídel je ke krátkému hřídeli připojen také pomocí pružného kolíku. (Obr.7)



Obr.7 Úhlový hřídel

3.4 Pohon zařízení

Na základě laboratorních zkušeností byl dán požadavek, aby rychlost převíjení páskové elektrody byla cca 1 m/s \pm 25%.

Nominální otáčky motoru: $n = 373 \text{ ot/min} = 6,216 \text{ ot/s}$

Převodový poměr: $i = 7,5$

Průměr řemenice: $D = 320\text{mm} = 0,32 \text{ m}$

Otáčky na výstupu z převodovky:

$$n_p = \frac{n}{i} = \frac{6,216}{7,5} = 0,828 \text{ ot/s}$$

Obvodová rychlost = rychlost převíjení elektrody:

$$v = \pi * D * n_p = \pi * 0,32 * 0,828 = 0,83 \text{ m/s}$$

Motor byl vytipován od firmy Minimotor. Typ motoru MC244PT s integrovanou převodovkou s převodovým poměrem 7,5 a momentem 1,2 Nm. Výsledná obvodová rychlost převíjené elektrody je vyhovující. V případě potřeby úpravy a doladění rychlosti převíjení elektrody lze potřebnou změnu rychlosti zajistit samotným asynchronním motorem.

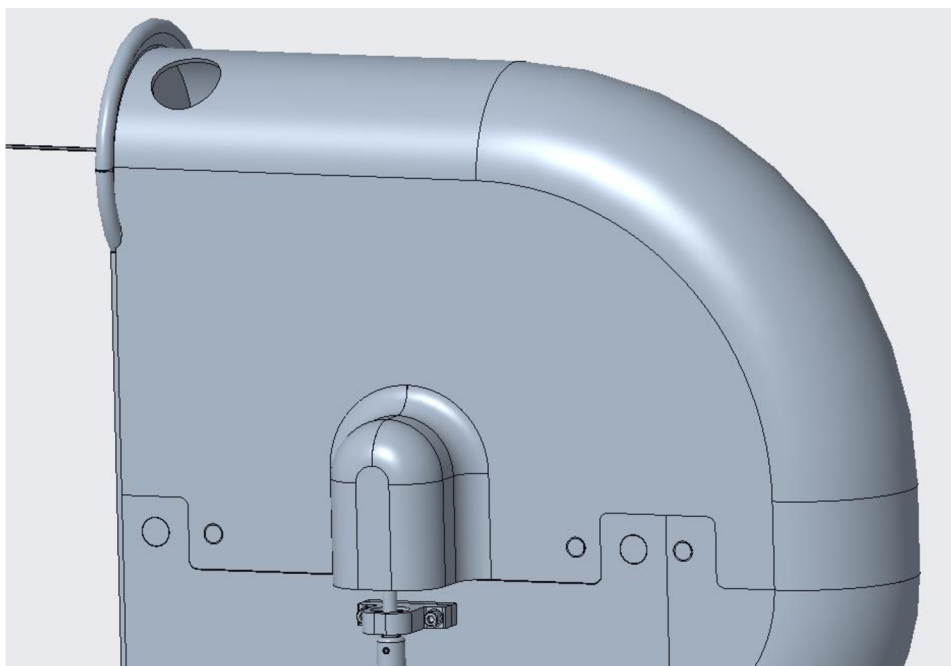
3.5 Stojny

Stojny jsou vyrobeny z 5mm silné desky z polykarbonátu, z důvodu potřeby izolace napětí od rámu zařízení. Vzdálenost součástí pod zvlákňovacím napětím, které je 32kV, od ostatních dílů musí být minimálně 300mm aby nedošlo k přeskoku elektrického výboje na rám. Na odizolování 1kV je potřeba cca 10mm vzduchu. V modelu je tato minimální vzdálenost 316 mm.

3.6 Kryty

Zařízení je z velké části krytováno z důvodu zamezení zvlákňování případných zbytků polymeru mimo zvlákňovací zónu, a tedy nadměrnému znečištění zařízení. Na kryty je přivedeno napětí stejné velikosti jako na elektrodu, tedy zvlákňovací napětí. Tím se pod kryty zamezí vzniku kritické intenzity elektrického pole, a nebude tedy docházet ke zvlákňování. Kryty nesmí mít vnější ostré hrany, kde by se koncentrovalo napětí. (Obr.8) V případě koncentrace napětí na ostrých hranách by došlo k dosažení průrazného napětí a k uvolnění energie ve formě elektrického výboje do okolí.

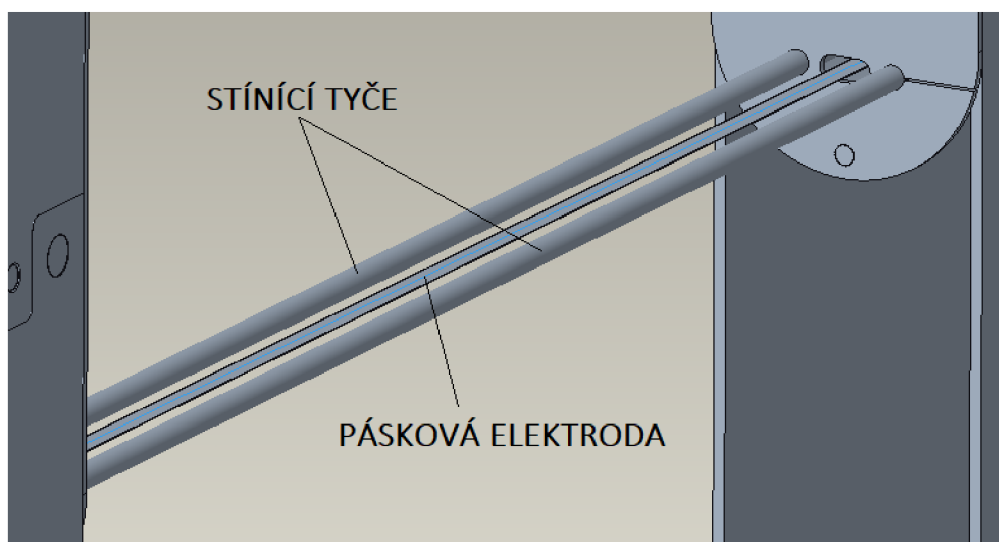
Kryty byly navrženy jako díl vyrobený pomocí 3D tisku a pro zajištění potřebné vodivosti je potažen hliníkovou folií.



Obr.8 Kryt

3.7 Stínící tyče

Stínící tyče jsou tyče rovnoběžné s převíjenou elektrodou v její těsné blízkosti. Jejich účel je stejný jako u krytů, tedy zamezit nechtěnému zvlákňování z dolní větve elektrody. Jedná se o kovové tyče, které stejně jako kryty, snižují intenzitu elektrického pole na elektrodě. (obr.9)

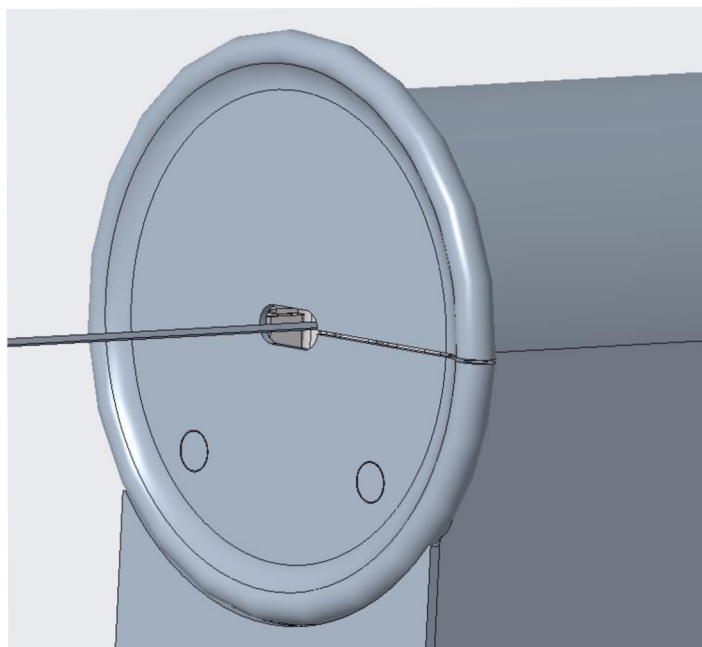


Obr.9 Stínící tyče

3.8 Stínící disk

Stínící disk je určen k zamezení zvlákňování na samém okraji zvlákňovacího prostoru. Důvodem je zamezení dalšímu znečištění zařízení od vláken, která by se přichytila na kryty. Na disku pod napětím, kterým prochází elektroda, vzniká stínění, které s narůstající vzdáleností od disku slábne, až dojde k překročení kritické intenzity elektrického pole a dojde ke zvlákňování. (Obr. 10)

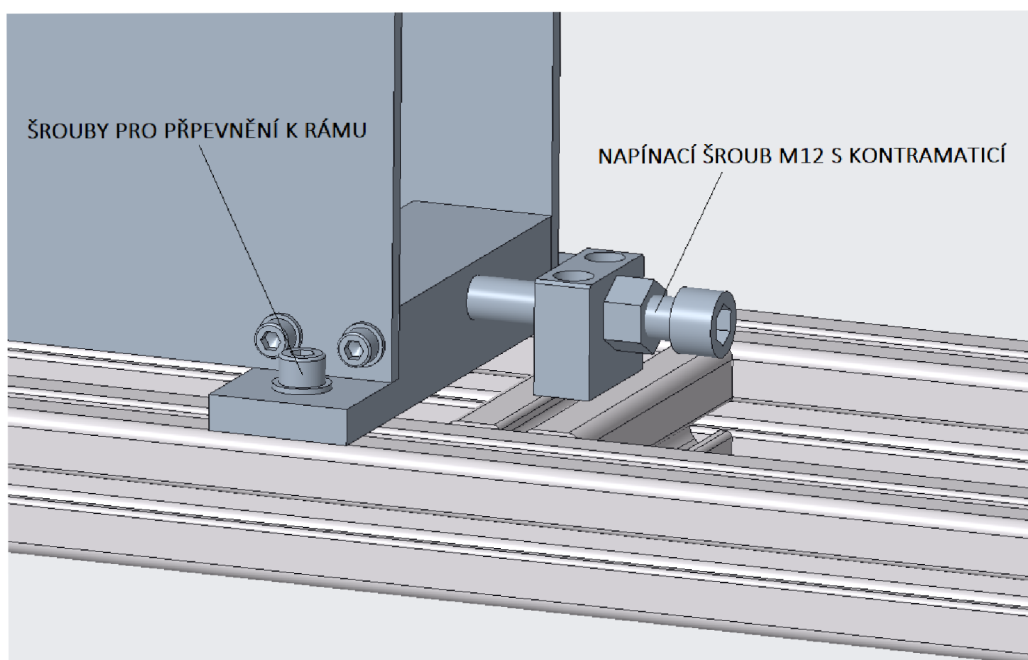
Vzdálenost od disku, kde začne docházet ke zvlákňování, nelze určit samotným výpočtem. Zjistí se tak, že na prototypu zařízení se určí minimální napětí, při kterém dojde ke zvlákňování. Pak se s touto hodnotou napětí propočítá matematický model, ze kterého lze následně tuto vzdálenost určit.



Obr.10 Stínící disk

3.9 Napínání elektrody

Pro provoz stroje je potřeba, aby elektroda byla dostatečně napnutá pro zamezení prokluzu a pro dostatečný přenos výkonu. Napínání je řešeno pomocí šroubu, kterým se celá jedna část zařízení odtlací a následně připevní ke spodnímu rámu. (Obr.11)



Obr.11 Napínání elektrody

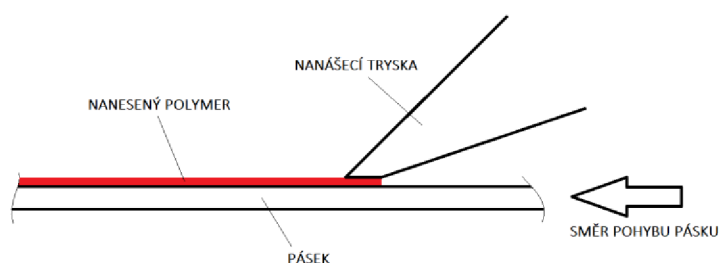
4 Návrh systému nanášení polymerního roztoku

Pro zvláknovací proces je potřeba zajistit dodávání polymeru do pracovní zóny elektrody. Zde je elektroda v podobě kovového pásku, není tedy možné použít klasické způsoby nanášení polymeru jako je brodění. To by bylo nevhodné z důvodu potřeby velkého množství polymeru. U dražších polymerních roztoků by se jednalo o neekonomické řešení. Polymerní roztok by se také dostával na ostatní části zařízení, po kterých by stékal. Stékání polymeru je nežádoucí jev z důvodu znečištění stroje. Dále pak z důvodu dobré vodivosti polymerních roztoků. Ty by byly schopny po ztečení uzavřít obvod s díly, které nemají být pod napětím. Bylo tedy potřeba vytvořit jiný způsob nanášení polymeru.

Polymer je potřeba nanést na plochy pásku tak, aby v ideálním případě nestékal. Protože zvláknovat se polymer bude na hranách pásku, kde bude nadkritická intenzita elektrického pole.

4.1 Nanášení jednou tryskou

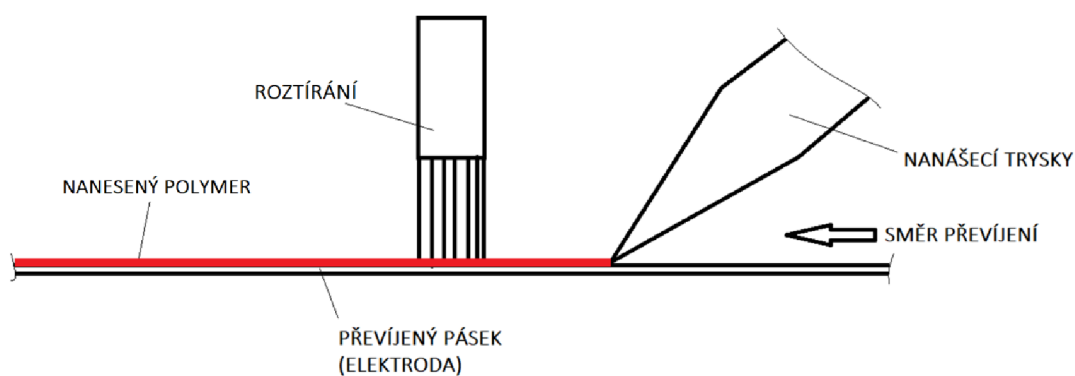
Je to způsob nanášení polymeru jednou tvarovou tryskou (Obr.12). Ta přivádí polymer na pásek, kde se pomocí tvaru trysky nanese v celé šíři pásku. Nevýhodou je, že v místě nanášení může stékat z pásku. Toto je nežádoucí jev, kterému chceme zabránit, protože by znečistil stroj a mohlo by pak docházet také ke zvláknování na jiných místech, kde je to nežádoucí. Polymer dobře vede napětí, a to je důvodem proč nechceme, aby ulpíval na částech stroje, které nemají být pod napětím. Mohlo by dojít k uzavření obvodu s rámem zařízení. To by bylo nebezpečné pro obsluhu zařízení.



Obr.12 Nanášení polymeru tryskou

4.2 Nanášení polymerního roztoku soustavou trysek

Princip je podobný jako v předchozím případě. Polymerní roztok je zde však nanášen soustavou tenkých trysek na pásek, kde je následně ještě rozetřen pomocí štětce na celou plochu. (Obr.13) Tato konstrukce je výhodnější z pohledu tenkých trysek, kde vytéká více tenkých proudů polymerního roztoku. Ty jsou následně lehce rozetřeny, aby se vytvořil polymerní film na povrchu elektrody.

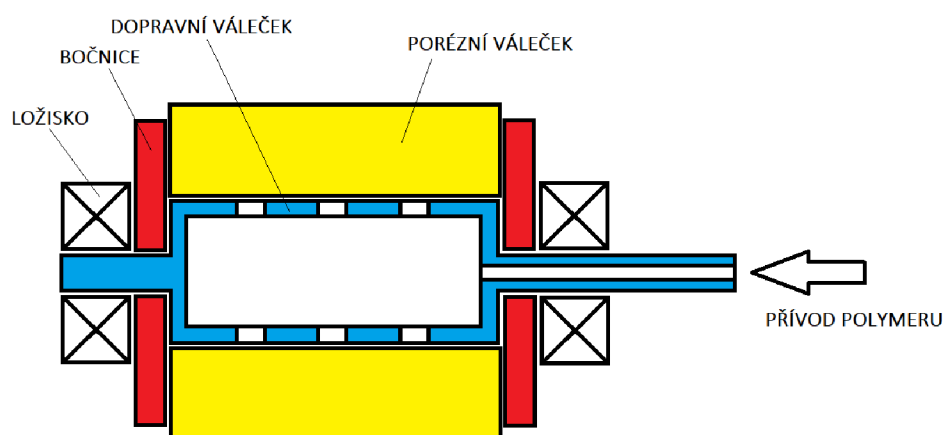


Obr.13 Soustava nanášecích trysek

4.3 Nanášení válečkem

Toto nanášení vychází z malířského válečku. Zde ale váleček není namáčen do polymerního roztoku, ale polymerní roztok je přiváděn vnitřkem duté hřídele dovnitř dopravního válečku. Z dopravního válečku roztok prosakuje porézním válečkem na jeho povrch. Zde se odvaluje po páskové elektrodě a nanáší polymer. (Obr.14)

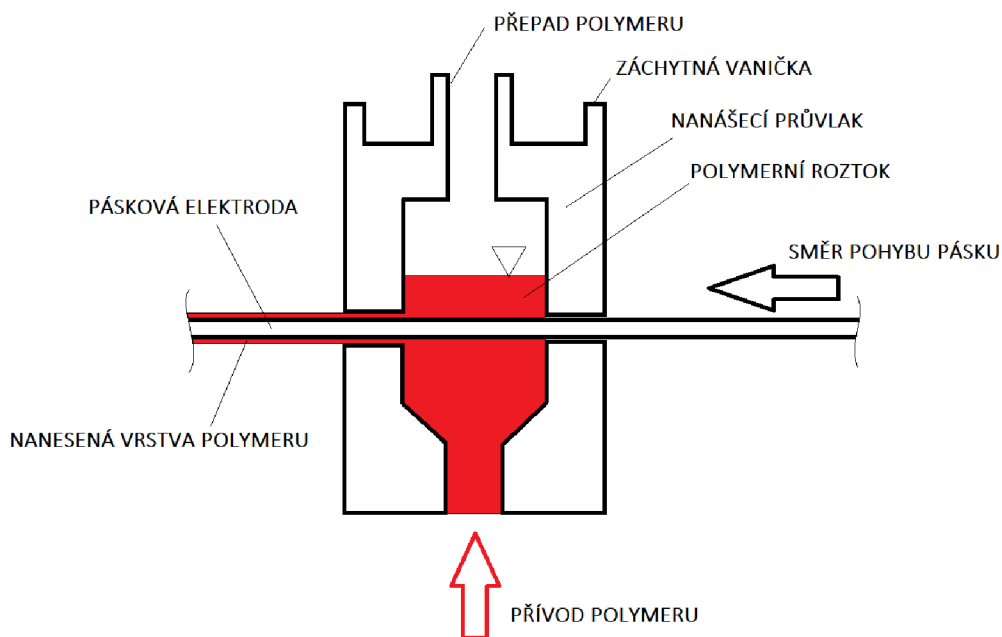
Tato konstrukce umožňuje nanést slabé vrstvy polymeru bez velkého stékání polymerního roztoku, ale je velmi složitá. Samotný dopravní váleček je možné vytisknout na 3D tiskárně, ale následně je nutné zajistit rotační spojení a těsnost s dopravní hadičkou.



Obr.14 Nanášecí váleček

4.4 Nanášecí průvlak

Jedná se o způsob nanášení polymeru pomocí nádoby s přesně definovaným otvorem, skrz který prochází pásková elektroda. Pásek prochází nanášecí nádobkou, kde se aplikuje polymerní roztok. Tloušťka nanesené vrstvy polymerního roztoku je definována velikostí výstupního otvoru nádoby. Tento otvor je větší o dvojnásobek tloušťky požadované vrstvy. Vstupní otvor je přesný podle rozměrů páskové elektrody, aby nedocházelo k vytékání polymerního roztoku na opačné straně. Výhodou tohoto způsobu nanášení je, že polymerní roztok je nanesen na všechny plochy páskové elektrody. Tento způsob má také výhodu v přívodu malého objemu drahého materiálu, který se připravuje pomocí kyselin a rozpouštědel, před kterými se musí obsluha chránit. Vzniká tedy méně nebezpečných výparů, které se musí odvádět. (Obr.15)



Obr.15 Nanášecí průvlak

4.5 Výběr řešení nanášení polymeru

Navržené varianty řešení nanášení polymerního roztoku:

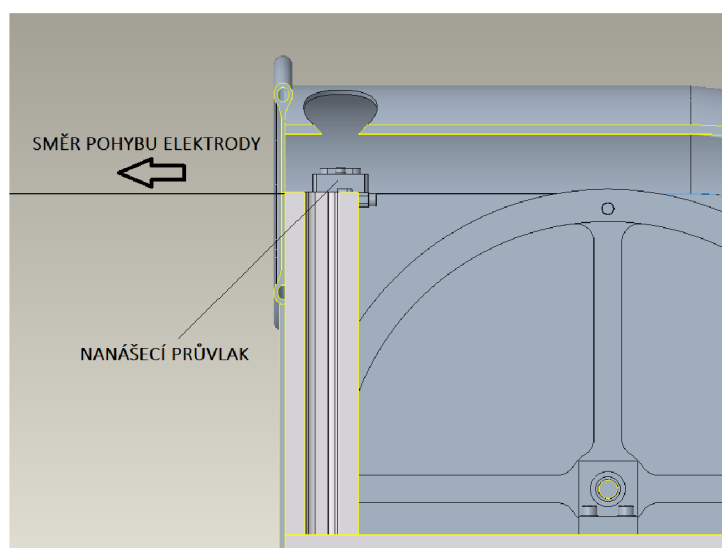
1. Nanášení tvarovou tryskou
2. Nanášení soustavou trysek s následným rozetřením
3. Nanášení nanášecím válečkem
4. Nanášení průvlakem

Nanášení tvarovou tryskou by bylo náročné na seřízení optimálního množství dodávaného polymeru, aby neztékal z elektrody.

Soustava trysek by byla relativně jednoduchá, ale byl by problém s čištěním tenkých trysek. Dále by byl problém nastavit optimální množství dodávaného polymeru, aby se rozetřel, ale neztékal z elektrody.

Varianta s nanášecím válečkem by byla příliš složitá jak z konstrukčního hlediska, tak z hlediska čištění. Dále by byl problém s těsností a spojením se zásobníkem polymeru. V případě utěsnění by mohlo dojít ke vzniku takového odporu v těsnění, že by se váleček přestal po elektrodě odvalovat a začal se smýkat.

Vybral jsem variantu nanášení polymeru pomocí průvlaku. Důvodem byla relativně jednoduchá konstrukce. Dále polymer významně nestéká z elektrody. Nepotřebný polymer není vystaven atmosférickým podmínkám a nezasychá. Při odstávce lze průvlak jednoduše rozebrat a vyčistit. Polymer je nanesen na všechny plochy páskové elektrody. (Obr.16)

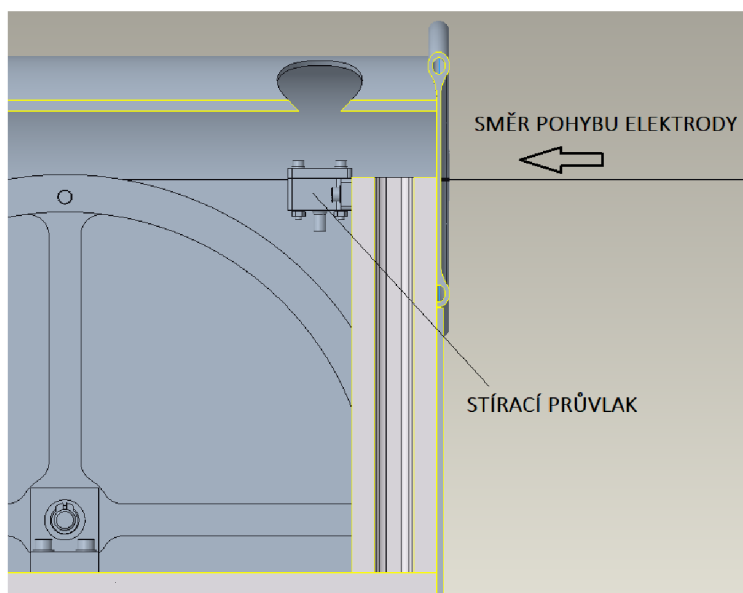


Obr. 16 Nanášecí průvlak

4.6 Stírání polymerního roztoku

Polymerní roztok, který se při zvláknovacím procesu nezvlákne je potřeba opět z elektrody odstranit. Důvodem je, aby nedocházelo ke stékání nezvlákněného roztoku a nedocházelo ke znečištění stroje. Potom by mohl roztok stéci na součásti odizolované, a protože polymerní roztok dobře vede napětí, mohl by propojit obvod s rámem. To by mohlo mít za následek vážný úraz způsobený elektrickým proudem.

Zbytkový polymer je stírán průvlakem s otvorem, který přesně odpovídá převíjené páskové elektrodě, v zadní části. Zde je polymerní roztok setřen a odváděn zpět do zásobníku polymerního roztoku. (Obr.17)



Obr.17 stírací průvlak

5 Analýza elektrického pole elektrody s převíjeným páskem

Analýza slouží pro určení optimální šířky pásku pro elektrodu. Kritériem je intenzita elektrického pole, která se na páskové elektrodě vytvoří při přivedení zvláknovacího napětí. Pro zvláknování musí být intenzita elektrického pole co vyšší než kritická intenzita. Základní úlohou je určení šířky pásku, tedy bez stínění spodní větve páskové elektrody.

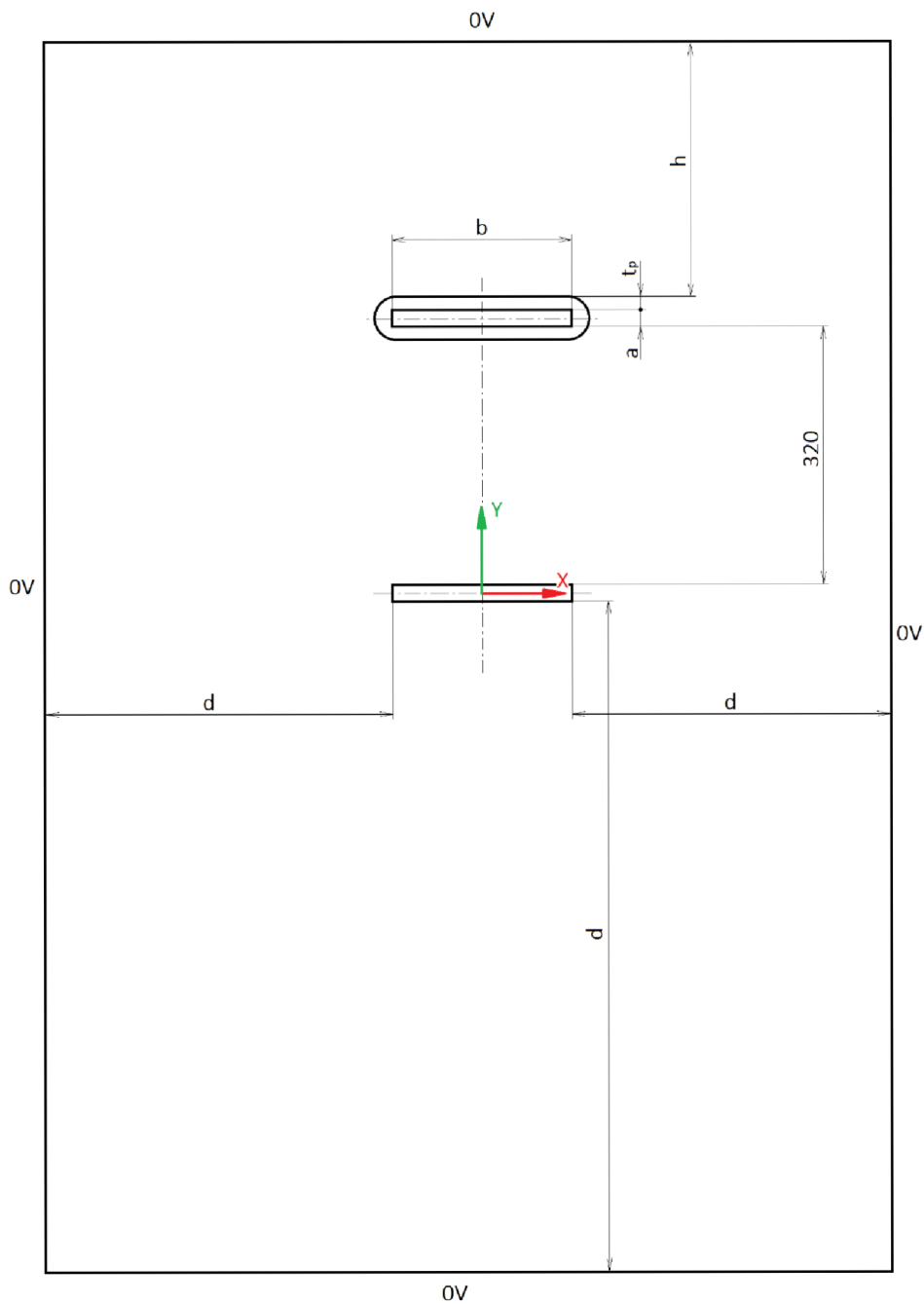
Druhou úlohou je provedení analýzy se stíněním spodní větve páskové elektrody pomocí stínících tyčí. Úkolem stínících tyčí je tzv. odstínění elektrody, tedy ovlivnění elektrostatického pole v okolí elektrody tak, že na elektrodě dojde k poklesu intenzity pod

kritickou hodnotu. Takto se zajistí, že nebude docházet ke zvlákňování na spodní větvi v případě, že by se na spodní části pásku objevil zbytkový polymer. Toto je využito u dolní větve elektrody, kde je zvlákňování případných zbytků polymeru nežádoucí. Analýza byla provedena pro stanovení vlivu stínících tyčí na intenzitu elektrického pole v okolí dolní a horní elektrody.

Následná 3D analýza je provedena pro ověření funkce stínících disků a pro možnost vyhodnocení rovnoměrnosti zvlákňování polymerního roztoku z převíjené páskové elektrody podél její pracovní délky.

5.1 Analýza rozložení intenzity elektrického pole v okolí elektrody

Pro analýzy intenzity elektrického pole byl použit software Ansys Maxwell 2D Design. Bylo rozhodnuto o provedení simulace ve 2D z důvodu, že 3D úloha by byla velmi náročná na výpočtový čas a nepřinesla by žádné přidané hodnoty. Jedná se o zjednodušený model, který popisuje pouze horní a dolní větev elektrody bez okolních částí, tedy především v pracovní oblasti, kde bude docházet ke zvlákňování. Úloha je řešena ve 2D v rovině kolmého řezu vůči směru pohybu pásku. Úloha byla zadávána jako parametrická z důvodu hledání optimálních hodnot parametrů, podle schématu. (Obr.18) Cílem výpočtů bylo určit optimální hodnotu parametru šířky pásku b .



Obr.18 Schéma úlohy bez stínících tyčí

Parametry:

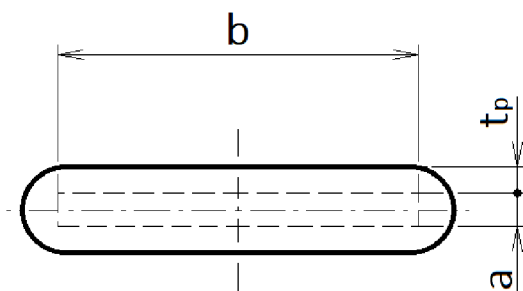
Vzdálenost od okolí. $d= 300\text{mm}$

Tloušťka vrstvy polymeru: $t_p= 0,3\text{mm}$

Tloušťka elektrody: $a= 0,4\text{mm}$

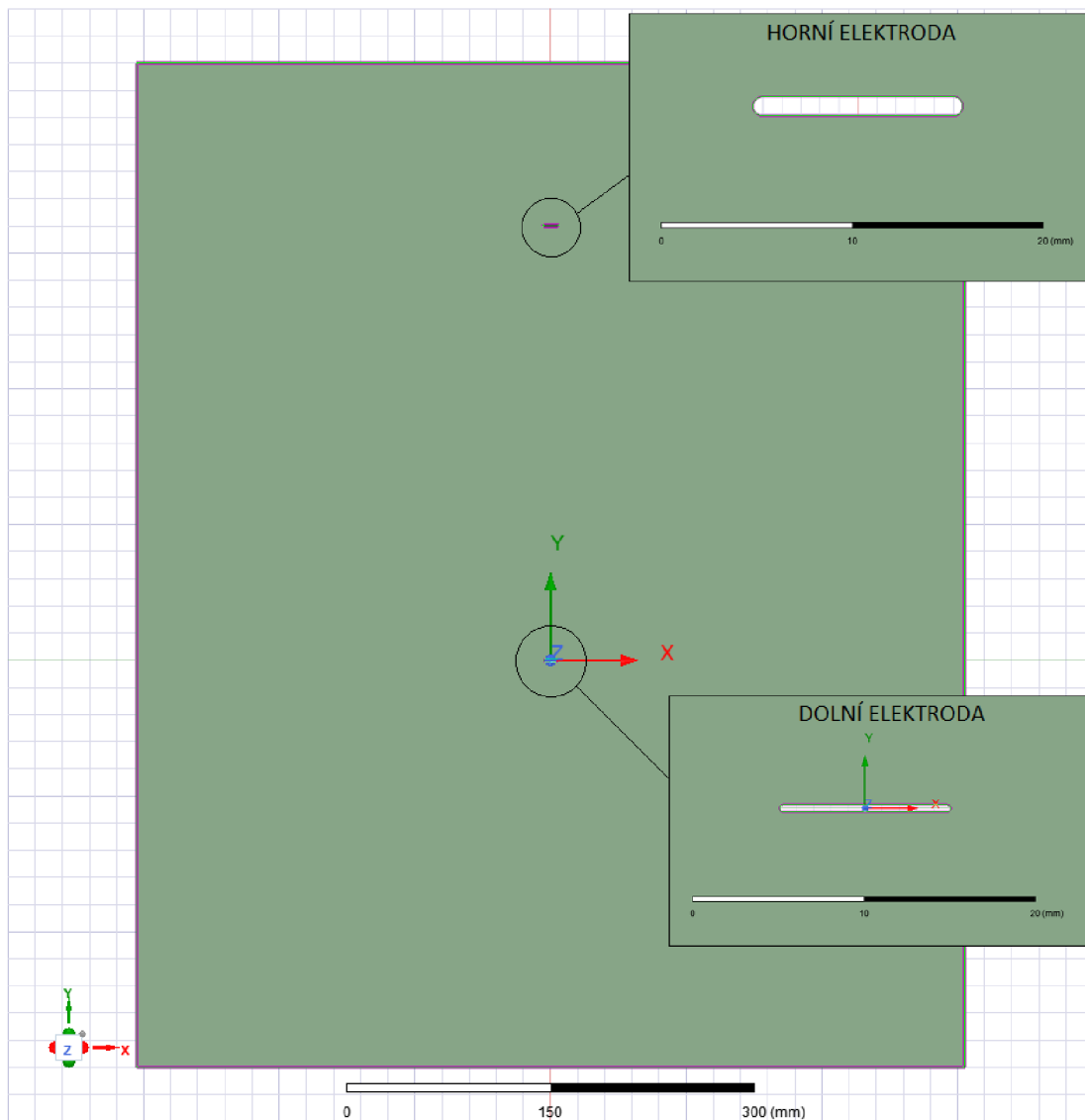
Vzdálenost od digestoře: $h= 120\text{mm}$

Nejprve byla vytvořena geometrie a zadány okrajové podmínky. Na okraji prostředí je napětí 0V, a na elektrodách je zvlákňovací napětí 32kV. Okolí v simulaci bylo definováno jako vzduch. Polymer je velmi dobře vodivý a lze tedy říci, že má přibližně stejnou vodivost s kovovou elektrodou. Je tedy možné je prohlásit za jedno těleso. Proto bylo rozhodnuto o použití pouze kontury polymeru, protože zde není rozhraní mezi páskovou elektrodou a polymerem, a dále se sleduje intenzita elektrického pole na povrchu polymeru. (Obr.19)



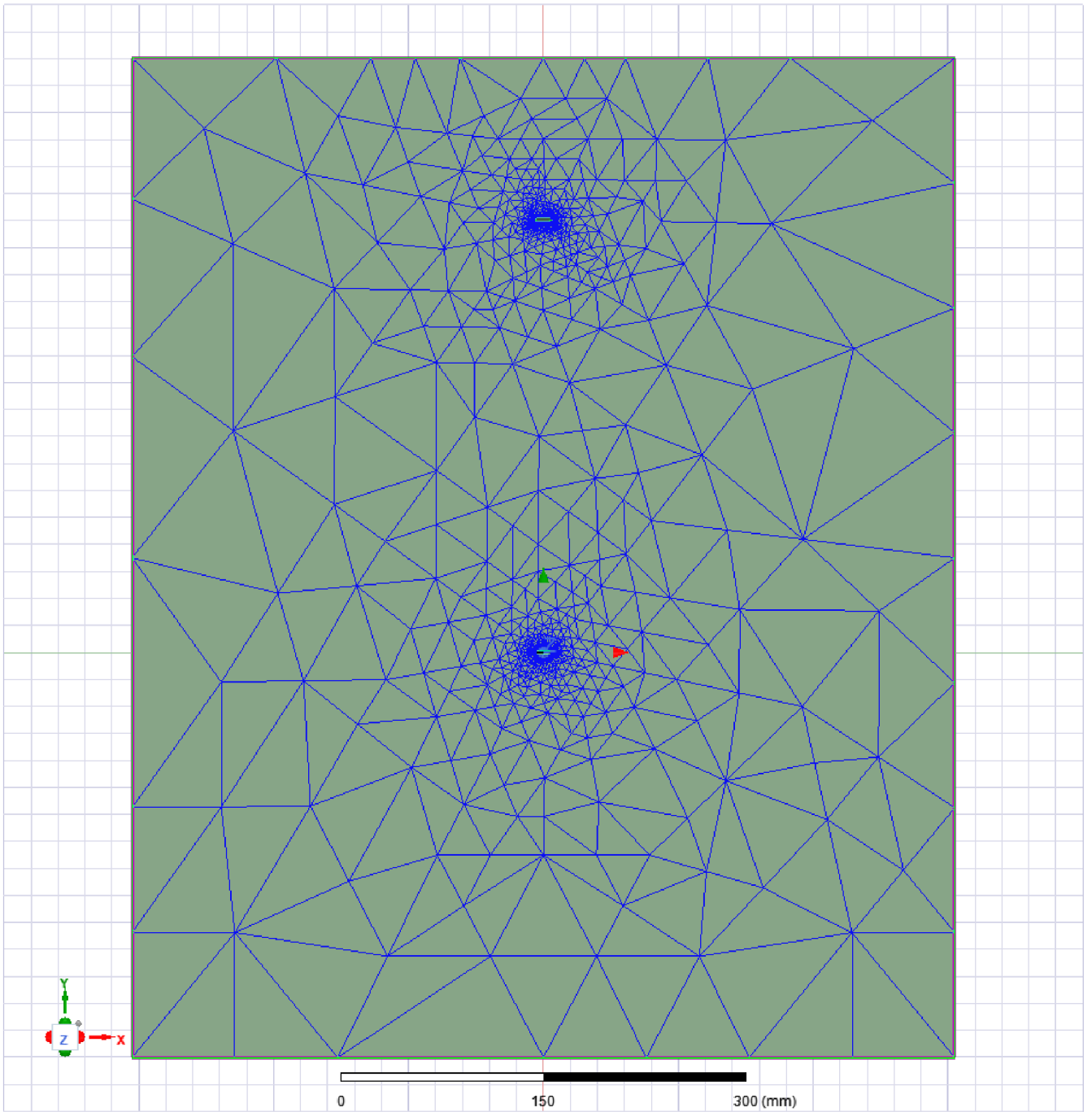
Obr. 19 Kontura polymeru pro výpočty

Polymer se nachází pouze na horní větvi elektrody, kde dochází ke zvlákňování. Spodní elektroda je tedy bez polymerní vrstvy, protože se zbytkový polymer stírá. Samotná elektroda má obdélníkový průřez, a v rozích elektrody při výpočtech tedy vznikají singularity. U výpočtu byly z tohoto důvodu ostré rohy zaobleny, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků v důsledku vzniku singularit. Pro zaoblení elektrody byl použit rádius $a/2$. Obrázek 20 ukazuje celkový pohled na výpočetní model a detailní pohledy na elektrody.

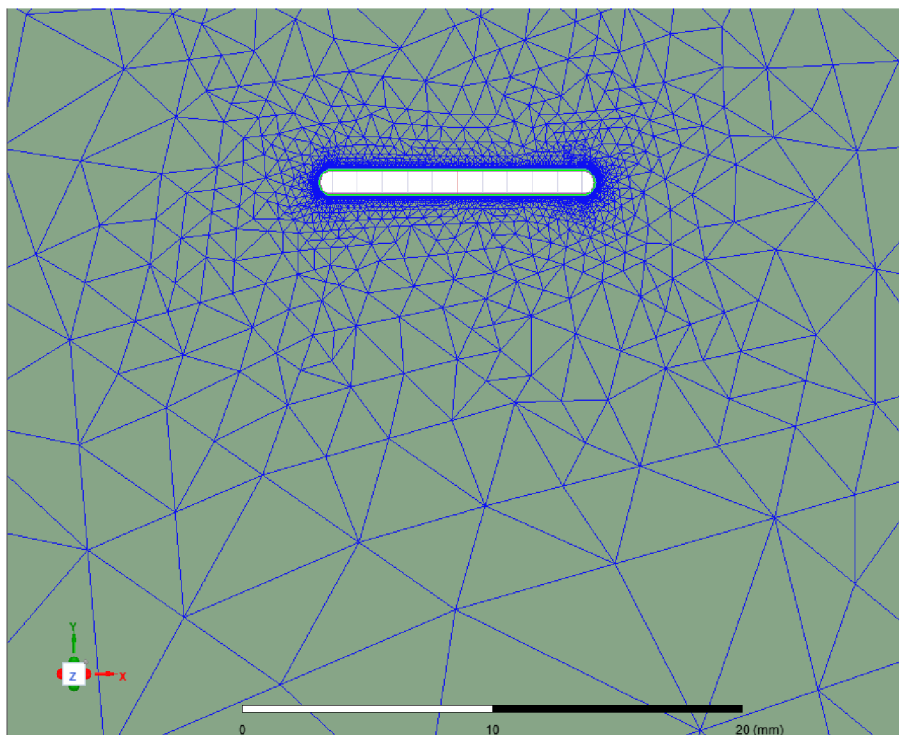


Obr.20 Výpočetní model

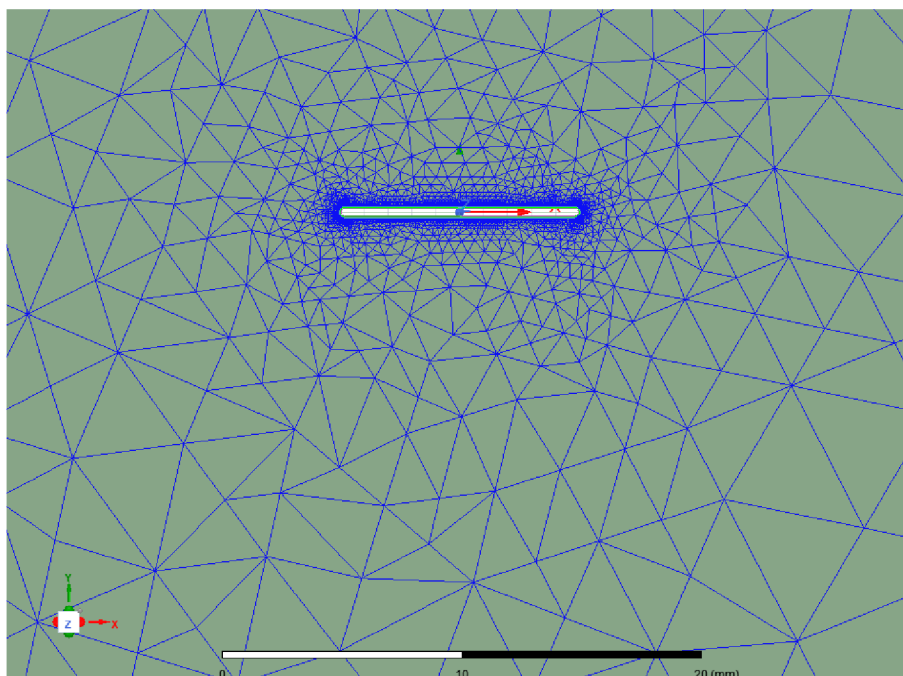
Výsledky a grafy byly s defaultním nastavením velmi hrubé. Pro lepší čitelnost a zlepšení vypovídající hodnoty a přesnosti byla generovaná výpočetní síť lokálně zahuštěna. V oblastech našeho zájmu se zhuštěním sítě získají přesnější výsledky a ve zbylých částech, které pro nás nejsou tak důležité, zůstanou s defaultním nastavením. Tím lze získat lepší výsledky a neprodlužovat příliš výpočetní čas. V okolí elektrody byla zahuštěna na 0,001mm. (Obr.21, Obr.22, Obr.23)



Obr.21 Zahuštěná síť

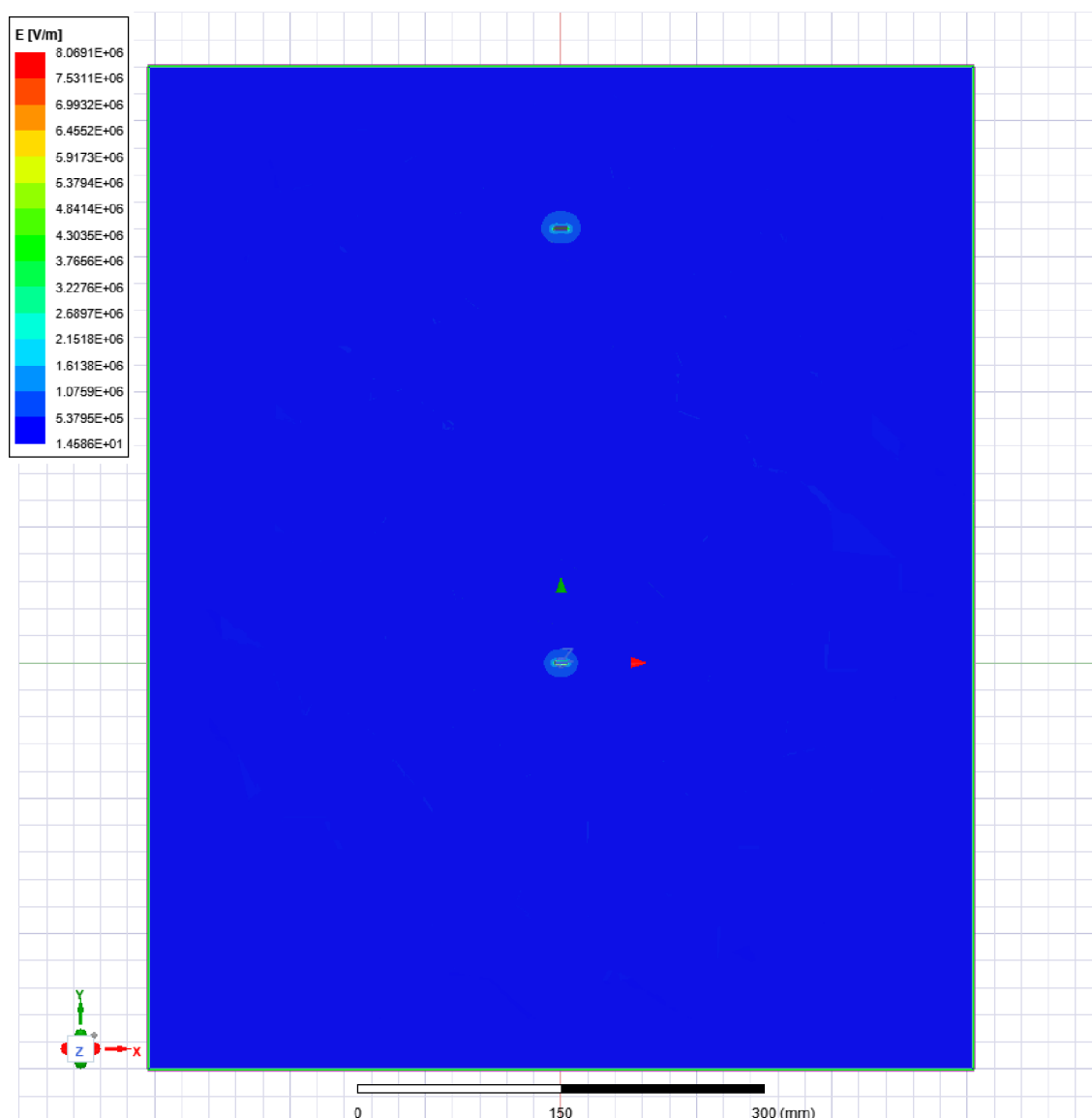


Obr.22 Zahuštěná síť v okolí horní elektrody

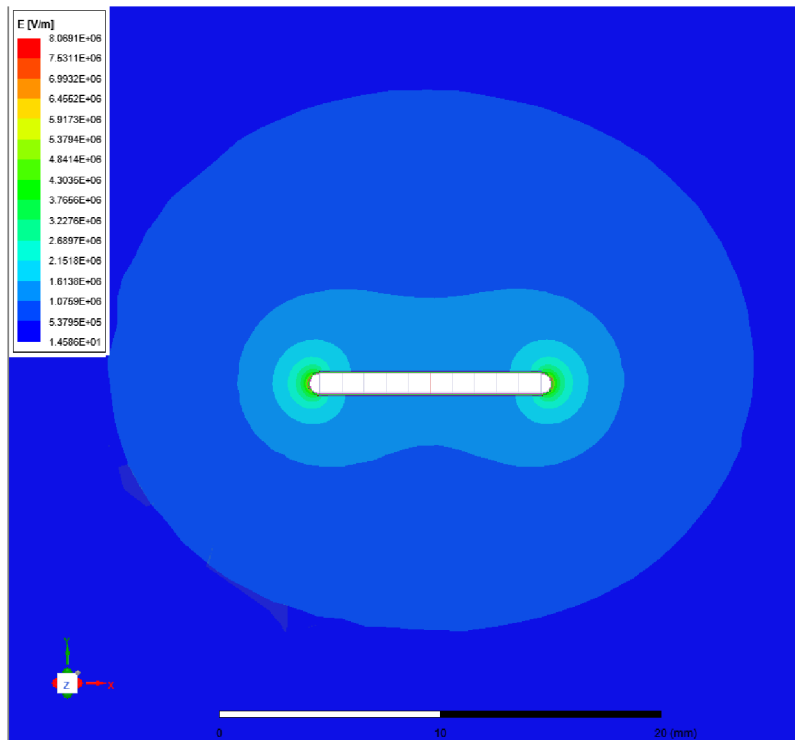


Obr.23 Zahuštěná síť v okolí dolní elektrody

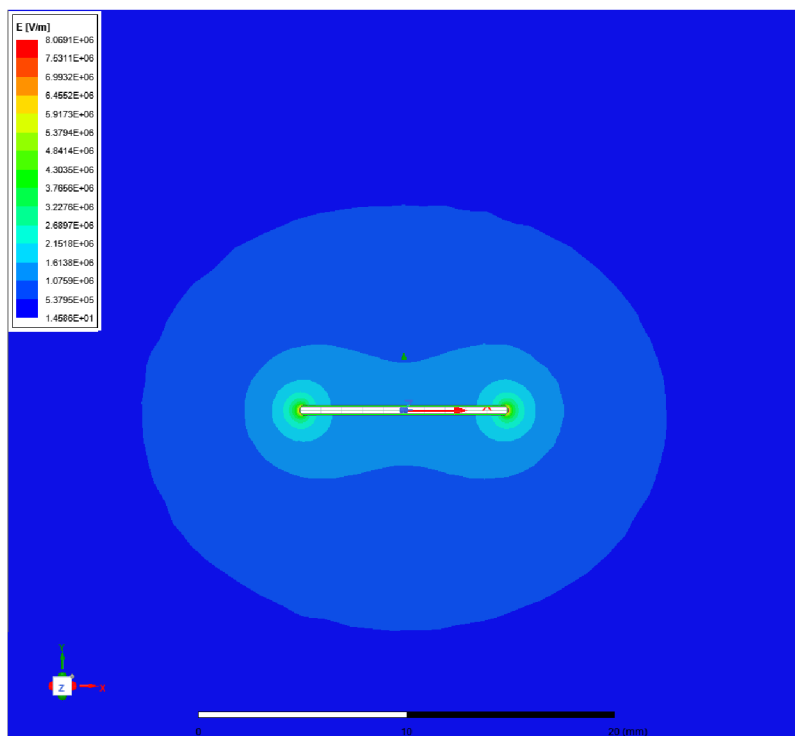
Následující obrázky ukazují rozložení intenzity elektrického pole v okolí elektrod. Celkový pohled na model je na obrázku 24. Obrázek 25 ukazuje rozložení intenzity elektrického pole v okolí horní elektrody a obrázek 26 ukazuje rozložení intenzity elektrického pole v okolí dolní elektrody. Obrázky 27, 28 a 29 ukazují rozložení napětí v okolí elektrod. Na obrázku 27 je celkový pohled na model. Na obrázku 28 je ukázáno rozložení napětí v okolí horní elektrody a obrázek 29 ukazuje rozložení napětí v okolí dolní elektrody.



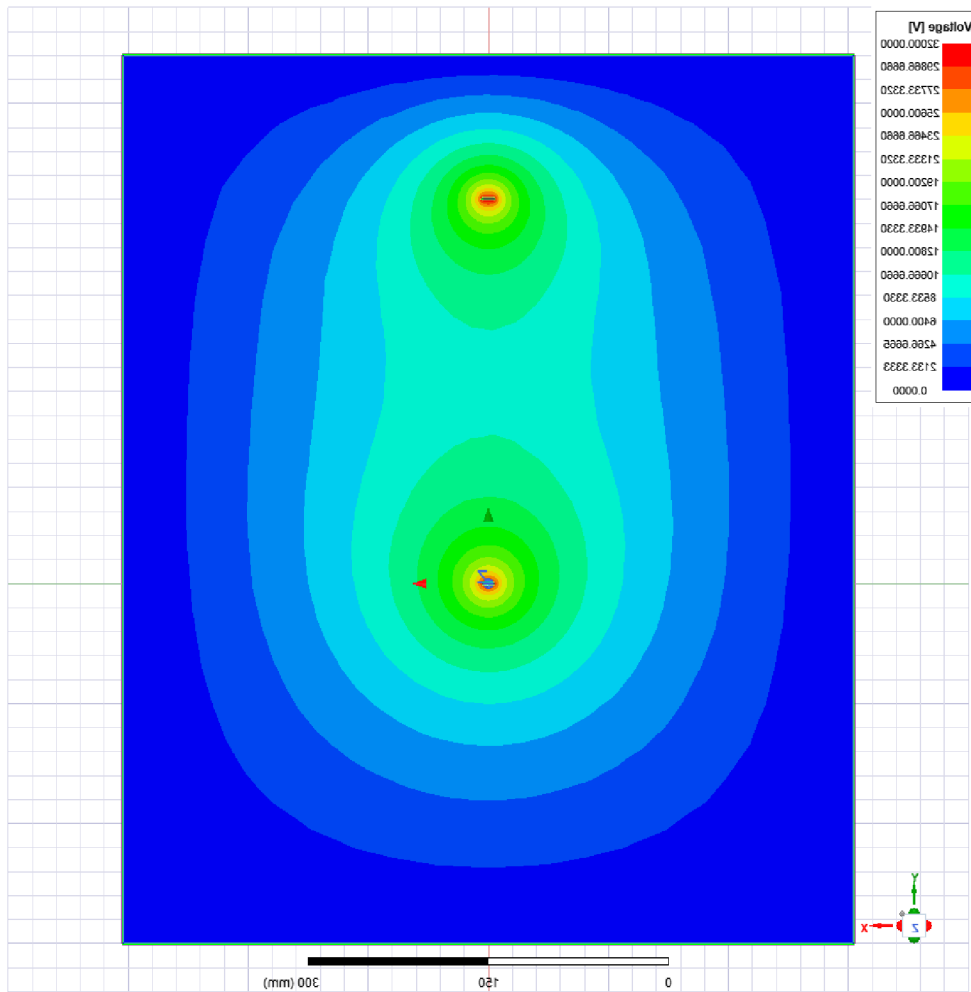
Obr.24 Intenzita elektrického pole E



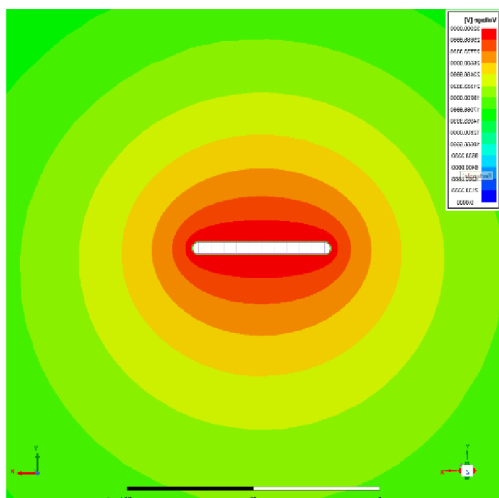
Obr.25 Intenzita elektrického pole E v okolí horní elektrody



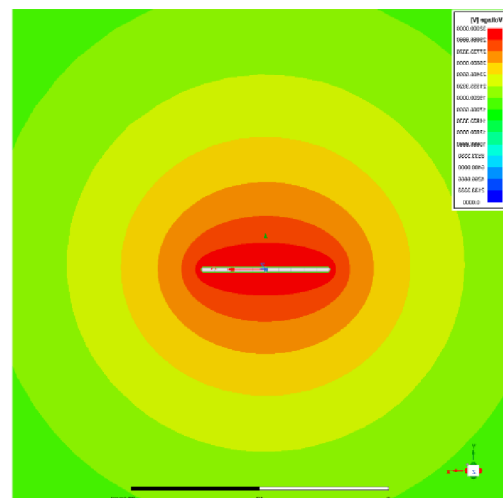
Obr.26 Intenzita elektrického pole E v okolí dolní elektrody



Obr.27 Napětí



Obr.28 Napětí v okolí horní elektrody

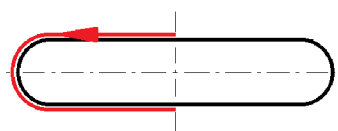


Obr.29 Napětí v okolí dolní elektrody

5.1.1 Výsledky simulace pro optimální šířku páskové elektrody

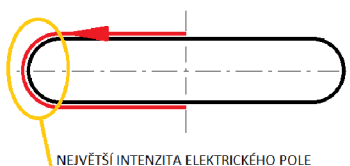
Cílem výpočtů bylo určit optimální šířku pásku b , tedy takovou šířku pásku, kde vznikne nadkritická intenzita na co největší ploše. To je důležité pro zvlákňování, při kterém se musí překročit kritická intenzity elektrického pole. Rozsah šířky pásku b byl zvolen 4, 6, 8, 10, 12 a 14 mm. Pro tyto hodnoty byla provedena parametrická úloha.

Na definované křivce byly sledovány hodnoty intenzity elektrického pole, která kopíruje geometrii povrchu polymeru. Byla sledována pouze jedna polovina, protože se jedná o symetricky souměrnou úlohu. Počátek křivky se nachází uprostřed, na horní straně. (Obr.30)

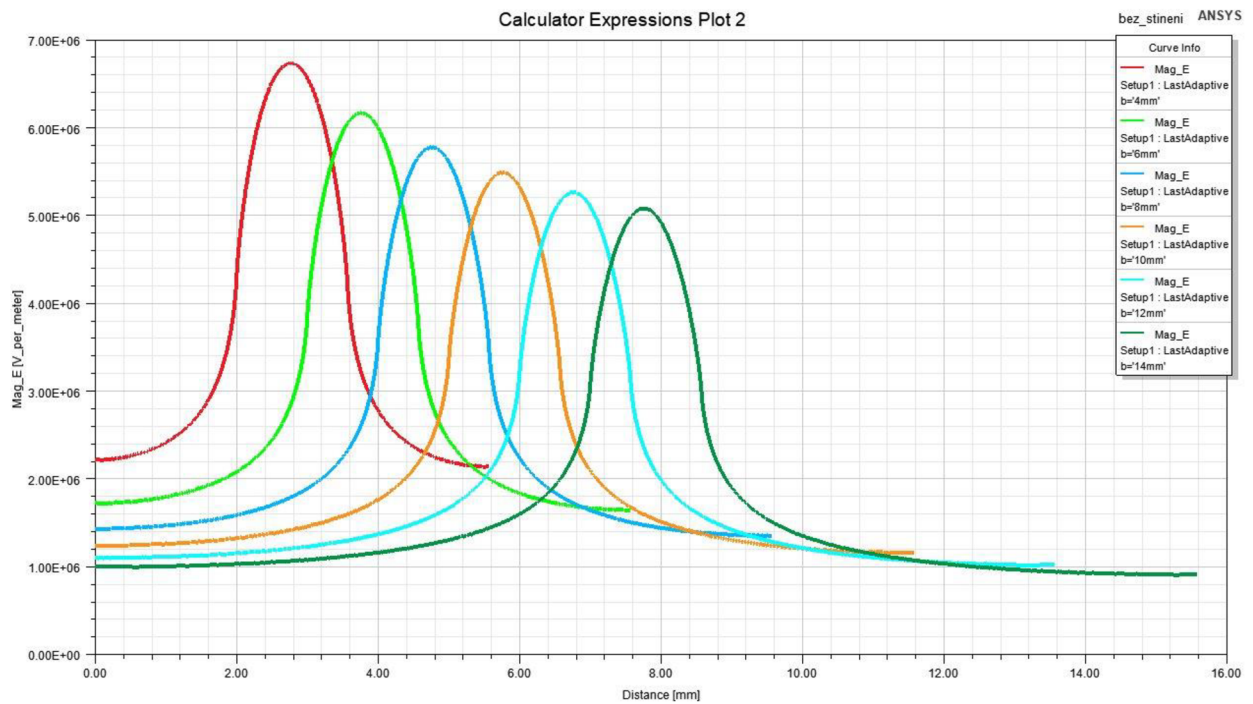


Obr.30 Znárodnění křivky, podél které je sledována intenzita elektrického pole

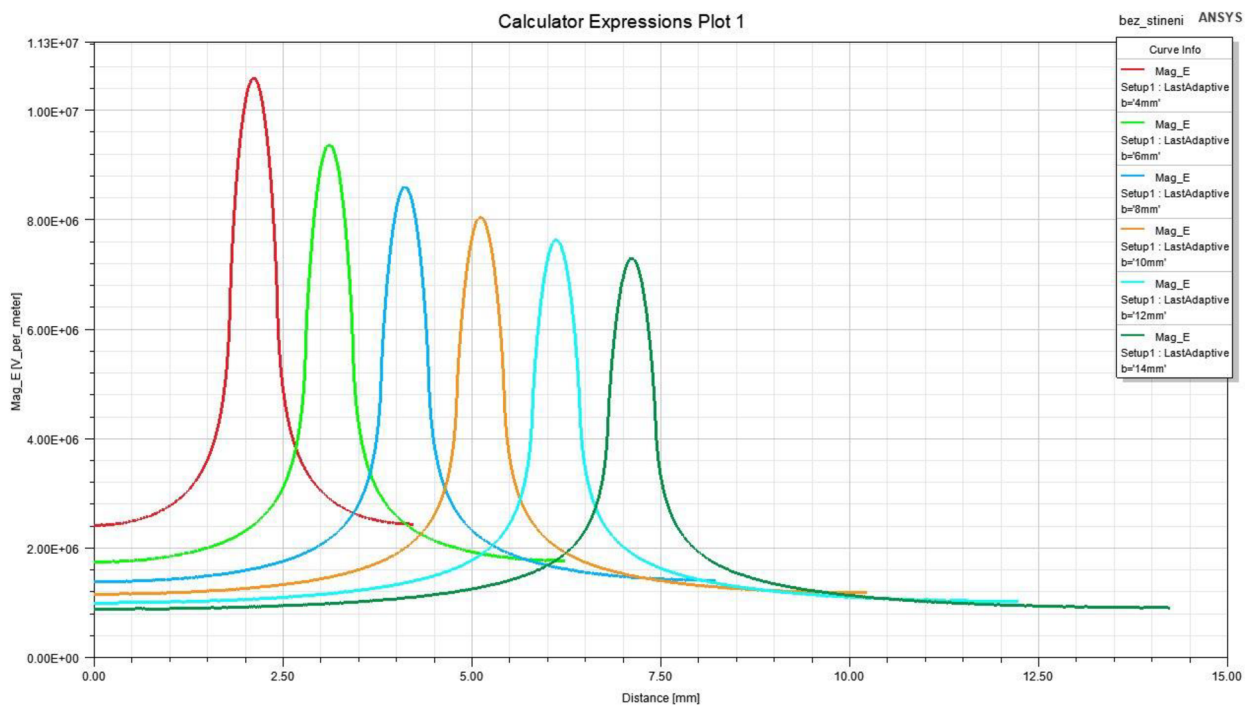
Grafy byly vynášeny pro obě elektrody, pro elektrodu s polymerem i pro elektrodu bez polymeru. Kde vodorovná osa představuje délku definované křivky (Obr.30) a svislá osa představuje intenzitu elektrického pole. Z grafů na obrázku 32 a obrázku 33 je patrné, že největší intenzity elektrického pole se dosahuje uprostřed délky křivky. (Obr.31) Zde bude také docházet ke zvlákňování nejvíce. To znamená, že zvlákňování bude probíhat nejvíce na hranách elektrody. Pásek s menší šířkou je výhodnější z důvodu dosažení vyšší maximální intenzity elektrického pole, lze tedy předpokládat vyšší výkonnost a větší produktivitu. Od firmy Pilana jsou dostupné pásy se šířkou 6 a 10 mm. Nejlepším výsledkem tedy je, použít pásek široký 6 mm. Při experimentu budou však použity oba pásy pro experimentální ověření simulace.



Obr.31 Maximální intenzita elektrického pole



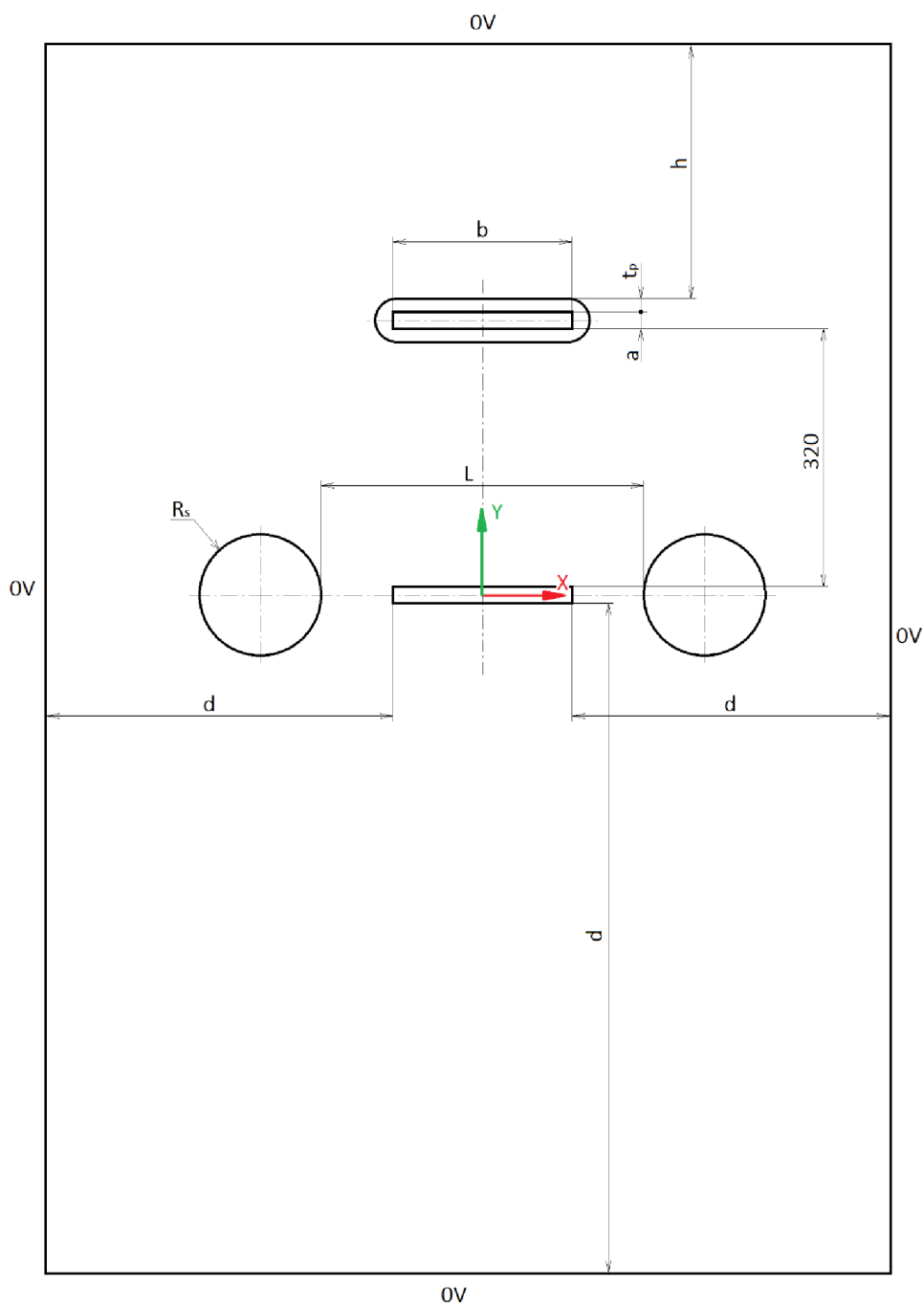
Obr.32 Intenzita elektrického pole E – horní elektroda



Obr.33 Intenzita elektrického pole E – dolní elektroda

5.2 Analýza rozložení intenzity elektrického pole se stínícími tyčemi

Následně byla provedena simulace páskových elektrod se stínícími tyčemi. (Obr.34)

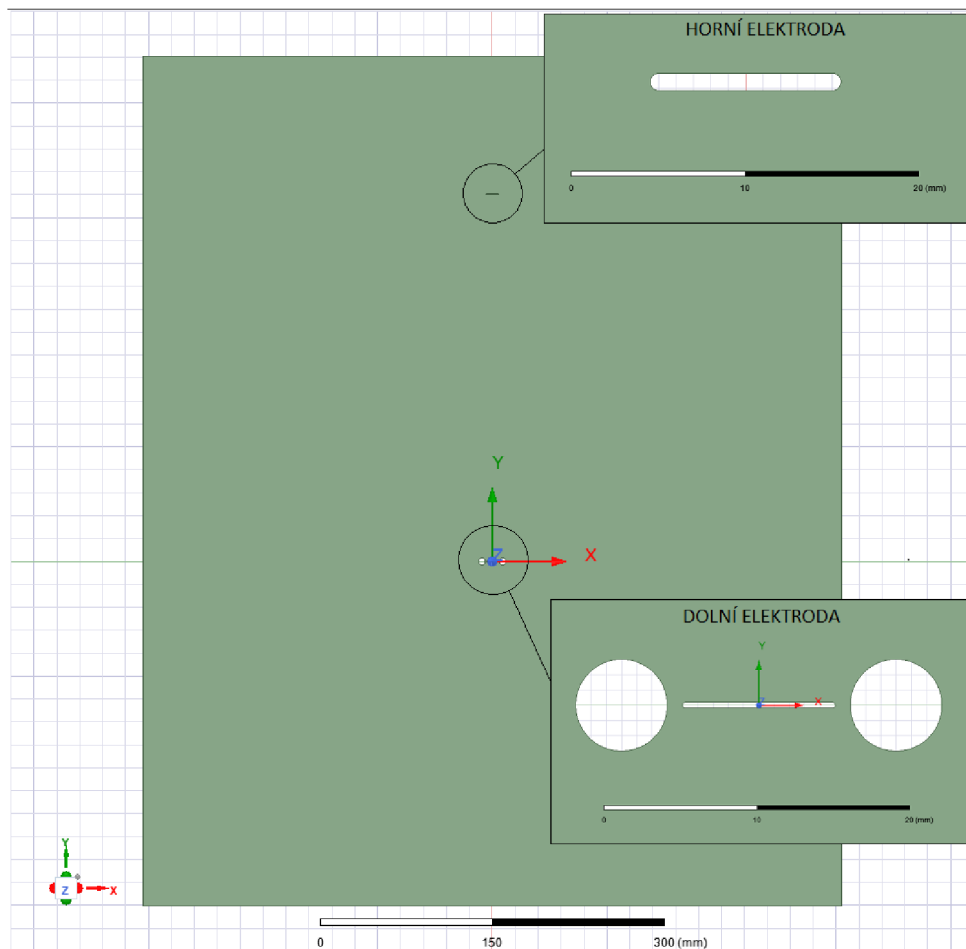


Obr.34 Schéma úlohy se stínícími tyčemi

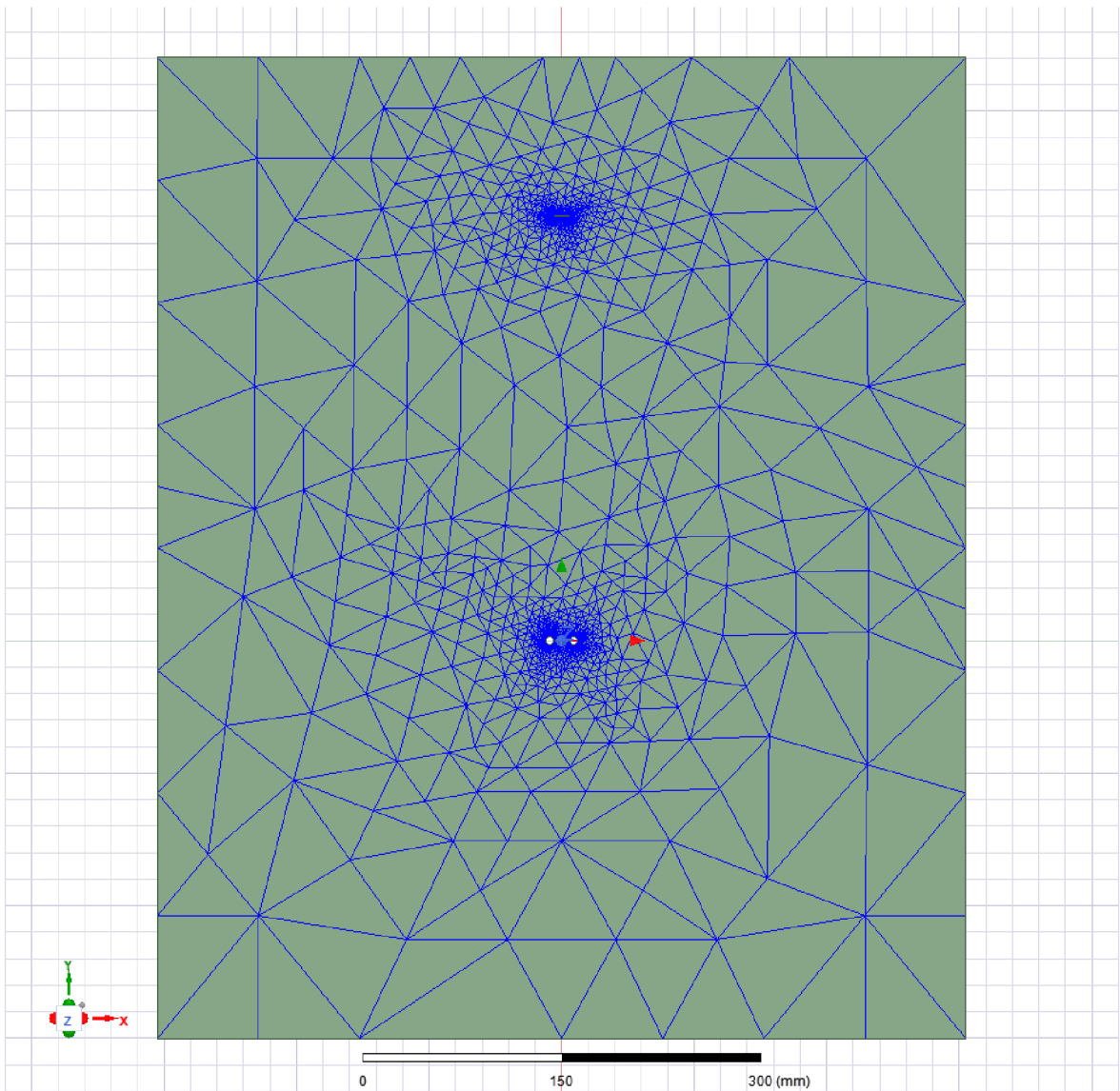
Geometrie představující elektrody a okolí byla zachována, a k nim byla přidána geometrie stínících tyčí. Stínící tyče jsou umístěny v okolí dolní větve elektrody, viz. obrázek 35, vpravo a vlevo. V okolí stínících tyčí bylo použito zahuštění sítě nižší z důvodu nepotřebnosti přesnějších výsledků a ušetření výpočetního času. Zahuštění na stínících tyčích bylo zvoleno 0,1mm. (Obr.36, Obr.37, Obr.38) Průběh napětí a intenzity elektrického pole byl opět sledován na křivce kopírující geometrii elektrod. Obrázky 39, 40 a 41 ukazují rozložení intenzity elektrického pole v okolí elektrod. Rozložení napětí ukazují obrázky 42, 43, 44.

Cílem výpočtů bylo určit optimální parametry vzdálenosti mezi stínícími tyčemi L a poloměru R_s stínící elektrody. Byla tedy počítána parametrická úloha pro parametry L , R_s a jejich řady:

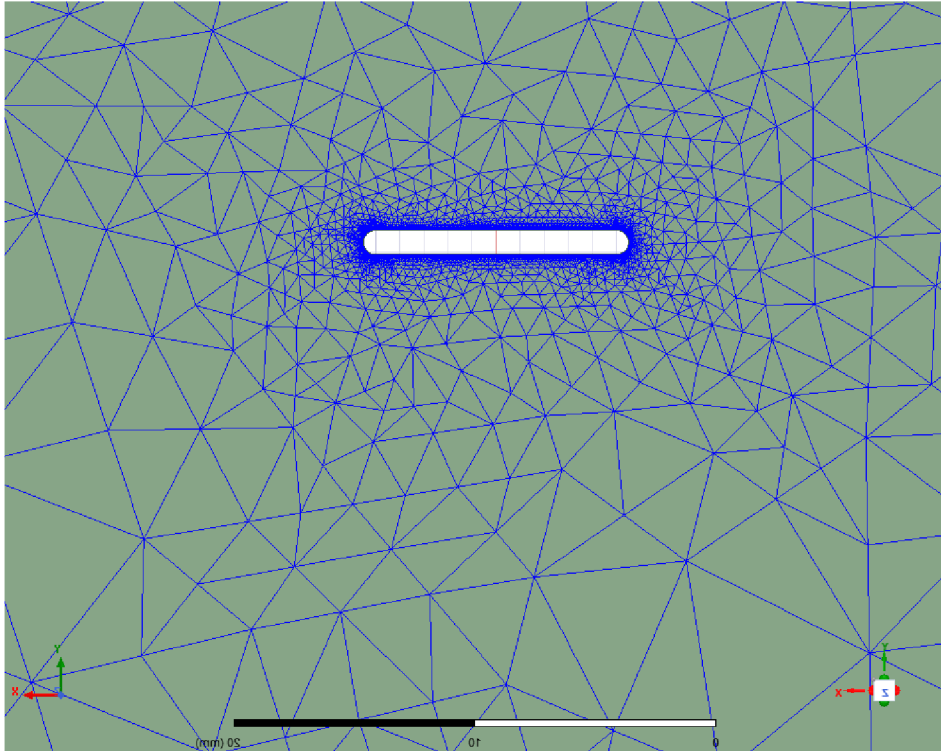
- Rozsah vzdálenosti mezi stínícími tyčemi L : 12, 22, 32, 42 mm
- Rozsah poloměru stínící elektrody R_s : 1, 2, 4, 5, 6 mm



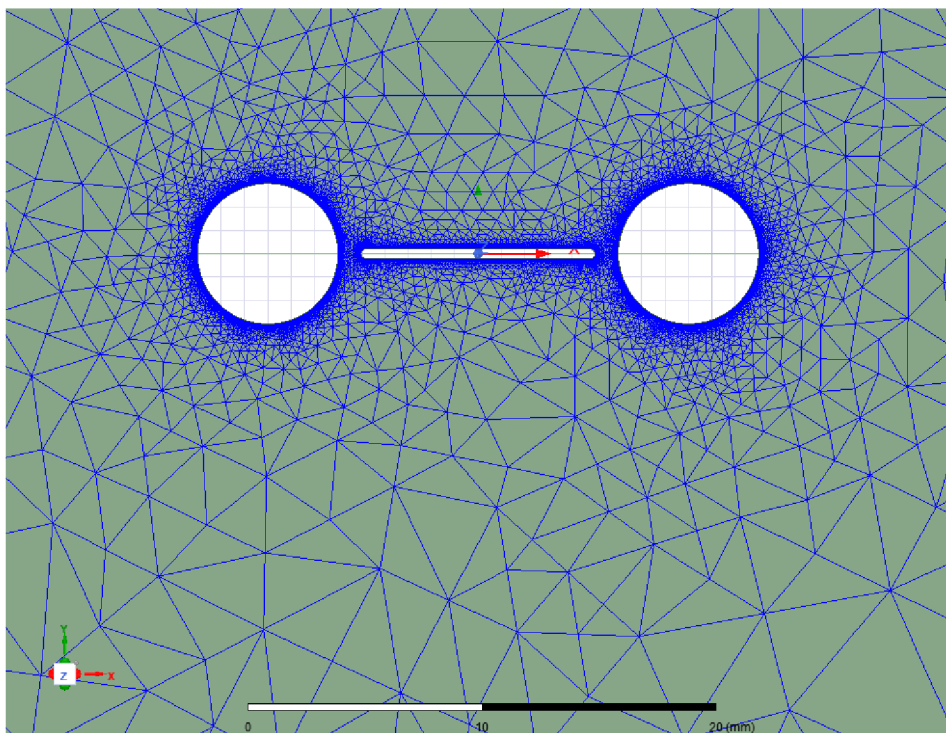
Obr.35 Výpočetní model



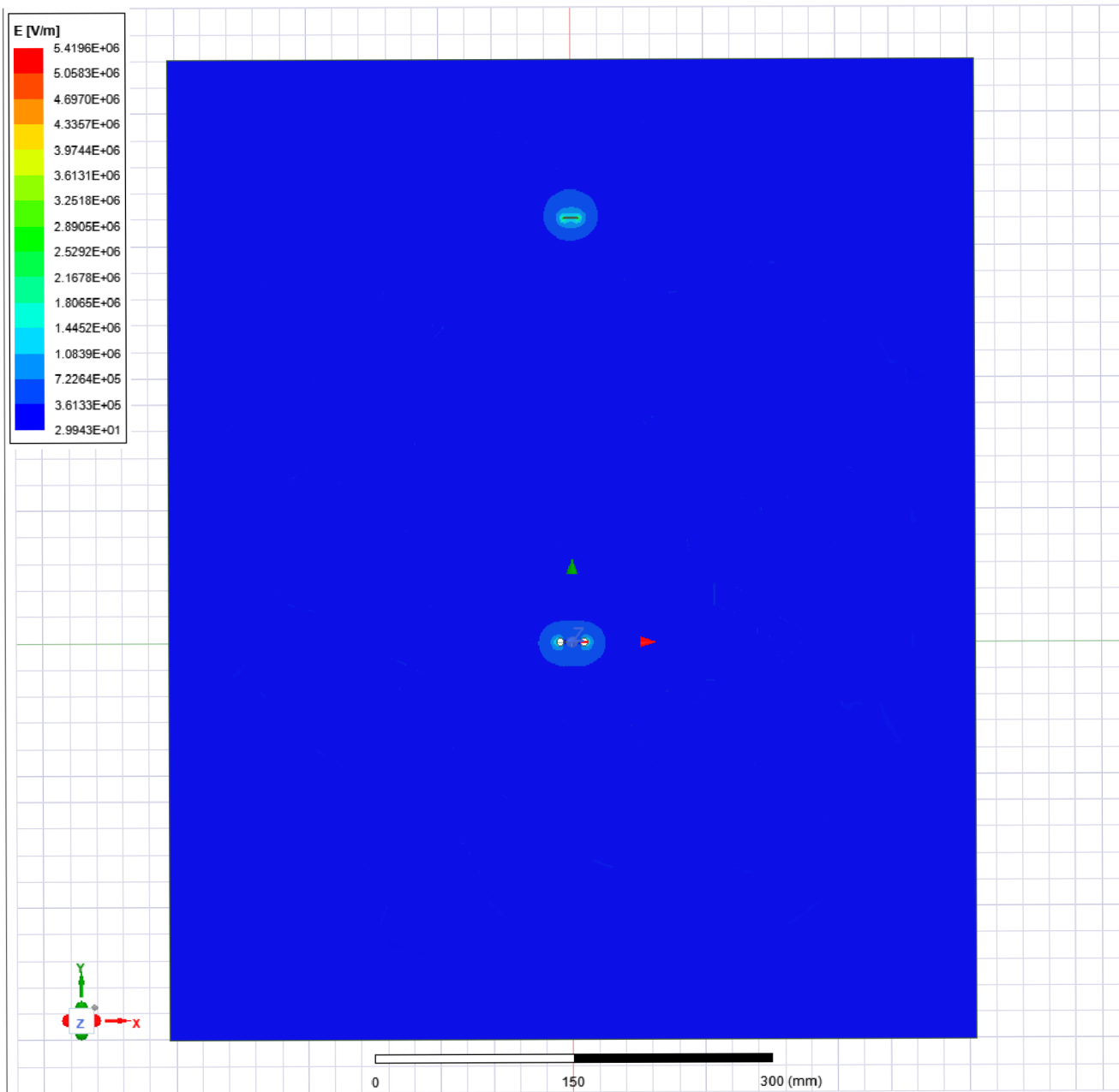
Obr.36 Zahuštění sítě



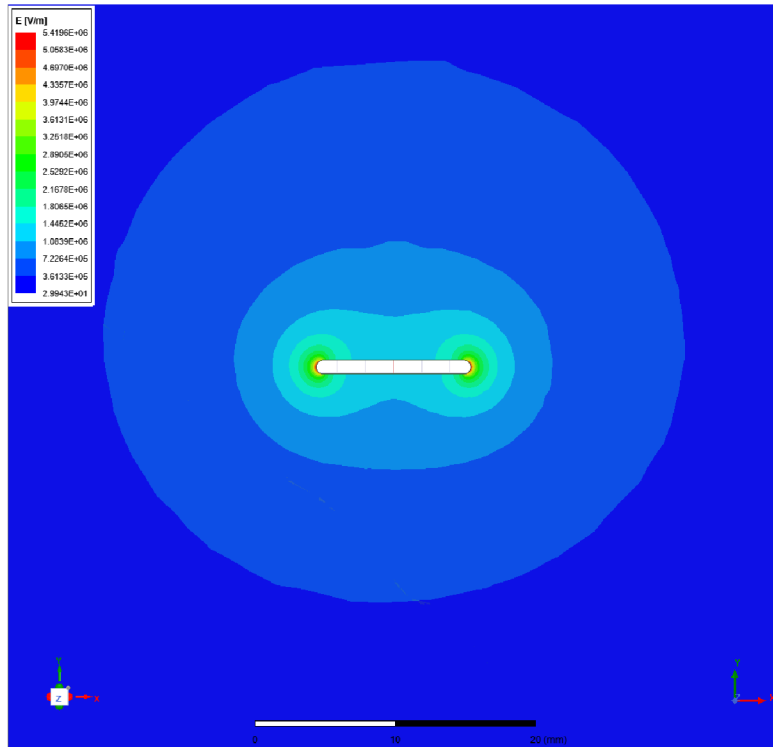
Obr.37 Zahuštění sítě v okolí horní elektrody



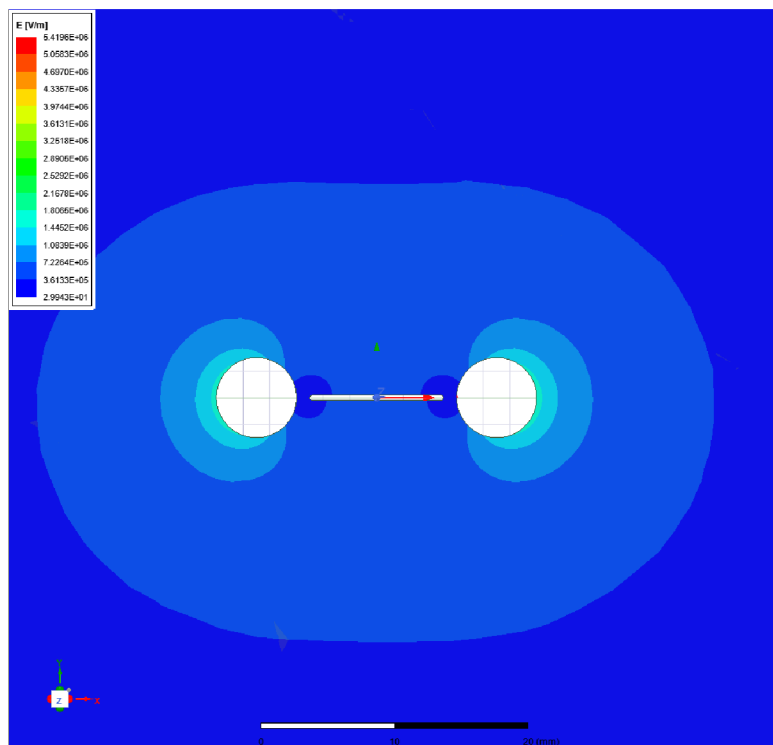
Obr.38 Zahuštění sítě v okolí dolní elektrody



Obr.39 Intenzita elektrického pole E

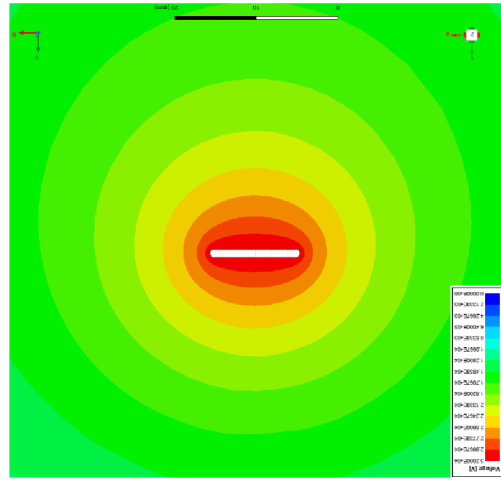


Obr.40 Intenzita elektrického pole E v okolí horní elektrody

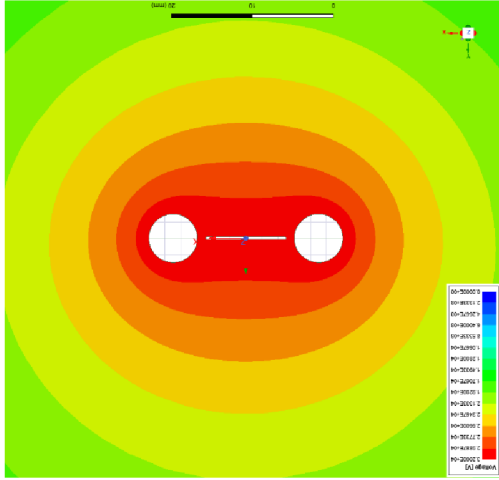


Obr.41 Intenzita elektrického pole E v okolí dolní elektrody

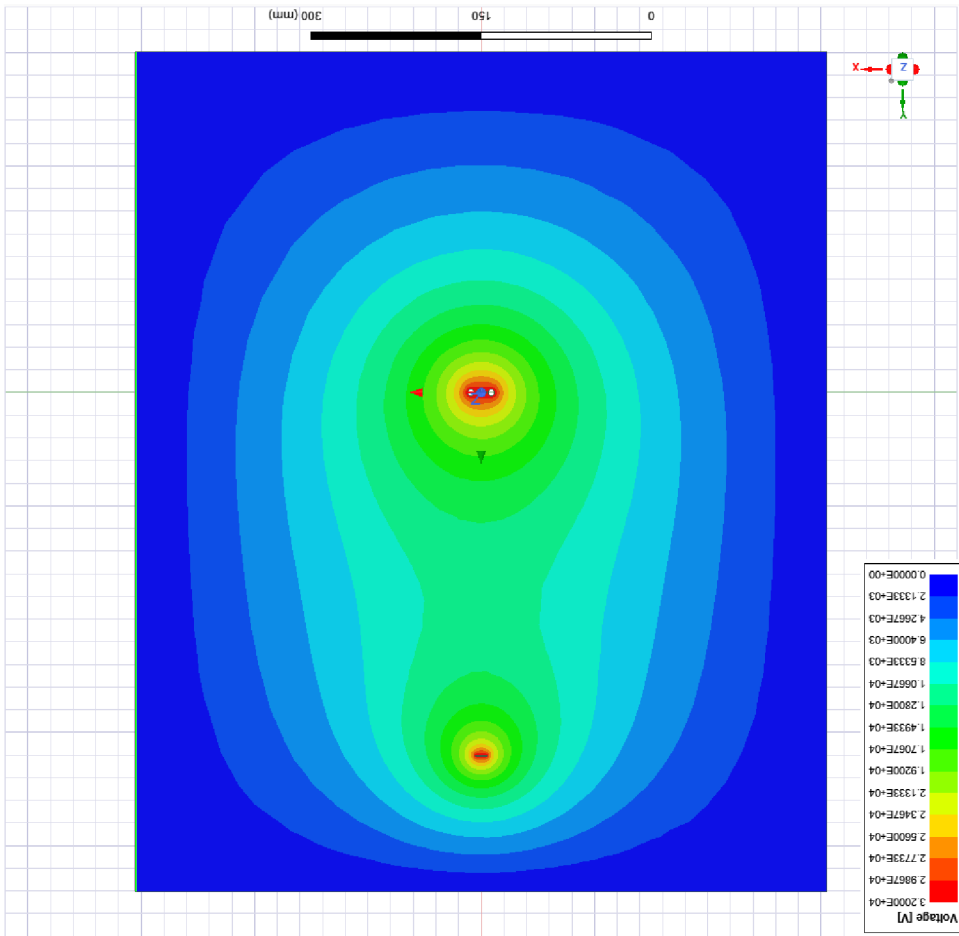
Obr.43 Napětí v okolí horní elektrody



Obr.44 Napětí v okolí dolní elektrody



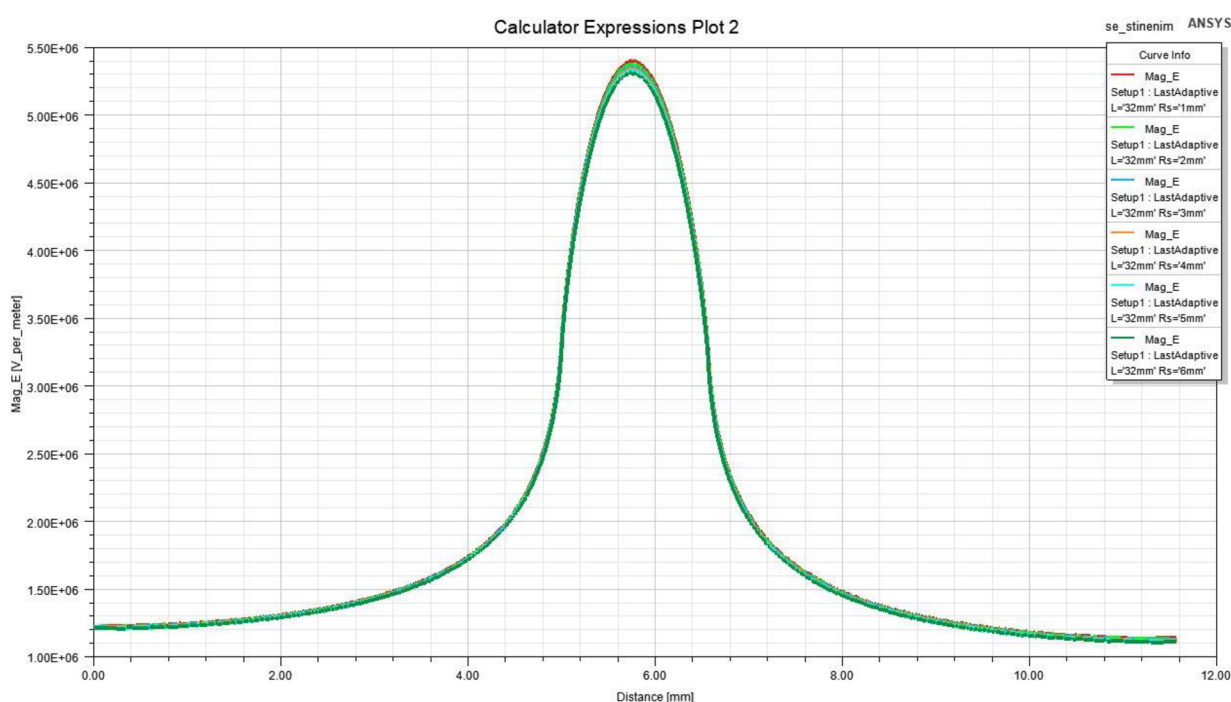
Obr.42 Napětí



5.2.1 Výsledky analýzy páskové elektrody se stínícími tyčemi

Vodorovná osa grafu zobrazuje délku definované křivky, a svislá osa popisuje intenzitu elektrického pole.

Z grafu na obrázku 45 vyplývá, že změna průměru a vzdálenosti stínících tyčí kolem dolní větve elektrody má malý vliv na intenzitu elektrického pole v okolí horní větve elektrody. Toto je způsobeno vzdáleností horní a dolní větve elektrody, která je již dostatečně velká pro vymizení účinků stínících tyčí. Ostatní výsledky jsou uvedeny v přílohách I, II, III.



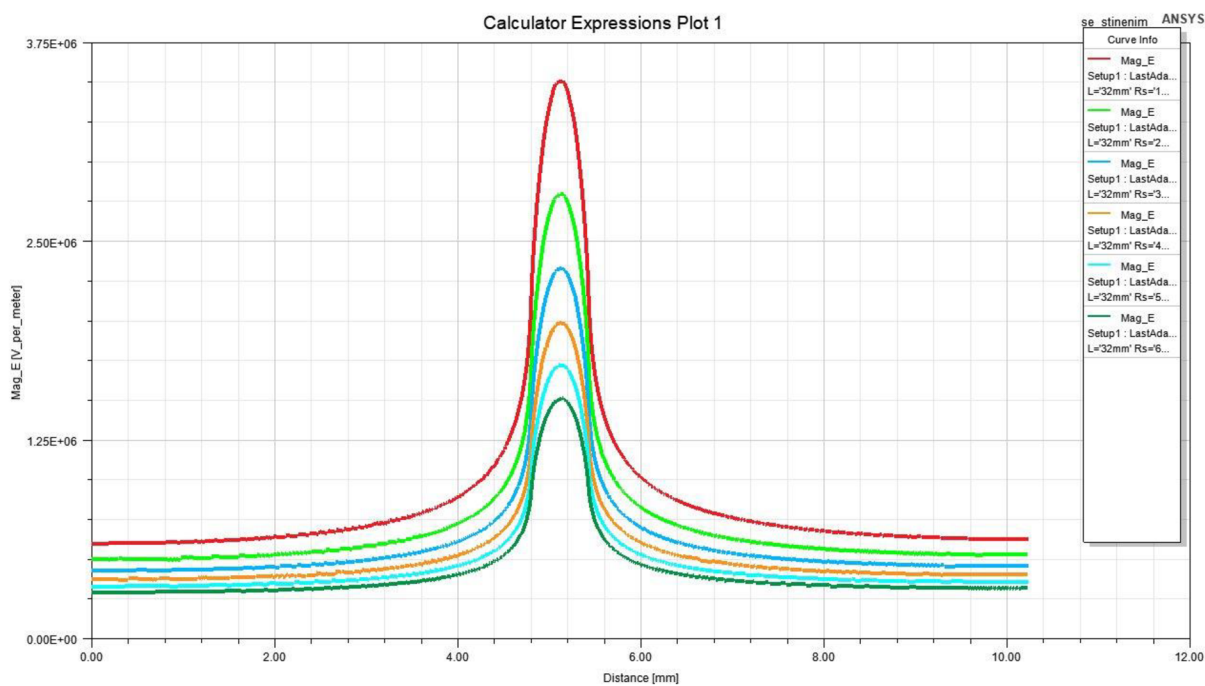
Obr.45 Intenzita elektrického pole E – horní elektroda, L=32mm

Z grafu na obrázku 46 vyplývá, že čím blíže jsou stínící tyče umístěny k páskové elektrodě, tím více ovlivňují intenzitu elektrického pole na elektrodě mezi nimi. Dále pak, že čím větší průměr stínící tyče mají, tím také více ovlivňují intenzitu elektrického pole na elektrodě. Zbylé výsledky jsou uvedeny v přílohách IV, V, VI.

Čím blíže a čím větší průměr stínící tyče mají, tím více ovlivňují intenzitu elektrického pole na páskové elektrodě mezi nimi. Grafy na obrázku 33 a obrázku 46 ukazují vliv stínících tyčí na intenzitu elektrického pole na dolní větvi páskové převíjené elektrody. Porovnání

těchto grafů ukazuje, že v případě bez stínících tyčí dojde k překročení kritické intenzity a ke zvlákňování. V druhém případě, tedy se stínícími tyčemi, hodnota intenzity nepřekročí kritickou hodnotu a ke zvlákňování nedojde. Za kritickou hodnotu intenzity elektrického pole pro zvlákňování je možné považovat $3 \cdot 10^6 \text{ V/mm}$. Když bude hodnota intenzity elektrického pole pod touto hodnotou, nebude docházet ke zvlákňování.

V mém případě je nejlepší řešení, použít tyče s průměrem $R_s=10\text{mm}$ a vzdáleností mezi tyčemi a elektrodou $L=32\text{mm}$, které umožňují nejjednodušší zástavbu a zaručuje splnění požadavku dostatečného odstínění převíjené elektrody.



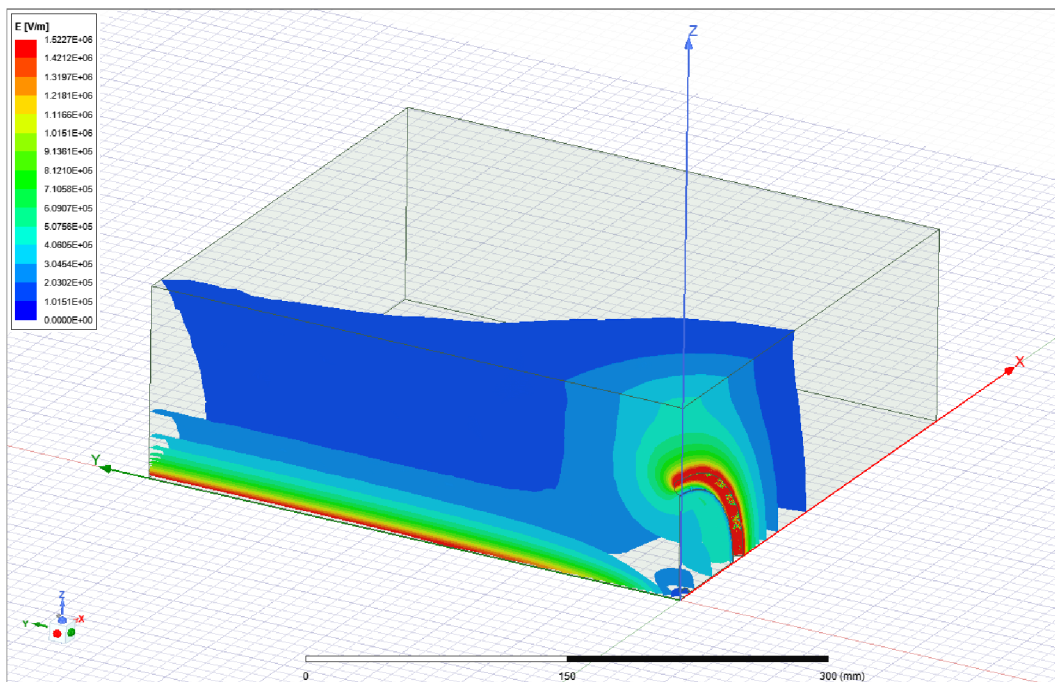
Obr.46 Intenzita elektrického pole E – dolní elektroda, $L=32\text{mm}$

5.3 Simulace stínících disků

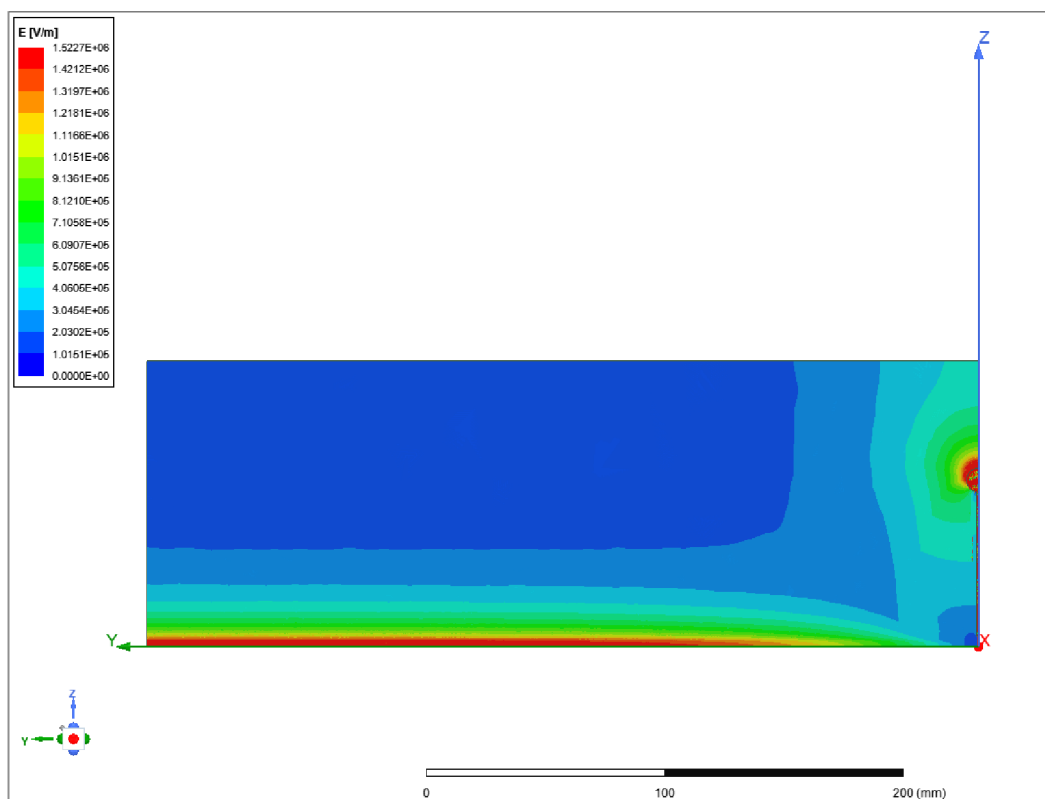
Nakonec bylo rozhodnuto o provedení simulace osminového modelu ve 3D pro ověření funkce stínících disků. Důvodem bylo ověření funkce stínících disků jako omezovače zvlákňovací oblasti. Stínící disky mají zamezit zvlákňování v místě, kde elektroda s vrstvou polymeru opouští oblast odstíněnou kryty. Kdyby tato oblast nebyla odstíněna, mohlo by docházet k ulpívání vláken na mechanických částech konstrukce elektrody a k jejich zanesení. Disky snižují intenzitu elektrického pole na začátku a na konci zvlákňovacího prostoru a zvlákňování začíná až v určité vzdálenosti od stínících disků. Dalším důvodem analýzy byla studie intenzity elektrického pole na pracovní délce převíjené páskové elektrody. Tento průběh intenzity elektrického pole ukáže, jak rovnoměrně se bude zvlákňovat polymerní roztok z páskové elektrody.

Model byl připraven pomocí programu ANSYS Maxwell 3D design. Bylo modelováno okolní prostředí, tedy vzduch. Geometrie stínícího disku a elektrody byla vymodelována pro oříznutí prostředí. Okrajové podmínky byly zadány na plochy, tedy na vnějších plochách okolí bylo zadáno napětí 0V, a na všechny plochy, které náleží stínícímu disku a elektrodě bylo zadáno zvlákňovací napětí 32kV.

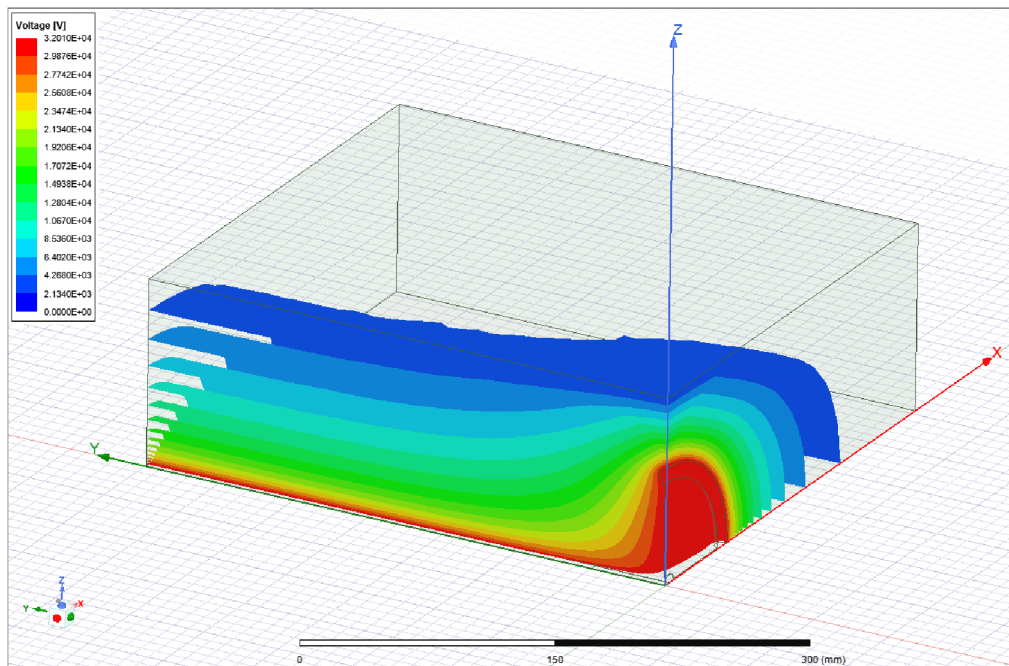
Pro korektnost výpočtu, jako osminového modelu, bylo potřeba zadat také roviny symetrie. Obrázky 47 a 48 ukazují rozložení intenzity elektrického pole v okolí elektrody a stínícího disku. Obrázky 49 a 50 pak ukazují rozložení napětí v okolí elektrody a stínícího disku. Obrázek 48 zobrazuje průběh intenzity elektrického pole na převíjené páskové elektrodě ve směru osy Y. V tomto směru je intenzita elektrického pole sledována a vyhodnocována z hlediska začátku a konce zvlákňování. Následně se její rozložení sleduje pro určení rovnoměrnosti zvlákňování na pracovní délce elektrody.



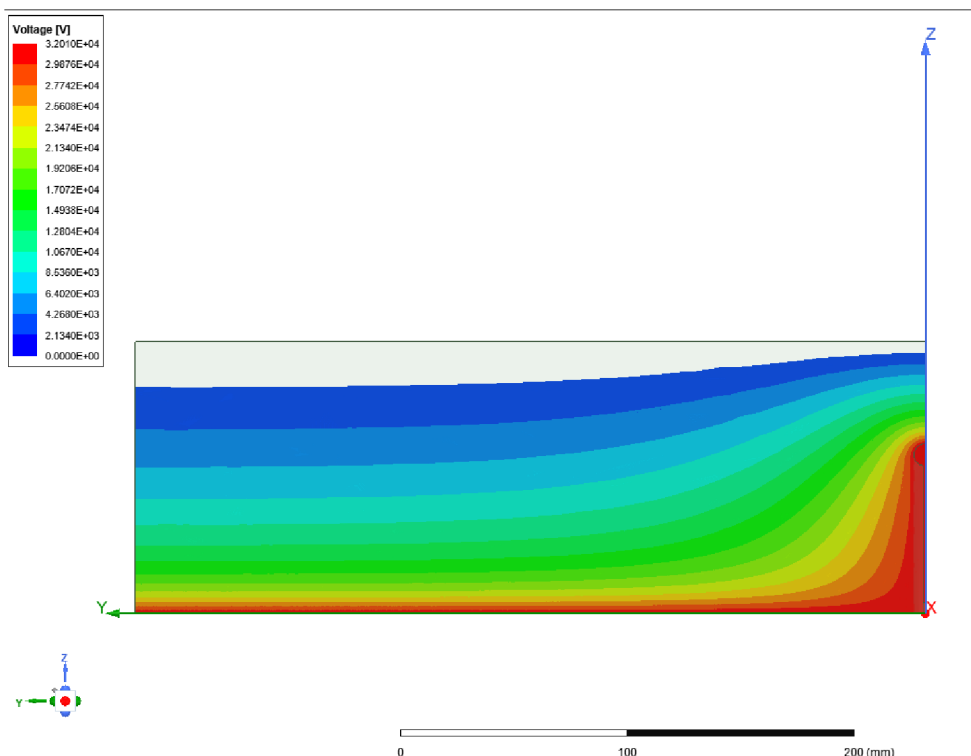
Obr.47 Intenzita elektrického pole E – 3D



Obr.48 Intenzita elektrického pole E – osa Y



Obr.49 Napětí – 3D

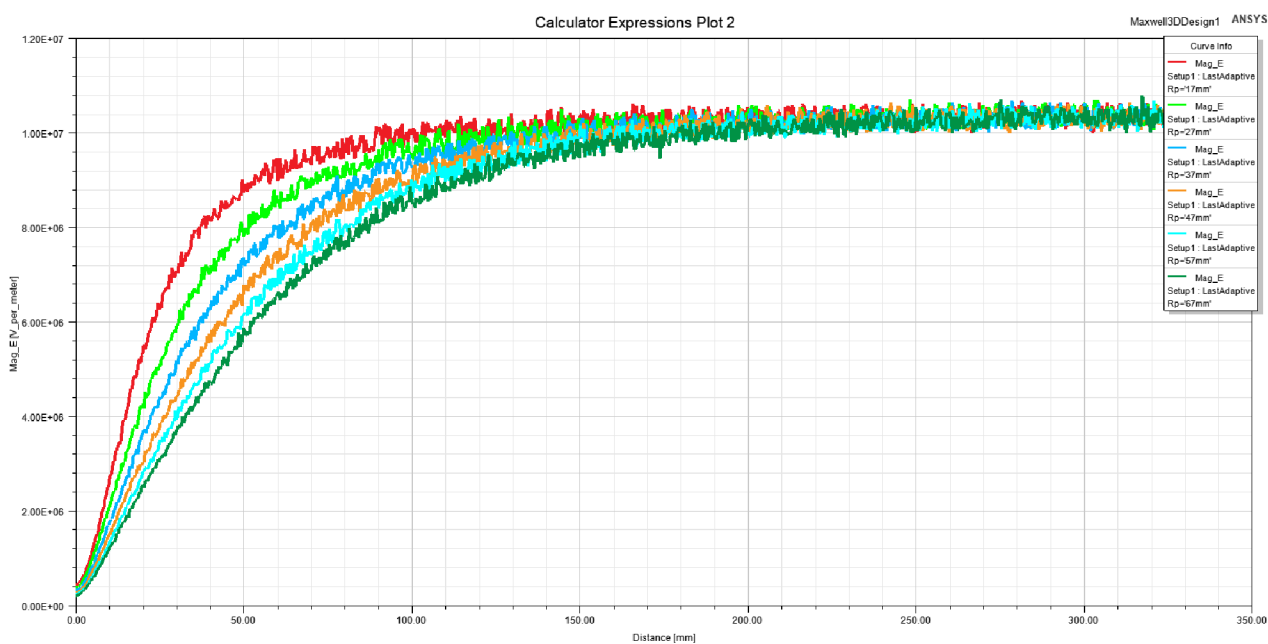


Obr.50 Napětí – osa Y

5.3.1 Výsledky 3D simulace

Z grafu (Obr.51) vyplývá, že se zvětšující se vzdáleností od stínícího disku slabne jeho vliv. K překročení kritické intenzity elektrického pole a ke zvlákňování dojde až v určité vzdálenosti od stínících disků. Z grafu, kde vodorovná osa popisuje délku elektrody od stínícího disku (podél osy Y) a svislá osa popisuje intenzitu elektrického pole, je patrné že zvětšující se průměr stínícího disku ovlivňuje strmost stoupání intenzity elektrického pole a tedy vzdálenost, kde začne zvlákňování. Pro přesné stanovení této vzdálenosti je nutné provést experiment.

Za kritickou hodnotu intenzity elektrického pole pro zvlákňování je možné považovat $3 \cdot 10^6$ V/m. Pokud bude hodnota intenzity elektrického pole pod touto hodnotou, nebude docházet ke zvlákňování. Poloměr stínícího disku R_p byl zvolen 67 mm. V tomto případě zvlákňování začne ve vzdálenosti 25 mm od stínícího disku.



Obr. 51 Průběh intenzity elektrického pole ve směru osy Y

6 Závěr

Úkolem práce bylo navrzení konstrukce převijecího zařízení páskové elektrody, která by umožňovala převíjení a zvlákňování s použitím elektrody ve formě kovového nekonečného pásu. Na tento pásek je nanášen polymerní roztok, který se má rovnoměrně rozvádět ve své horní větvi na pracovní šířku, která odpovídá šířce netkané podkladové textilie, která bude převíjena nad elektrodou. Z důvodu pohyblivosti elektrody bylo zvlákňovací napětí přivedeno na pevnou součást a napětí se přes kovové díly dostane na elektrodu. Od této konstrukce se očekává možnost nanášení nanovláken na podkladovou plochu rovnoměrně v celé šíři podkladové textilie. Produktem je rovnoměrná vrstva nanovláken nanosená na celé šířce podkladové textilie. Produkt může sloužit k výrobě filtrů, roušek a dalším aplikacím v medicínském průmyslu.

Konstrukce musela splňovat požadavky na izolaci napětí od okolí, odstínění elektrického pole v oblasti dolní větve elektrody, usměrnění zvlákňování stínícími disky, dále musí umožňovat také napínání páskové elektrody. Dalšími požadavky je rychlost převíjené elektrody přibližně 1 m/s, elektrická izolace pohonu a částí elektrody pohonu od částí elektrody pod napětím a nanosení a setření polymerního roztoku.

Prvním úkolem bylo vytipování výrobce páskové elektrody. U páskové elektrody je velmi důležitý požadavek na dokonalé začištění svaru tak, aby byl neznatelný. To je důležité z toho důvodu, že by nekvalitně začištěný svar neprošel stíracím zařízením. Dále by nekvalitní svar mohl v důsledku cyklického ohybového namáhání při provozu prasknout. Z těchto důvodů byl vybrán pásek od firmy Pilana s.r.o.

Průměr řemenic byl zvolen 320 mm. Řemenice byly navrženy jako výpalky na laseru z 11 mm ocelového plechu s bočnicemi pro vedení pásu na řemenici.

V zařízení je jeden hnací a jeden hnaný hřídel. Uložení hřídelů je standardní, tedy jedno ložisko je uloženo pevně na hřídeli i na rámu a druhé je uloženo pevně na rámu s možností axiálního posunu hřídele.

Na základě laboratorních zkušeností byl dán požadavek, aby rychlost převíjení páskové elektrody byla cca $1 \text{ m/s} \pm 25\%$. Motor byl vytipován od firmy Minimotor. Typ motoru MC244PT s integrovanou převodovkou s převodovým poměrem 7,5 a momentem 1,2 Nm.

Pro zvlákňovací proces bylo potřeba zajistit dodávání polymeru do pracovní zóny elektrody. Zde je elektroda v podobě kovového pásku, není tedy vhodné použít klasické způsoby nanášení polymeru jako je brodění. To by bylo nevhodné z důvodu potřeby velkého množství polymeru. U dražších polymerních roztoků by se jednalo o neekonomické řešení. Byla vybrána varianta nanášení polymeru pomocí průvlatku. Důvodem byla relativně jednoduchá konstrukce. Dále polymer významně nestéká z elektrody. Nepotřebný polymer není vystaven atmosférickým podmínkám a nezasychá. Při odstávce lze průvlak jednoduše rozebrat a vyčistit. Polymer je nanesen na všechny plochy páskové elektrody.

Polymerní roztok, který se při zvlákňovacím procesu nezvlákni je potřeba opět z elektrody odstranit. Zbytkový polymer je stírán průvlakem s otvorem, který přesně odpovídá převíjené páskové elektrodě, v zadní části. Zde je polymerní roztok setřen a odváděn zpět do zásobníku polymerního roztoku.

Pro návrh elektrody byly provedeny simulace elektrického pole v okolí páskové elektrody. První analýza sloužila pro určení optimální šířky pásku pro elektrodu. Kritériem byla intenzita elektrického pole, která se na páskové elektrodě s naneseným polymerním roztokem vytvoří při přivedení zvlákňovacího napětí. Pro zvlákňování musí být intenzita elektrického pole vyšší než kritická intenzita. Základní úlohou bylo určení šířky pásku, tedy bez stínění spodní větve páskové elektrody.

Druhou úlohou bylo provedení analýzy se stíněním spodní větve páskové elektrody pomocí stínících tyčí. Úkolem stínících tyčí je tzv. odstínění elektrody, tedy ovlivnění elektrostatického pole v okolí elektrody tak, že na elektrodě dojde k poklesu intenzity pod kritickou hodnotu. Důvodem bylo, aby nedocházelo ke zvlákňování případného zbytkového polymeru, protože i po setření může na pásku zůstat tenký povlak polymerního roztoku. Z výsledků vyplývá, že stínící tyče dostatečně plní svou funkci.

Následná 3D analýza byla provedena pro návrh rozměru stínících disků určujících zvlákňovací oblast páskové elektrody a zvyšujících rovnoměrnost zvlákňování polymerního roztoku z převíjené páskové elektrody podél její pracovní délky.

Za kritickou hodnotu intenzity elektrického pole pro zvlákňování je možné považovat $3 \cdot 10^6$ V/m. Pokud bude hodnota intenzity elektrického pole pod touto hodnotou, nebude docházet ke zvlákňování. Poloměr stínícího disku R_p byl zvolen 67 mm. V tomto případě zvlákňování pravděpodobně začne ve vzdálenosti 25 mm od stínícího disku.

Pro ověření analýz bude nutné provést následné experimenty na prototypu, který bude sestaven na základě výkresové dokumentace této práce. Na základě těchto zkoušek se bude pokračovat ve výzkumu pro optimalizaci zvlákňovacího procesu a rovnoměrnosti nanosené vrstvy nanovláken.

7 Zdroje:

- [1] COOLEY, John F., 1902. *Apparatus for electrically dispersing fluids*. Spojené státy americké. Patentový spis US 692631 A. 4.2.1902.
- [2] LUKÁŠ, David. *Nanovlákná: teorie, technologie a použití*. Gerstner, sv. 15. Praha: Academia, 2023. ISBN 978-80-200-3400-7.
- [3] PRONANOTECH, 2019. Nanovlákná a jejich výroba | ProNanoTech [online]. [vid. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.pronanotech.cz/index.php/2019/12/25/nanovlakna-a-jejich-vyroba/>
- [4] FRIEDRICH Ondřej. *Optimalizace zvlákňovacího zařízení s diskovou elektrodou*, Diplomová práce, Technická univerzita v Liberci, 2021. Vedoucí práce Ing. Jan Valtera, Ph.D.
- [5] 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
- [6] EISLER Dominik. *Zvlákňovací zařízení pro výrobu plošného nanovláknenného materiálu*. Bakalářská práce, Technická univerzita v Liberci, 2019. Vedoucí práce Ing. Jan Valtera, Ph.D.
- [7] LIN, Tong a Xungai WANG. *Needleless electrospinning of nanofibers: technology and applications*. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2014. ISBN 978-981-4316-35-4

8 Seznam příloh

Příloha I: Graf průběhu intenzity elektrického pole E- horní elektroda, L=12mm

Příloha II: Graf průběhu intenzity elektrického pole E- horní elektroda, L=22mm

Příloha III: Graf průběhu intenzity elektrického pole E- horní elektroda, L=42mm

Příloha IV: Intenzita elektrického pole E- dolní elektroda, L=12mm

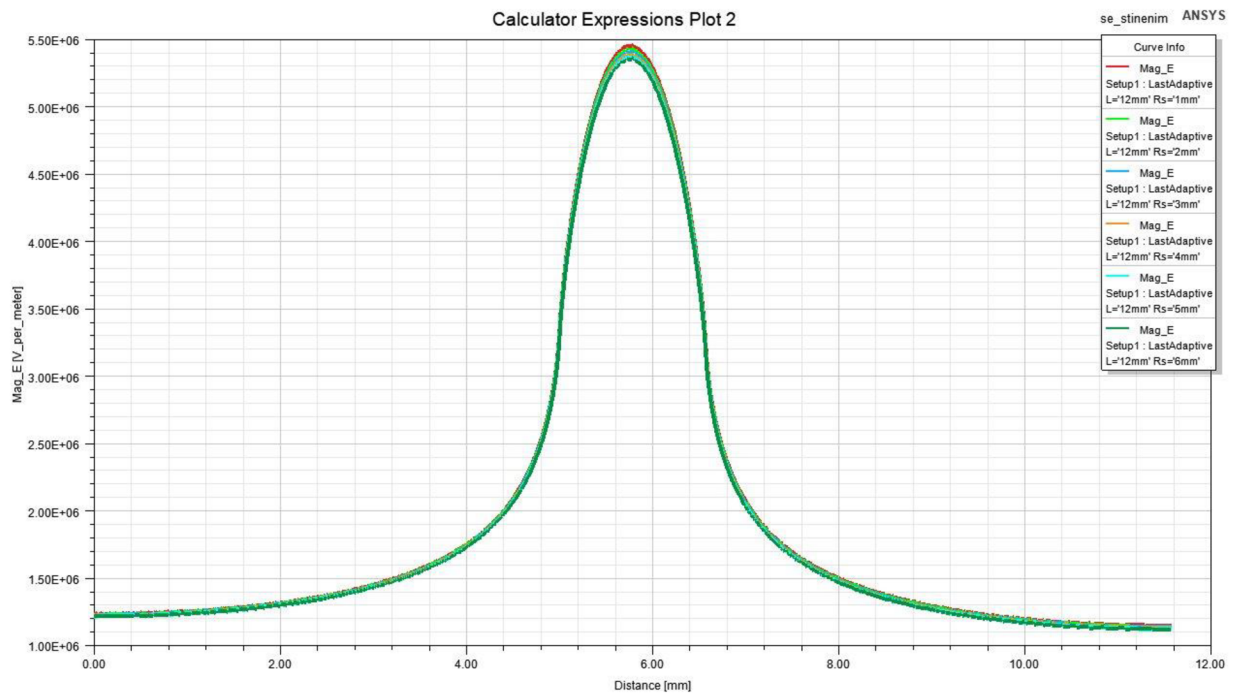
Příloha V: Intenzita elektrického pole E- dolní elektroda, L=22mm

Příloha VI: Intenzita elektrického pole E- dolní elektroda, L=42mm

Příloha VII: Kontrola únosnosti ložiska

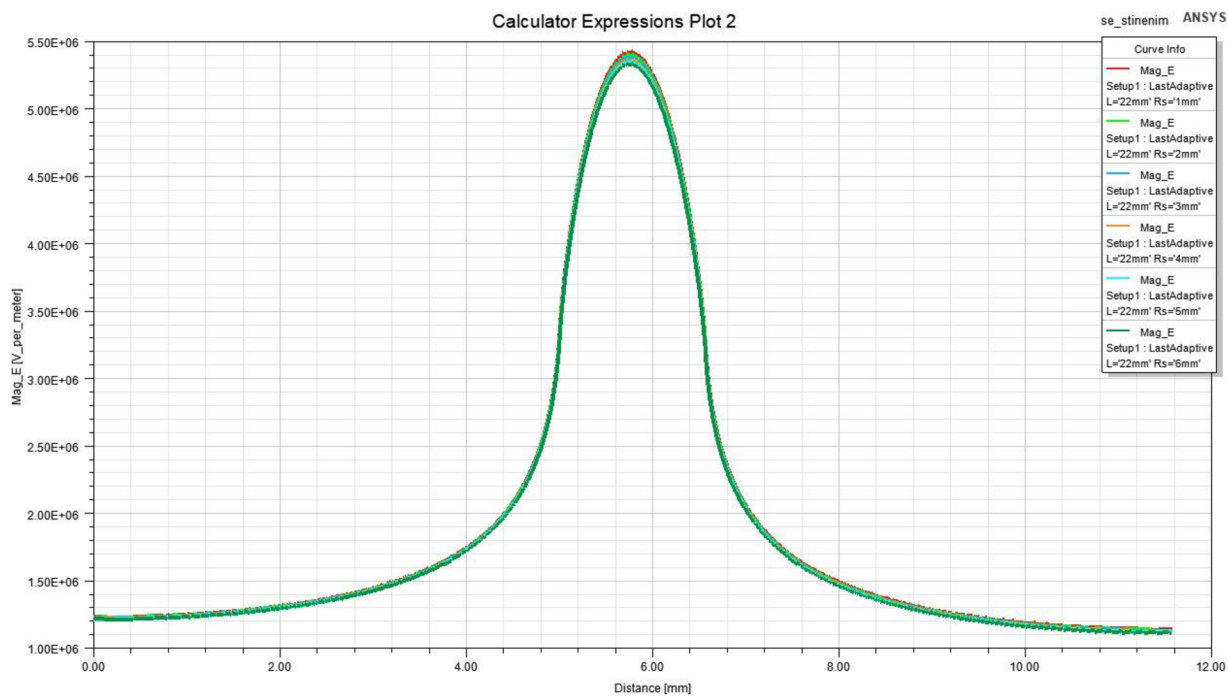
Příloha VIII: Výkresová dokumentace

Příloha I.



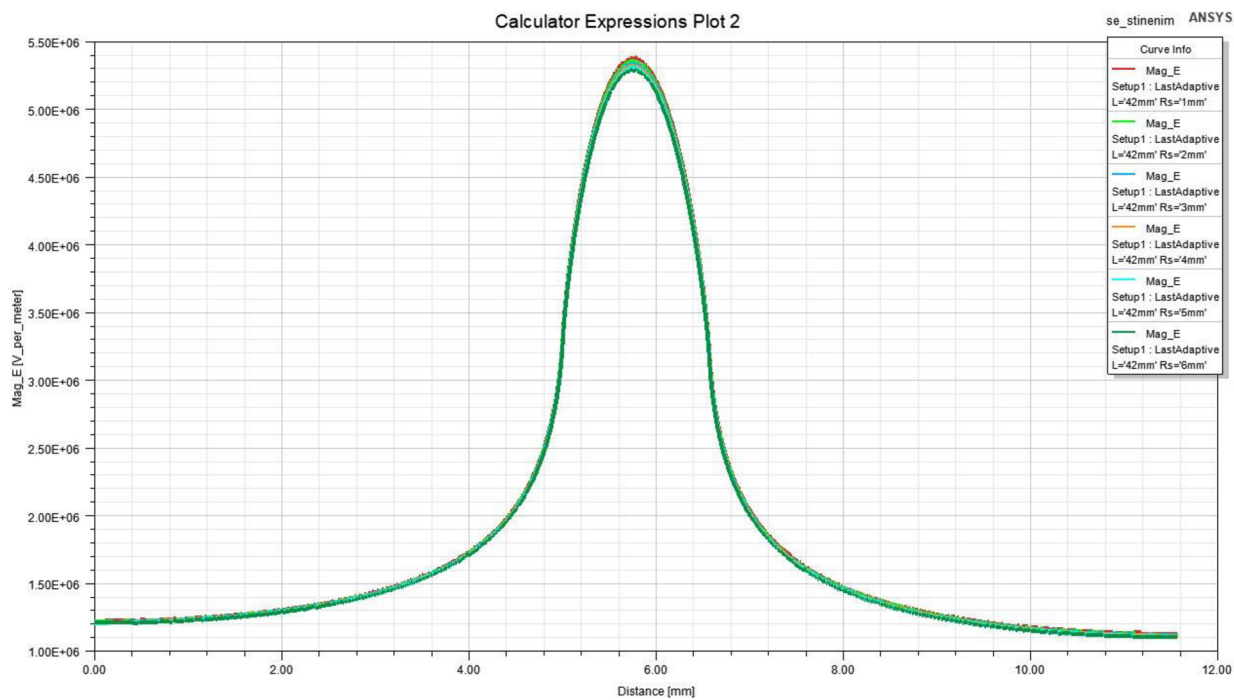
Intenzita elektrického pole E – horní elektroda, L=12mm

Příloha II



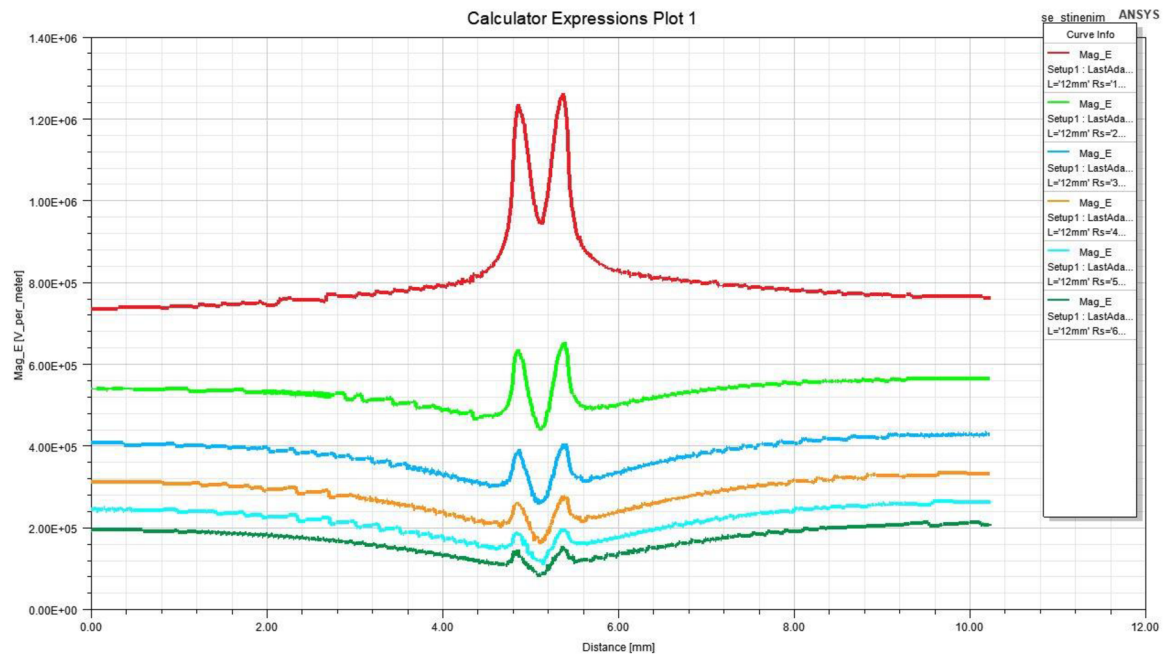
Intenzita elektrického pole E – horní elektroda, L=22mm

Příloha III



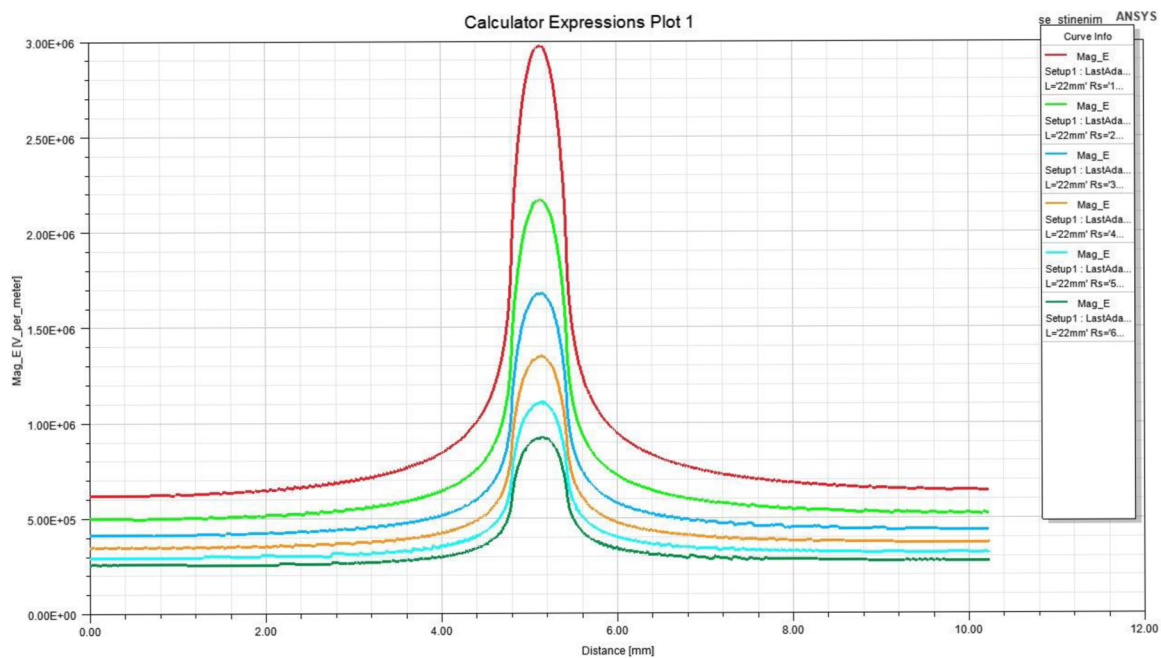
Intenzita elektrického pole E – horní elektroda, L=42mm

Příloha IV



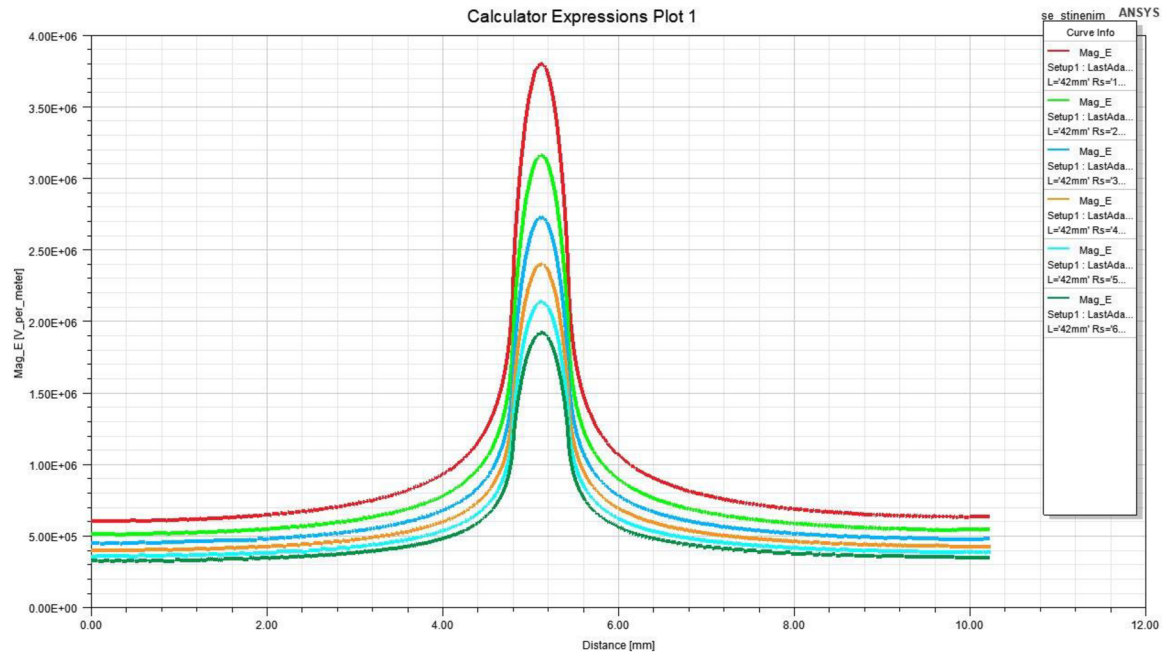
Intenzita elektrického pole E – dolní elektroda, L=12mm

Příloha V



Intenzita elektrického pole E – dolní elektroda, L=22mm

Příloha VI



Intenzita elektrického pole E – dolní elektroda, L=42mm

Příloha VII

Výpočet axiální a radiální síly na ozubeném kole

$$r_1 = 0,012m$$

$$M_1 = 1,2Nm$$

$$i = 1$$

$$\delta_1 = \delta_2 = 45^\circ$$

$$F_{t1} = F_{t2}$$

$$M_1 = M_2$$

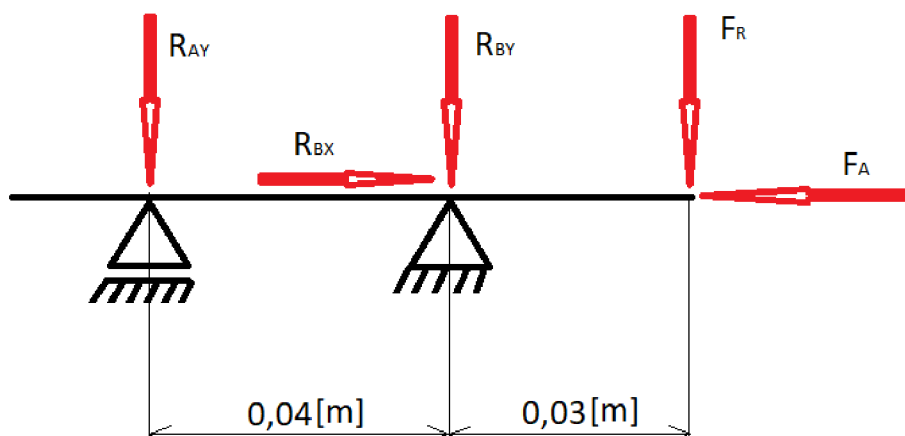
$$F_{t1} = F_{t2} = \frac{M_1}{r_1} = \frac{1,2}{0,012} = 100N$$

$$F_{R1} = F_{A2}$$

$$F_{A1} = F_{R2}$$

$$\begin{aligned} F_{R2} = F_{A1} = F_{R1} = F_{A2} = F_R = F_A = F_{t1} * \operatorname{tg}(\alpha_n) * \sin(\delta_1) = \\ = 100 * \operatorname{tg}(20) * \sin(45) = 25,7 = 26N \end{aligned}$$

Výpočet zatížení ložiska



Rovnice statické rovnováhy

$$X: R_{BX} - F_A = 0$$

$$Y: R_{AY} + R_{BY} + F_R = 0$$

$$M: F_R * 0,03 - R_{AY} + 0,04 = 0$$

$$R_{BX} = F_A = 26N$$

$$R_{AY} = \frac{F_R * 0,03}{0,04} = \frac{26 * 0,03}{0,04} = 19,5N$$

$$R_{BY} = -F_R - R_{AY} = -26 - 19,5 = -45,5N$$

Zatížení ložiska

$$R_{BY} = 45,5N$$

$$R_{BX} = 26N$$

Ložisko: 608

$$C = 3250N$$

$$C_0 = 1370N$$

Hodinová trvanlivost ložiska

$$L_h = \left(\frac{C}{P}\right)^3 * \frac{10^6}{60 * n}$$

Výpočet otáček n , viz výpočet pohonu kapitola 3.4.

Z tabulek

$$P = X * R_{BY} + Y * R_{BX}$$

$$\frac{R_{BX}}{C_0} = \frac{26}{1370} = 0,02$$

$$X = 0,56$$

$$Y = 2$$

$$P = 0,56 * 45,5 + 2 * 26 = 77,5N$$

$$L_h = \left(\frac{3250}{77,5}\right)^3 * \frac{10^6}{60 * 0,822} = 1495277876h$$