



Diplomová práce

Hybridní zvlákňovací jednotka kombinující metody forcespinning a electrospinning.

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Bc. Tomáš Janeček

Vedoucí práce:

Ing. Josef Skřivánek, Ph.D.

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Hybridní zvlákňovací jednotka kombinující metody forcespinning a electrospinning.

Jméno a příjmení:

Bc. Tomáš Janeček

Osobní číslo:

S21000237

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Zadávající katedra:

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Akademický rok:

2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši technologie výroby nanovláken.
2. Navrhněte konstrukční varianty zvlákňovací jednotky kombinující metody forcespinning a electrospinning.
3. Konstrukčně zpracujte vybranou variantu zařízení a vypracujte výrobní dokumentaci.
4. Ověřte vybrané technologické uzly.

<i>Rozsah grafických prací:</i>	10
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	40
<i>Forma zpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	Čeština

Seznam odborné literatury:

1. PEŠÍK, Lubomír. Části strojů: stručný přehled. Díl 2 / Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita, 2005. ISBN 80-7083-608-3;
2. JULIŠ, K., BREPTA, R.: Mechanika I. díl. Statika a kinematika. Technický průvodce 65. SNTL Praha 1986; [3] BRÁT, V., ROSENBERG, J., JÁČ, V.: Kinematika. SNTL/ALFA Praha 1987;
3. [3] 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
4. Pokorný, P. a kol.: Zařízení pro výrobu nanovláken a/nebo mikrovláken odstředivým zvlákňováním roztoku nebo taveniny polymeru, užžitný vzor č. 30004, datum zápisu 15.11.2016
5. Puchalová, I.: Odstředivé zvlákňování biodegradabilních materiálů, bakalářská práce, Liberec 2014

Vedoucí práce: Ing. Josef Skřivánek, Ph.D.
Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Datum zadání práce: 1. prosince 2022
Předpokládaný termín odevzdání: 31. května 2024

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

L.S.

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

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.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce Ing. Josefovi Skřivánkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a vstřícný přístup. Dále děkuji svému konzultantovi doc. Ing. Pavlovi Pokornému, Ph.D. za věcné připomínky a cenné rady.

Poděkování patří rovněž doc. Ing. Janovi Valterovi, Ph.D. za ochotnou pomoc s analýzami, Ing. Pavlovi Holcovi za vyhodnocování snímků a Ing. Ondřejovi Bařkovi, Ph.D. za pomoc při experimentech.

Díky patří také mé rodině a slečně za podporu během celého studia.

HYBRIDNÍ ZVLÁKŇOVACÍ JEDNOTKA KOMBINUJÍCÍ METODY FORCESPINNING A ELECTROSPINNING

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem zařízení kombinující forcespinning a AC electrospinning. V rámci práce byla provedena přestavba odstředivého zařízení s axiálním výstupem na zařízení elektroodstředivé. V softwaru Ansys Electronics Desktop 2020 byly provedeny analýzy elektrického pole v okolí zvlákňovací elektrody, které ověřily vhodnost tvaru výchozí zvlákňovací hlavy i pro electrospinning. Následně byla úspěšně ověřena funkčnost upraveného zařízení. Bylo provedeno srovnání produktivity v odstředivém a elektroodstředivém režimu. V rámci diplomové práce bylo dále zpracováno několik variant elektroodstředivých zařízení, z nichž byla vybrána ta nejvhodnější. Nakonec bylo představeno poloautomatické laboratorní zařízení vyrábějící metodou elektroodstředivého zvlákňování plošnou nanovláknennou strukturu.

Klíčová slova: nanovlákneno, AC electrospinning, odstředivé zvlákňování, elektroodstředivé zvlákňování, spinnereta

HYBRID SPINNING UNIT COMBINING FORCESPINNING AND ELECTROSPINNING METHODS

Abstract

This thesis deals with the design of a device combining forcespinning and AC electrospinning. The conversion of an axial output centrifugal device to an electrospinning device was carried out. Subsequently, analyses of the electric field around the spinneret were performed in Ansys Electronics Desktop 2020 software to verify the suitability of the shape of the initial spinneret for electrospinning as well. Subsequently, the functionality of the modified device was successfully verified. A comparison of productivity in centrifugal and electrospinning mode was performed. Several variants of electrospinning equipment were further developed in the thesis and the most suitable one was selected. Finally, a semi-automatic laboratory device producing a flat nanofibrous structure by the electrospinning method was presented.

Key words: nanofiber, AC electrospinning, centrifugal spinning, electrocentrifugal spinning, spinneret

OBSAH

ÚVOD	11
1 TECHNOLOGIE VÝROBY NANOVLÁKEN	12
1.1 Dloužení (drawing)	12
1.2 Rozfukování taveniny (melt blowing)	13
1.3 Samoorganizování	14
1.4 Šablonová syntéza.....	15
1.5 Fázová separace	15
1.6 Electrospinning	16
1.6.1 DC electrospinning	16
1.6.1.1 Jehlová elektroda	17
1.6.1.2 Zvlákňování z volné hladiny	18
1.6.1.2.1 Válcová elektroda	18
1.6.1.2.2 Strunová elektroda pro DC electrospinning	19
1.6.2 AC electrospinning	20
1.6.2.1 Elektrody pro AC electrospinning	21
1.6.2.1.1 Jehlová elektroda pro AC electrospinning.....	22
1.6.3 Bodová elektroda s kuželovou přeplavovací hlavou	22
1.6.4 Disková elektroda	23
1.6.5 Strunová elektroda pro AC electrospinning	24
1.7 Odstředivé zvlákňování (Centrifugal spinning).....	25
1.7.1 Tryskové odstředivé zvlákňování.....	25
1.7.2 Beztryskové odstředivé zvlákňování.....	27
1.8 Elektroodstředivé zvlákňování	29
2 PŮVODNÍ ZAŘÍZENÍ A JEHO PŘESTAVBA	30

2.1	Izolace mezi spinneretou a motorem	31
2.2	Izolace mezi roztokem a pohonem pumpy (obsluhou).....	34
3	ANALÝZY ELEKTRICKÉHO POLE.....	36
3.1	Analýza elektrického pole v okolí spinnerety.....	36
3.2	Analýza elektrického pole v okolí zvláknovací jednotky.....	39
4	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ	42
4.1	Ověření funkčnosti upraveného zařízení	44
4.2	Vyhodnocení vzorků.....	46
4.3	Vyhodnocení produktivity	49
5	KONSTRUKČNÍ NÁVRH ELEKTROODSTŘEDIVÉHO ZAŘÍZENÍ.....	52
5.1	Elektroodstředivé zařízení	52
5.1.1	Způsob pohonu spinnerety	52
5.1.1.1	První varianta návrhu.....	53
5.1.1.2	Nepřímé uložení.....	54
5.1.1.2.1	Druhá varianta návrhu	58
5.1.1.2.2	Třetí varianta návrhu.....	59
5.1.2	Finální varianta.....	61
5.1.3	Analýza MKP	63
5.1.4	Vedení výsuvu	64
5.1.4.1	Kuličkový celovýsuv	65
5.1.4.2	Lineární vedení	65
5.1.5	Výběr vhodného motoru.....	66
5.2	Laboratorní zařízení.....	70
5.2.1	Kompletní laboratorní zařízení.....	70
5.2.2	Převíjecí systém.....	72

5.2.3 Princip dopravy polymerního roztoku.....	74
ZÁVĚR.....	75
SEZNAM OBRÁZKŮ	76
SEZNAM LITERATURY	82
PŘÍLOHY.....	84

PŘEHLED POUŽITÝCH ZNAČEK

Symbol	Jednotka	Popis
v	mm	Minimální vzdálenost dvou nabitých součástí
E	V/mm	Intenzita elektrického pole
x	mm	Vzdálenost virtuálního kolektoru od povrchu elektrody
E_p	V/mm	Průrazná hodnota vzduchu
U	V	Napětí
U_{ef}	V	Efektivní napětí
U_a	V	Amplitudové napětí
Q	ml/min	Průtok
n	ot/min	Otáčky za minutu
m_{1-5}	g	Hmotnost nanesených vláken za 10 minut
Q	g/min	Průměrná produktivita
m	kg	Hmotnost
J_{0-9}	kg m ²	Momenty setrvačností jednotlivých komponent k ose rotace
n_{0-2}	ot/min	Otáčky jednotlivých hřídelů za minutu
J_{redNU}	kg m ²	Redukovaný moment setrvačnosti pro variantu nepřímého uložení
J_{redPU}	kg m ²	Redukovaný moment setrvačnosti pro variantu nepřímého uložení
M_r	Nm	Rozběhový moment
M_{zr}	Nm	Moment potřebný pro urychlení rotačních hmot
ε_0	s ⁻²	Úhlové zrychlení
F_0	N	Předpětí řemene
F_1	N	Předpínací síla od závitové tyče
σ	MPa	Napětí
p	mm	Posunutí
t	s	Čas rozběhu
f	Hz	Frekvence
P	W	Výkon

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

PA	Polyamid
PP	Polypropylen
PVB	Polyvinylbutyral
PVA	Polyvinylalkohol
PTFE	Polytetrafluorethylen

ÚVOD

Tato diplomová práce je věnována návrhu zvlákňovacího zařízení kombinující metody forcespinning (odstředivé zvlákňování) s metodami AC electrospinning. Forcespinning a electrospinning jsou dvě moderní techniky v oblasti zvlákňování, které se vyznačují vysokou účinností a schopností vytvářet vlákna s mikro a nanometrovým průměrem. Forcespinning využívá pro tvorbu vláken odstředivé síly, zatímco electrospinning pracuje se silami elektrického pole. Oba procesy umožňují zpracování různých polymerních materiálů a vytváření struktur s vysokým měrným povrchem a specifickými vlastnostmi.

Kombinace těchto dvou metod do jedné hybridní zvlákňovací jednotky otevírá nové možnosti v oblasti výroby nanovláken. Tímto spojením lze dosáhnout synergických efektů a vytvářet vlákna s ještě lepšími vlastnostmi než jednotlivými metodami samostatně.

První část práce je zaměřena na rešerši technologie výroby nanovláken.

V druhé části je modifikováno odstředivé zařízení s axiálním výstupem nanovláken na elektrodostředivé. Následně je v softwaru Ansys Electronics Desktop 2020 analyzováno, zda je výchozí zvlákňovací hlava pro odstředivé zvlákňování vhodná i pro electrospinning.

Třetí část je věnována experimentům upraveného elektrodostředivého zařízení.

V poslední části je představeno několik variant návrhů elektrodostředivého zařízení, z nichž nejvhodnější varianta byla vybrána. Na závěr je představen koncept poloautomatického laboratorního zařízení.

1 TECHNOLOGIE VÝROBY NANOVLÁKEN

Nanovlákná jsou taková vlákna, která mají menší průměr než 1000 nm. Především díky vysokému měrnému povrchu, a vysoké porozitě jsou nanovlákná využívána zejména pro filtraci, tkáňové inženýrství, výrobu ochranných oděvů nebo při výrobě a uchování energie. [1]

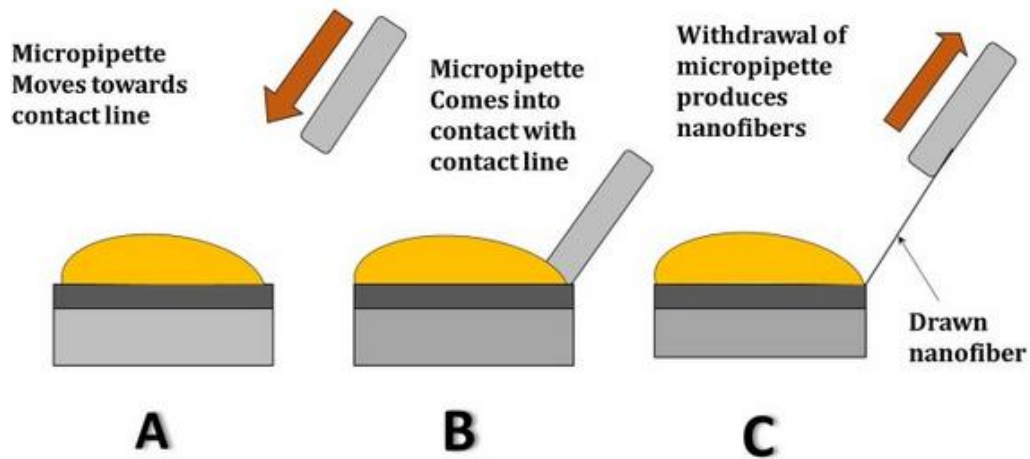
Vlákná lze připravovat jak z polymerů rozpuštěných v rozpouštědle (polymerních roztoků), tak z roztavených polymerů (tavenin). Pro tvorbu nanovláken mohou být použity síly různé fyzikální, nebo chemické podstaty.

Existuje řada různých technologií pro výrobu nanovláken, jsou jimi například dloužení (drawing), rozfukování taveniny (melt blowing), samoorganizování, šablonová syntéza, nebo fázová separace. Nejrozšířenějším způsobem výroby nanovláken je zvlákňování účinky elektrického pole (electrospinning). Dalšími používanými metodami pro výrobu nanovláken jsou například zvlákňování odstředivou silou (forcespinning/centrifugal spinning).

V následující kapitole budou tyto pojmy v krátkosti vysvětleny.

1.1 Dloužení (drawing)

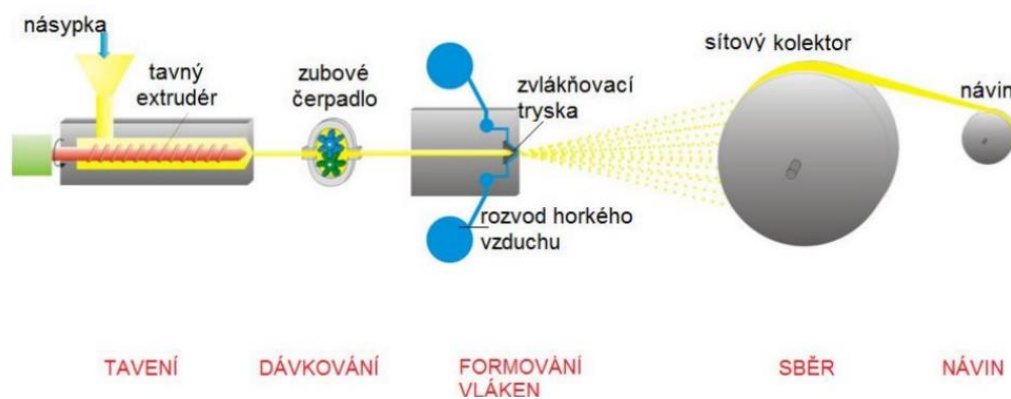
Technologie dloužení umožňuje produkci jednotlivých nanovláken. Obrázek 1 ukazuje proces výroby nanovlákná pomocí metody dloužení. Nejprve je nutné vytvořit drobnou kapku roztoku, nebo taveniny polymeru na podkladovém materiálu (A). Poté se mikropipeta dostává do kontaktu s hranicí kapky (B). Při následném vytahování mikropipety dochází k dloužení vlákna mezi mikropipetou a kapkou (C). Tato technologie je vhodná především pro viskoelastické materiály, které vydrží tahové napětí a silné deformace. Finální průměr vláken závisí na rychlosti vypařování roztoku/tuhnutí taveniny, typu použitého materiálu a rychlostí tažení. [1]



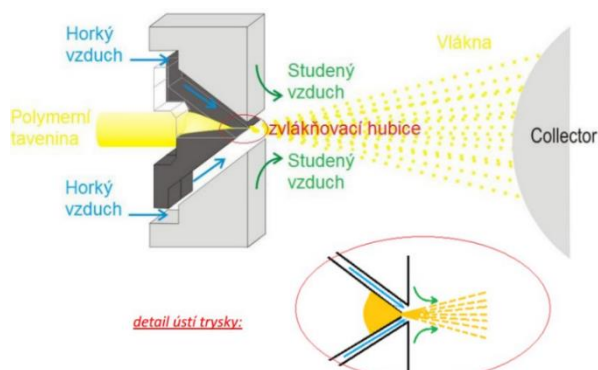
Obrázek 1 - Proces výroby nanovlákn pomocí technologie dloužení [1]

1.2 Rozfukování taveniny (melt blowing)

Technologie rozfukování taveniny byla vyvinuta již v padesátých letech minulého století v Naval Research Laboratory. Z obrázku 2 je patrná technologie výroby. Nejprve se používaný materiál (například PP, PE, PES) roztaví v extrudéru, poté je polymer ve formě taveniny vytlačován sérií trysek ze zvláknovací hlavy. Zde je tavenina strhnuta a unášena rychle proudícím studeným vzduchem. Obrázek 3 ukazuje detail proudění vzduchu v okolí zvláknovací trysky. Za výrazného natahování a tuhnutí taveniny vznikají nanovlákn. Vlákna následně dopadají na sběrný kolektor (viz obrázek 4), ze kterého jsou navinuta v podobě netkané náhodně orientované textilie. [2]



Obrázek 2 - Schéma technologie melt blowing [2]



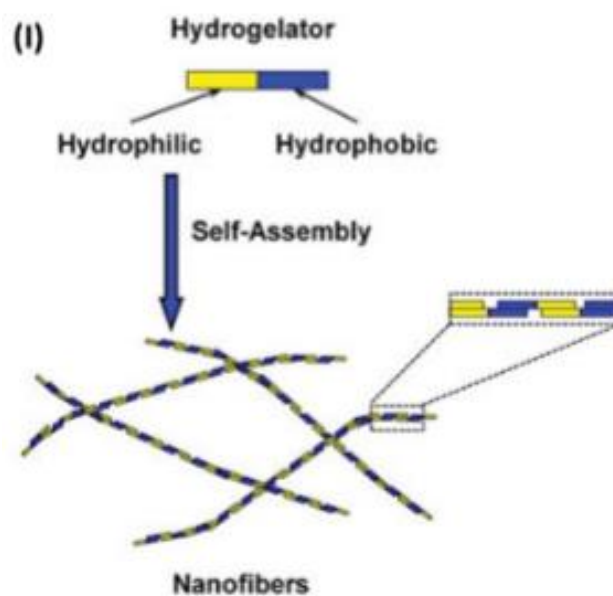
Obrázek 3 – Detail zvláknovací trysky [4]



Obrázek 4 - Výroba nanovláken pomocí technologie melt blowing [3]

1.3 Samoorganizování

Při tvorbě vláken pomocí samoorganizování jsou nanovlákna tvořena z malých molekul, spojovaných mezimolekulární interakcemi. Jedním z používaných mechanismů je založen na tvorbě hydrogelu, tvořeného dvěma fázemi. První fáze je kapalná, zpravidla se používá voda. Druhou fází tvoří polymer. Po přidání polymeru do vody dochází k řetězení molekul polymeru. Tímto způsobem je možné vyrobit nanovlákna o průměru 5 – 25 nm. [1, 4]

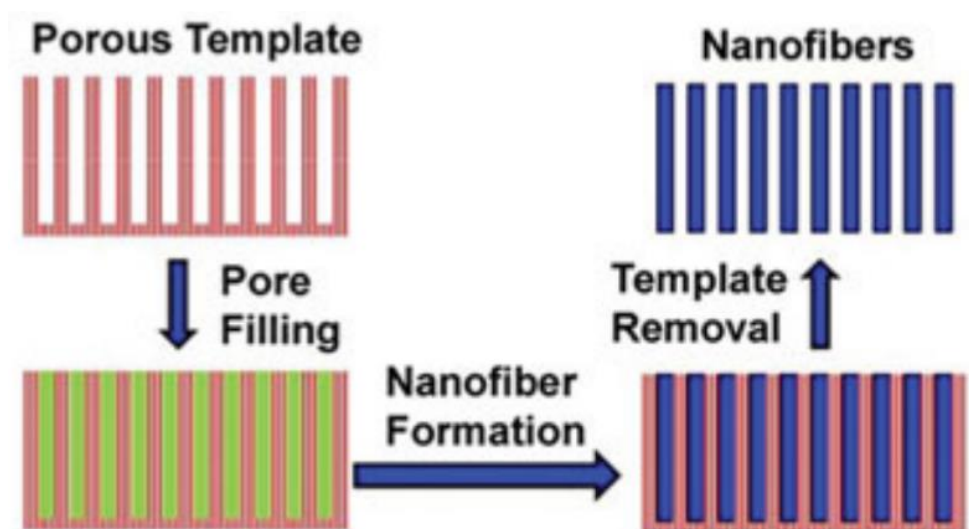


Obrázek 5 - Schéma procesu samoorganizování [4]

1.4 Šablonová syntéza

Jak už název napovídá, jedná se o výrobu nanovláken v pórovitých šablonách. Šablony se vyrábějí například eloxací hliníkové fólie. Na obrázku 6 je vidět proces výroby vláken pomocí šablonové syntézy. V prvním kroku je pórovitá šablona zaplněna roztokem polymeru. Odstraněním rozpouštědla vznikají nanovlákná. Pro získání oddělených nanovláken je třeba odstranit šablonu rozpuštěním nebo leptáním.

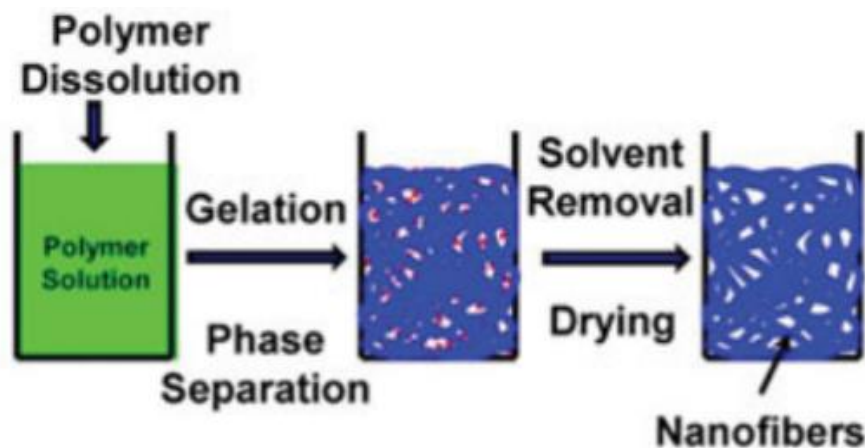
Výhoda této metody spočívá v tom, že lze z různých materiálů, jako jsou kovy, uhlík, elektricky vodivé polymery a polovodiče, vytvářet vlákna nebo dutá vlákna o průměru několika nanometrů. [1]



Obrázek 6 – Schéma procesu šablonové syntézy [4]

1.5 Fázová separace

Proces výroby vláken pomocí fázové separace je schématicky znázorněn na obrázku 7. Polymer se nejprve rozpustí za vzniku homogenního roztoku. Poté se z roztoku při udržování gelovací teploty stává gel, následně dochází k separaci fází a tvorbě nanovláknenné sítě. Výsledná nanovlákná jsou připravena po odstranění rozpouštědla a usušení sítě. [4]



Obrázek 7 - Schéma metody fázové separace [4]

Tato práce se věnuje kombinaci metody electrospinningu a forcespinningu, proto budou v následujících kapitolách tyto pojmy blíže popsány.

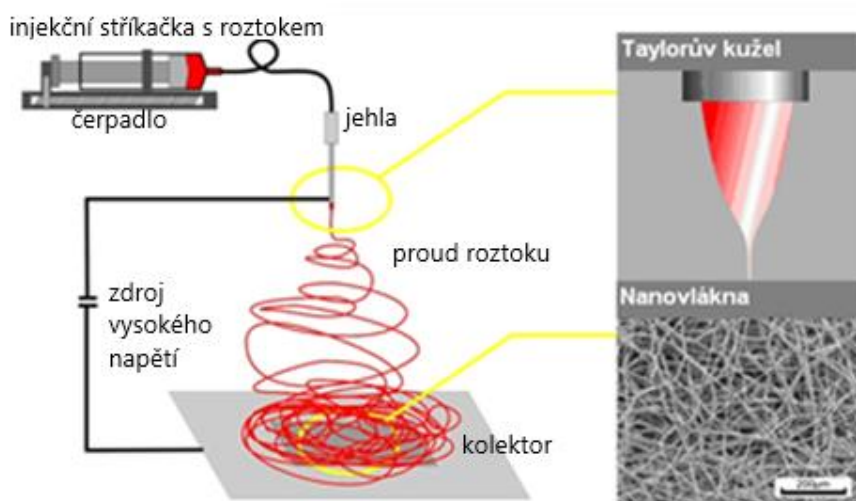
1.6 Electrospinning

Electrospinning je technologický proces, který k tvorbě nanovláken využívá silného elektrického pole. Podle typu elektrického pole lze rozdělit electrospinning na DC electrospinning a AC electrospinning. Tyto pojmy budou představeny v následující kapitole.

1.6.1 DC electrospinning

Na obrázku 8 je znázorněn základní systém využívající technologie DC (direct current – stejnosměrný proud) electrospinning, neboli zvlákňování pomocí elektrostatického pole. Je tvořen injekční stříkačkou obsahující elektricky vodivý roztok zvlákňovaného polymeru, dutou jehlou, zdrojem stejnosměrného napětí a kolektorem. Roztok je injekční stříkačkou vytlačován dutou jehlou na její hrot. Na hrotu zaujímá roztok díky povrchovému napětí tvar kulové kapky. Proces stejnosměrného zvlákňování začíná připojením zdroje vysokého napětí mezi jehlu a kolektor. Rozdíl potenciálů elektrody a kolektoru (zpravidla v řádu desítek kilovolt) zapříčiní vznik elektrostatického pole. Vlivem vysokého napětí začnou na kapku kromě sil povrchového napětí působit také síly elektrostatického pole. Jakmile překročí napětí kritickou hodnotu, nabitá kapka na hrotu jehly se deformuje do tvaru tzv. Taylorova kužele (viz obrázek 8), z něhož je elektrostatickými silami směrem ke kolektoru dloužen velmi jemný proud nabitého roztoku – tzv. tryska. Během putování trysky z jehly na kolektor způsobují elektrostatické síly švihání a ohýbání tekuté trysky. Tyto pohyby umožňují polymerním řetězcům klouzat

v roztoku jeden po druhém, což má za následek velmi významné dlužení vláken a rychlé odpařování rozpouštědla. Vlákna následně dopadají na kolektor, kde jsou dosušena. [5]



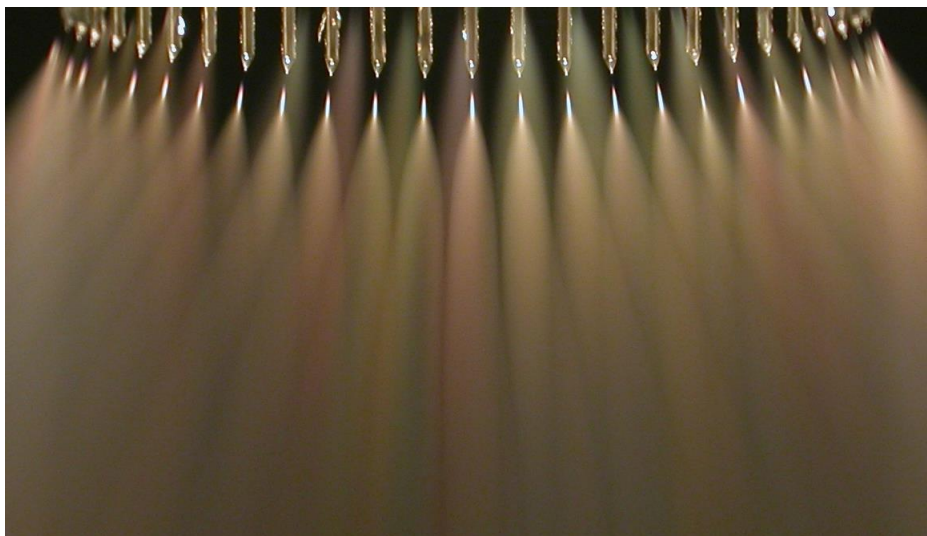
Obrázek 8 - Princip technologie DC electrospinning [6]

Zvlákňovací elektroda má na průběh zvlákňování zásadní vliv. Z toho důvodu bude následující část věnována nejpoužívanějším elektrodám pro DC electrospinning.

1.6.1.1 Jehlová elektroda

Jehlová, neboli kapilární elektroda je nejjednodušším typem elektrody. Princip této elektrody byl popsán v kapitole 1.6.1 výše (viz obrázek 8). Vlivem malého povrchu kapky se na hrotu jehly tvoří velmi málo trysek. Produktivita je velmi nízká, proto je jehlová elektroda vhodná zejména pro laboratorní účely.

Použití vícejehlové elektrody (viz obrázek 9) přineslo mírné navýšení produktivity, objevily se ale další potíže jako například vzájemné nepříznivé působení elektrostatického pole mezi nabitými elektrodami nebo ucpávání jehel. [5]



Obrázek 9 – Vícejehlová elektroda [7]

Významný nárůst produktivity přineslo až objevení technologie zvlákňování z volné hladiny.

1.6.1.2 Zvlákňování z volné hladiny

V roce 2003 vyvinul tým vedený profesorem Oldřichem Jirsákem na Technické univerzitě v Liberci převratnou technologii pro průmyslovou výrobu nanovláken. Bylo zjištěno, že za vhodných podmínek lze vytvářet vlákna i z volné hladiny roztoku. Tvorba vláken je podmíněna překročením takzvané kritické hodnoty elektrické intenzity na elektrodě. [8]

Elektrická intenzita E (někdy také nazývaná intenzita elektrického pole) je veličina, která velmi významně ovlivňuje zvlákňovací proces electrospinningu. Tato veličina závisí na tvaru elektrody a jejího okolí. Čím je poloměr elektrody menší, tím je elektrická intenzita vyšší. S rostoucí elektrickou intenzitou roste i produktivita, a vyrobená vlákna mají menší průměr. Pomocí simulačních programů, jako je například Ansys Electronics je možné hodnoty elektrické intenzity vypočítat a graficky znázornit. [5]

Objev této metody je milníkem ve vývoji nanotechnologií. Proto jsou v následující kapitole popsány nejvýznamnější typy elektrod pracujících na principu zvlákňování z volné hladiny.

1.6.1.2.1 Válcová elektroda

Válcová elektroda, zobrazená na obrázku 10 je tvořena elektrodou ve tvaru válce. Je částečně ponořena v polymerním roztoku. Při otáčení válečku ulpívá roztok vlivem sil

povrchového napětí na plášti válce. Otáčením je vrstva roztoku ulpěná na válci unášena po obvodu válce. V oblastech s nadkritickou intenzitou elektrického pole dochází k tvorbě Taylorových kuželů, ze kterých jsou směrem ke kolektoru dložené trysky roztoku. Z obrázku 10 je patrné, že vlákna vznikají v největší míře na hřbetu válce. Důvodem je, že v této oblasti dosahuje elektroda nadkritické hodnoty elektrické intenzity. [5]



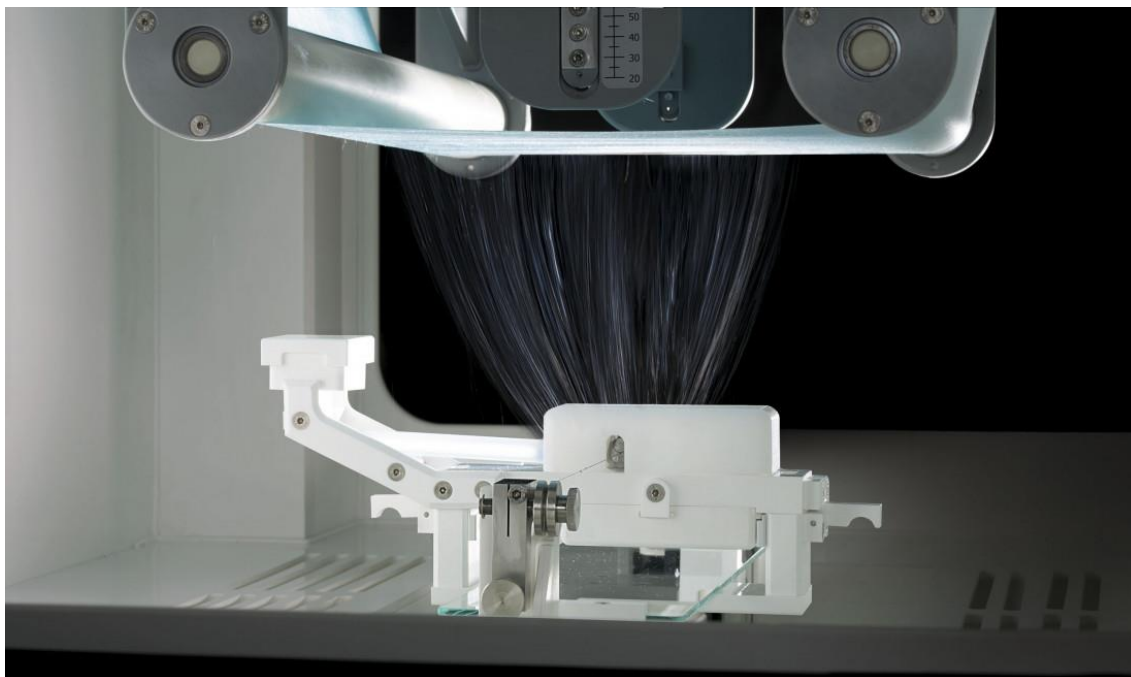
Obrázek 10 – Válcová elektroda [9]

Zařízení toho typu prodávala společnost Elmarco pod ochrannou známkou Nanospider™. Jednalo se o první stroj určený pro průmyslovou výrobu nanovláken. [10]

K výhodám této technologie patří z důvodu většího funkčního povrchu elektrody vyšší produktivita, než u jehlových elektrod. Nevýhodou je změna vlastností roztoku v důsledku odpařování rozpouštědla během zvláknovacího procesu.

1.6.1.2.2 Strunová elektroda pro DC electrospinning

Na obrázku 11 je zachycený Nanospider™ druhé generace. Jedná se o tenkou, statickou strunu, na kterou je pohyblivou hlavou nanášena vrstva polymerního roztoku. Vlivem silného elektrického pole mezi strunou a kolektorem dochází k dložení nanovláken směrem ke kolektoru. Před kolektorem je převíjena podkladová textilie, na kterou vlákna dopadají. [11]



Obrázek 11 – Strunová elektroda [12]

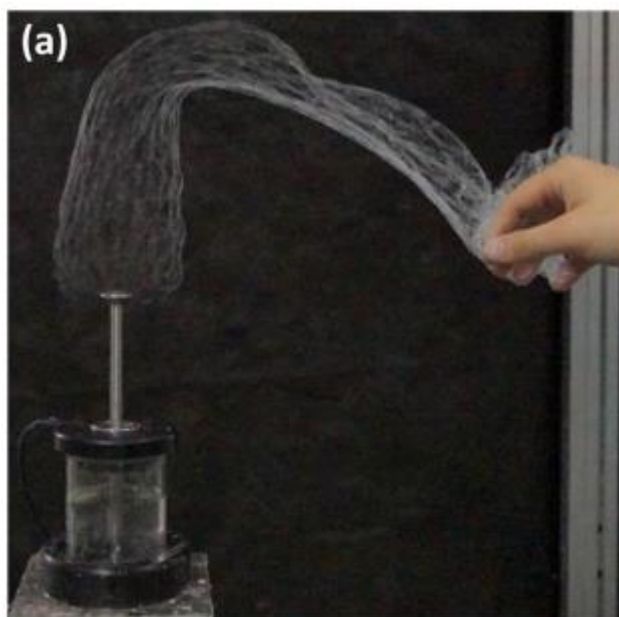
Oproti Nanospideru první generace má druhá generace lépe zpracovanou dodávku roztoku během zvlákňování. Díky tomu, že se pro zvlákňování využívá malé množství stále čerstvého roztoku, lze dodržet konstantní parametry vyrobeného materiálu během výrobního procesu. Další výhodou ve srovnání s válcovou elektrodou je vyšší intenzita elektrického pole, daná nižším průměrem elektrody. Jak již bylo uvedeno výše, vyšší intenzita způsobuje vyšší produktivitu a výrobu vláken nižších průměrů. [11]

1.6.2 AC electrospinning

AC (alternating current – střídavý proud) electrospinning, neboli zvlákňování pomocí střídavého elektrického pole je nová metoda, objevená v roce 2012 na Technické univerzitě v Liberci. Jak už napovídá název, AC electrospinning v mnohém podobá DC electrospinningu. U obou metod jsou vlákna tvořena díky účinkům silného elektrického pole. Vlivem střídající se polarity AC napětí dochází vlivem ionizování vzduchu k emitaci kladně a záporně nabitých částic do okolí elektrody. Tím se okolo celé elektrody vytváří takzvaný virtuální kolektor. Mezi ním a zvlákňovací elektrodou dochází ke vzniku elektrického pole. Tento princip nahrazuje funkci fyzického kolektoru, který se používá při zvlákňování pomocí technologie DC electrospinning. [9]

Nanovlákna vznikají mezi virtuálním kolektorem a elektrodou. Vlákna s opačnou polaritou se navzájem přitahují a tvoří kompaktní závoj nad elektrodou, který se nazývá

nanovláknenná vlečka (viz obrázek 12). Vlečka je dále unášena elektrickým větrem (proudem iontů). [9]



Obrázek 12 – Výsledný produkt AC electrospinningu - kompaktní nanovláknenná vlečka se kterou lze dále manipulovat [13]

Jak je patrné z obrázku 12, nanovláknenná vlečka je velmi kompaktní a lze s ní dále manipulovat. To je způsobeno absencí fyzického kolektoru. Díky technologii AC electrospinning vnikají nové příležitosti pro využití nanovláken, např. lze nanovláknennou lečku ovíjet kolem nitě (jádra) a tvořit tak jádrovou přízi. [9]

Podoba zvláknovací elektrody je pro zvláknovací proces velmi důležitá. Z toho důvodu budou v následující kapitole představeny nejpoužívanější elektrody pro AC electrospinning.

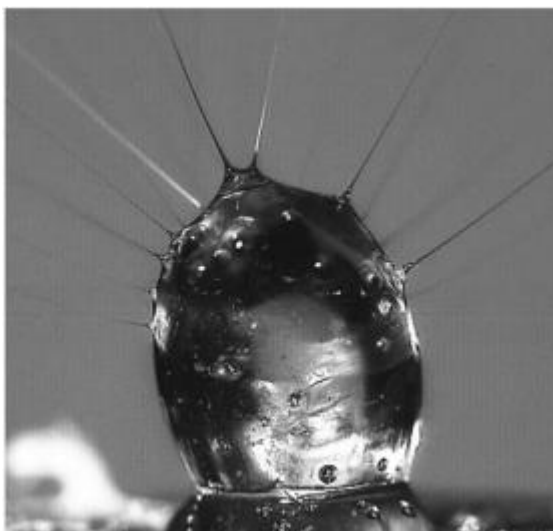
1.6.2.1 Elektrody pro AC electrospinning

Většinu elektrod pro DC electrospinning lze s drobnými úpravami použít i pro AC electrospinning. Při návrhu elektrody je třeba brát zřetel na to, že malá část vláken, která nemá dostatečnou energii, je přitahována zpět na elektrodu. Při nedostatku roztoku na povrchu elektrody dochází ke vzniku suchých míst, ve kterých se hromadí zaschlá vlákna a brání tvorbě vláken. To snižuje produktivitu zařízení. Z tohoto důvodu je vhodné elektrody pro AC electrospinning přeplovat větším množstvím polymeru, než je potřeba ke zvláknění. Omývání a rozpouštění ulpělých vláken nazýváme přeplovací samočisticí efekt. [5]

1.6.2.1.1 Jehlová elektroda pro AC electrospinning

Pro zvlákňování ve střídavém elektrickém poli lze použít systém popsany v kapitole 1.6.1 využívající jehlovou elektrodu. Po připojení ke zdroji střídavého vysokého napětí odpadá díky přirozeně se vyskytujícímu virtuálnímu kolektoru nutnost využívat opačně nabitý kolektor.

Na obrázku 13 je zobrazena kapka roztoku na hrotu jehly, z níž jsou vlivem střídavého elektrostatického pole dlouženy polymerní trysky. Výhodou metody AC electrospinning ve srovnání s metodou DC electrospinning je zpravidla vyšší hustota trysek a z ní plynoucí vyšší produktivita procesu. Jehlová elektroda je kvůli malému funkčnímu povrchu využívána zejména pro laboratorní účely. [5]

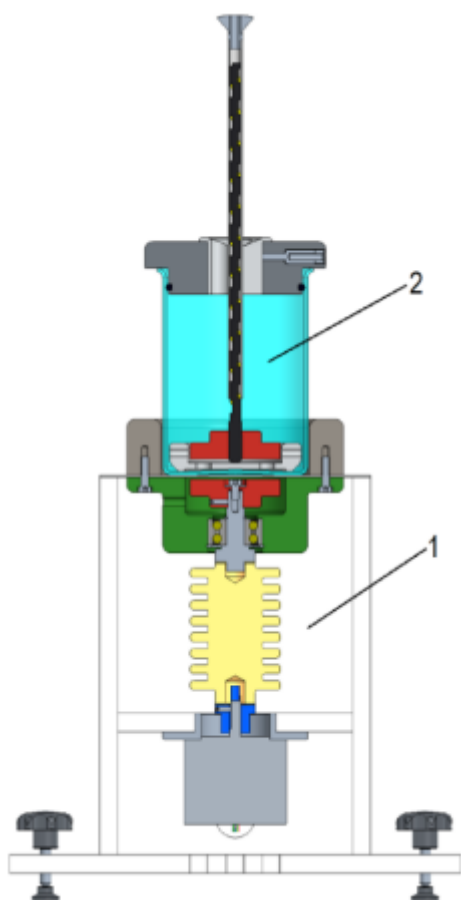


Obrázek 13 - Vznikající vlákna dloužená z povrchu kapky roztoku [14]

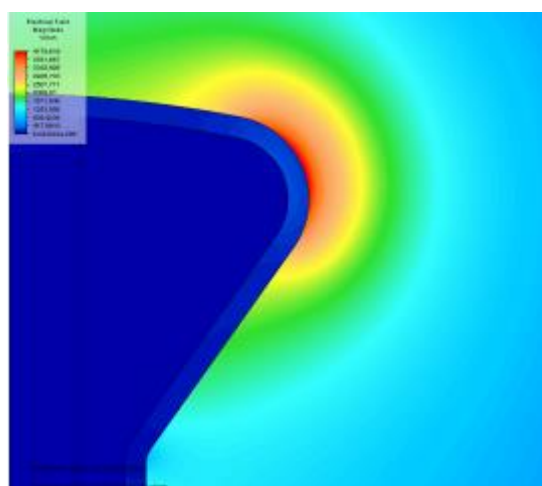
1.6.3 Bodová elektroda s kuželovou přeplavovací hlavou

Bodová elektroda na obrázku 14 pochází z práce [15] a sestává se z kádinky se zvlákňovaným roztokem (2). Skrz dno kádinky je pomocí magnetické spojky přenášen krouticí moment z krokového motoru (1) na hřídel šnekového dopravníku. Roztok je dutinou dopraven až na vrchol zvlákňovací elektrody, kde stéká přes hranu elektrody. Při přechodu roztoku přes hranu je překročena nadkritická hodnota elektrické intenzity (viz oblast zbarvená červeně na obrázku 15), z toho důvodu dochází v této oblasti ke

vzniku vlákna. Nezvlákněný roztok stéká po trubičce zpět do kádinky, tím omývá a rozpouští ulpělá vlákna na elektrodě. [5]



Obrázek 14 – Bodová elektroda s kuželovou přeplavovací hlavou, (1) pohonná jednotka, (2) zvlákněvací nádoba [13]



Obrázek 15 – Rozložení intenzity elektrického pole v okolí bodové elektrody [16]

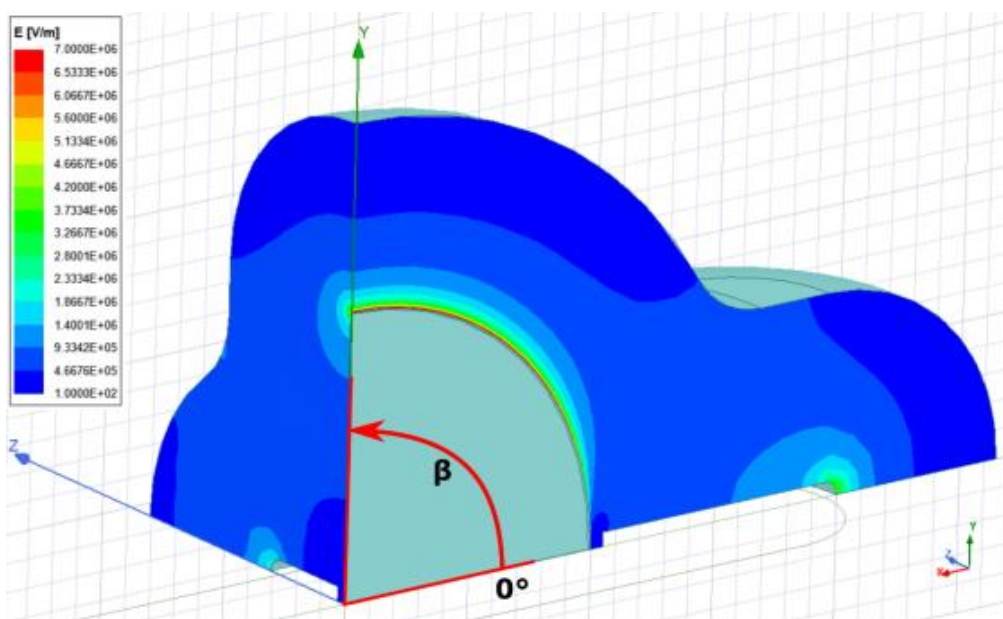
1.6.4 Disková elektroda

Princip diskové elektrody vychází z válcové elektrody popsané v kapitole 1.6.1.2.1. Na obrázku 16 je znázorněna disková elektroda tvořící kompaktní nanovláknennou vlečku. Elektroda je tvořena tenkým diskem, který je ve spodní části smáčen v roztoku polymeru. Otáčením kolem horizontální osy je roztok vynášen do zvlákněvací oblasti. Jeho malá tloušťka usnadňuje překročení kritické intenzity. [8]



Obrázek 16 - Disková elektroda [8]

Na obrázku 17 je vykreslena elektrická intenzita v okolí diskové elektrody. Nakritická hodnota je znázorněna červenou barvou. V této oblasti dochází k překonání kritické intenzity a tvorbě vláken.

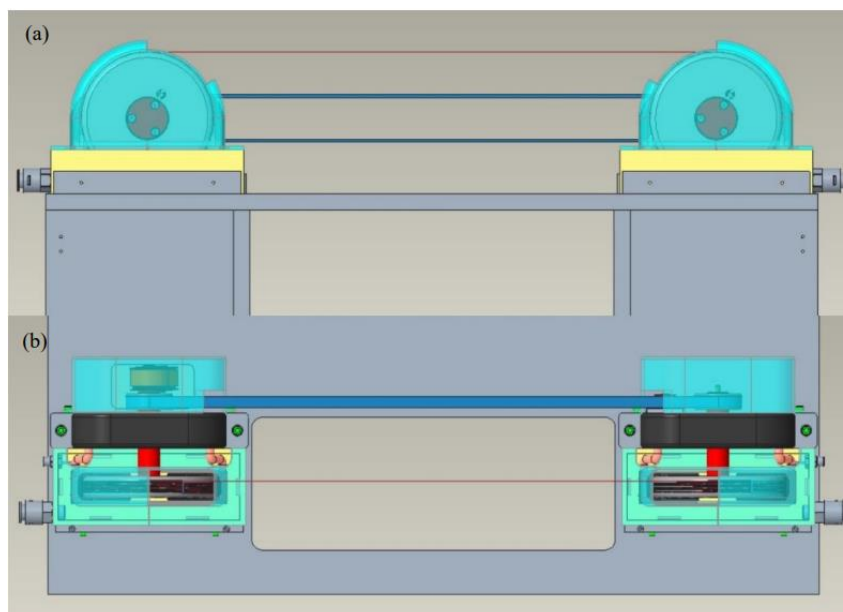


Obrázek 17 – Rozložení elektrické intenzity v okolí diskové elektrody [8]

1.6.5 Strunová elektroda pro AC electrospinning

Princip této metody vychází z výše popsaného zařízení Nanospider II. generace. Systém využívající strunovou elektrodu je znázorněn na obrázku 18. Jedná se o ocelovou strunu, která je střídavě převíjena z jedné řemenice na druhou. Obě řemenice jsou

ve spodní části ponořeny v elektricky vodivém roztoku, který je nabíjen vysokým střídavým napětím. Po odvinutí struny ulpívá na struně tenká vrstva roztoku. Vlivem velmi malého průměru struny dochází k překročení kritické hodnoty elektrické intenzity a vzniku nanovlákněné vlečky. [17]



Obrázek 18 - Zařízení využívající strunovou elektrodu ve střídavém elektrickém poli [17]

Pro dosažení vyšší produktivity lze umístit několik jednotek za sebe. Zařízení je pro svou vysokou produktivitu a homogenitu nanovlákněné vrstvy vhodné pro průmyslovou výrobu.

1.7 Odstředivé zvlákňování (Centrifugal spinning)

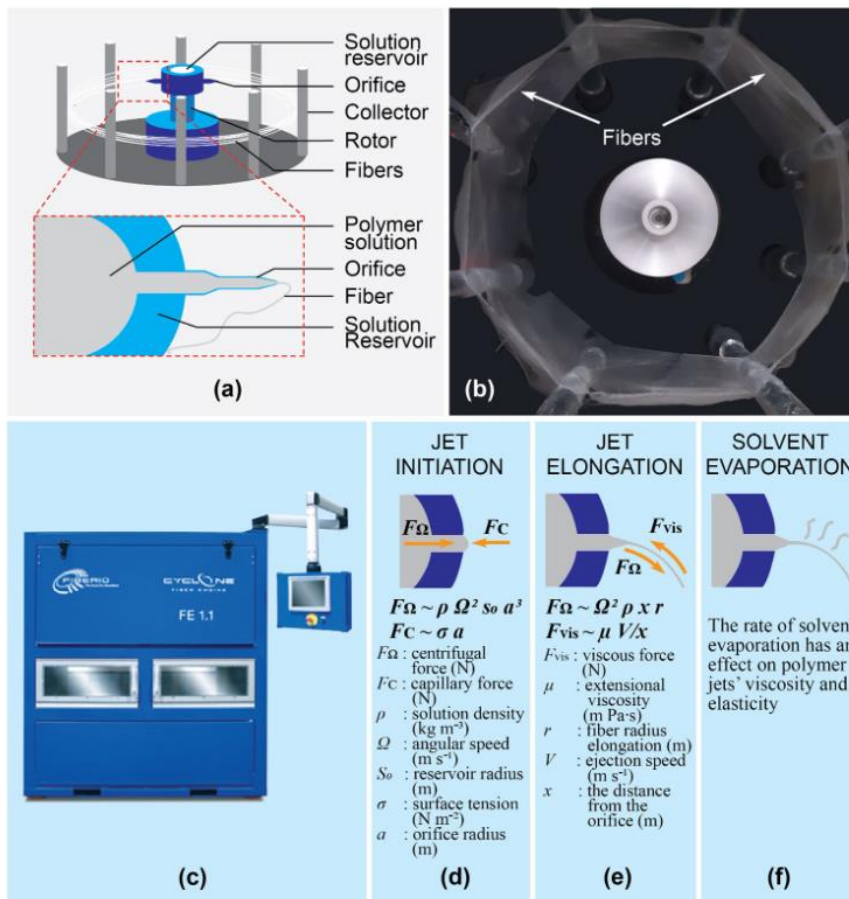
Jak už název napovídá, odstředivé zvlákňování je metoda, která pro prodloužení vláken využívá odstředivé síly, které působí na roztok, nebo taveninu rotující společně se zvlákňovací hlavou. Následující kapitola se věnuje dvěma odlišným principům výroby nanovláken odstředivým způsobem.

1.7.1 Tryskové odstředivé zvlákňování

Prvním druhem odstředivého zvlákňování je zvlákňování tryskové. Jedná se o nejpoužívanější metodu využívající ke zvlákňování odstředivých sil.

Na obrázku 19 je zachycena základní aparatura pro tryskové odstředivé zvlákňování. Sestává se ze zvlákňovací hlavy (spinnerety) s otvory a kolektoru. Spinnereta rotuje v řádech tisíců otáček za minutu a je zásobována roztokem (nebo

taveninou). Jakmile překročí rychlost otáčení spinnerety kritickou hodnotu, překonává odstředivá síla povrchové napětí zvláknovaného roztoku, či taveniny. To se projevuje prýštěním roztoku z trysek po obvodu spinnerety. Trysky jsou dluženy kombinací odstředivých sil a sil odporu vzduchu. Rostoucí povrch natahovaných vláken má za následek urychlení procesu vypařování rozpouštědla nebo tuhnutí taveniny. Na kolektor dopadají téměř suchá vlákna.[4]



Obrázek 19 – Schema tryskového odstředivého zvláknování, Zařízení Cyclone™ FE 1.1 vyvinuté firmou FibeRio [18]

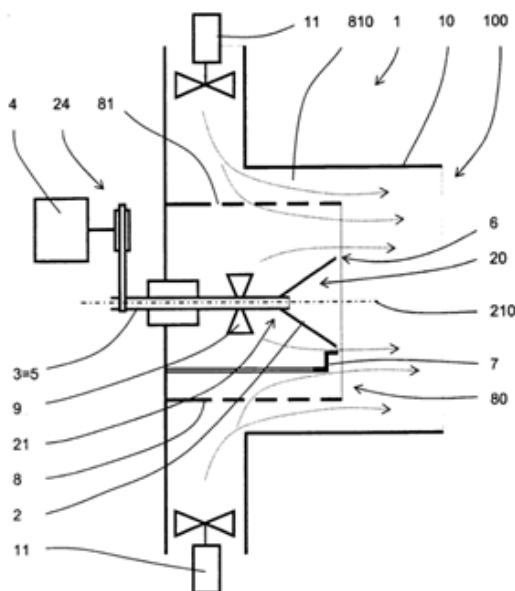
První komerčně dostupné zařízení využívající technologie odstředivého zvláknování umožňující výrobu v průmyslovém měřítku bylo zařízení Cyclone™ FE 1.1 (viz obrázek 20), které vyvinula již zaniklá společnost FibeRio. V roce 2010 si nechala společnost FibeRio zaregistrovat ochrannou známku pro technologii Forcespinning®. Zvláknovací hlavu, rotující až $n = 20000$ ot/min je možné zahřívat až do 450 °C, to umožňuje kromě polymerních roztoků zvláknovat také taveniny. Pro práci s taveninami výrobní proces nevyžaduje použití toxických rozpouštědel. Tato technologie umožnila rozšíření škály zvláknitelných materiálů za významného snížení nákladů. [19, 20]

Významnou výhodou odstředivého zvlákňování je vysoká produktivita. Pouze se dvěma tryskami v obvodové stěně zvlákňovací hlavy se průměrná produktivita jednoduchého laboratorního zařízení pohybuje okolo 50 g (vláken) za hodinu. To je alespoň o dva řády více, než produktivita průměrného laboratorního zařízení využívajícího ke zvlákňování technologii DC electrospinning. Další výhodou je absence zdroje vysokého napětí, to má příznivý vliv na energetickou náročnost zařízení a bezpečnost práce se zařízením. Technologie odstředivého zvlákňování na rozdíl od electrospinningu nevyžaduje elektricky vodivý roztok polymeru, což významně rozšiřuje škálu polymerů, které lze zpracovávat. [4]

1.7.2 Beztryskové odstředivé zvlákňování

Dalším druhem odstředivého zvlákňování je zvlákňování beztryskové. To spočívá ve vytváření vláken z roztoku nejčastěji na hraně plochého disku, nebo dutého kužele.

Obrázek 21 ukazuje schématický náčrt zařízení, jehož přestavbou se bude tato práce zabývat. Využívá metodu beztryskového odstředivého zvlákňování, na obrázku je znázorněno v řezu.



Obrázek 20 - Schématický náčrt bezjehlového odstředivého zařízení [21]

Zařízení je tvořeno rotující dutou hřídelí (2), spojenou s motorem (4) pomocí plochého řemene. Skrz dutou hřídel je trubičkou (3) dávkován roztok, nebo tavenina až na vnitřní plochu spinnerety (20), tvořené dutým kuželem. Roztok na této ploše vytváří tenký film, který je vlivem odstředivých sil unášen až na zvlákňovací hranu. Vlivem

povrchového napětí má film roztoku tendenci rozpadnout se do více radiálních proudů (viz obrázek 41). Na zvlákňovací ploše (6) dochází k odtrhávání proudů a jejich dloužení do podoby tenkých vláken. Tato vlákna se vlivem odstředivých sil pohybují v radiálním směru. V této fázi jsou vlákna ještě mokrá a lepkavá. Dva naproti sobě umístěné ventilátory (11) napomáhají odvádění vláken ze zařízení a brání jejich nalepení na vnitřní povrchy (proudění vzduchu je naznačeno šedými šipkami). Jejich úkolem je vytvoření vzduchové clony (rotujícího víru vzduchu) mezi pláští (10) a (8). Vlákna dopadající do tohoto prostoru jsou proudem vzduchu stržena a unášena ve směru osy rotace spinnerety (210). Sfoukávání a orientaci vláken by měl napomáhat i ventilátor (9) na hřídeli zvlákňovací hlavy. Vzduchová clona brání nalepení lehkých vláken, avšak umožňuje prostup kapkám, které jsou na výsledné plošné textilii nežádoucí. Tento efekt pomáhá snižovat počet nežádoucích defektů. Stírací prostředek (7) zajišťuje seškrabávání nezvlákněných nánosů polymeru na ploše (6). [21]

Nevýhodou této metody je zasychání roztoku na povrchu spinnerety v průběhu procesu. To má za následek častější výskyt kapkovitých defektů, a tím i snížení kvality vyrobených nanovláken. [21]



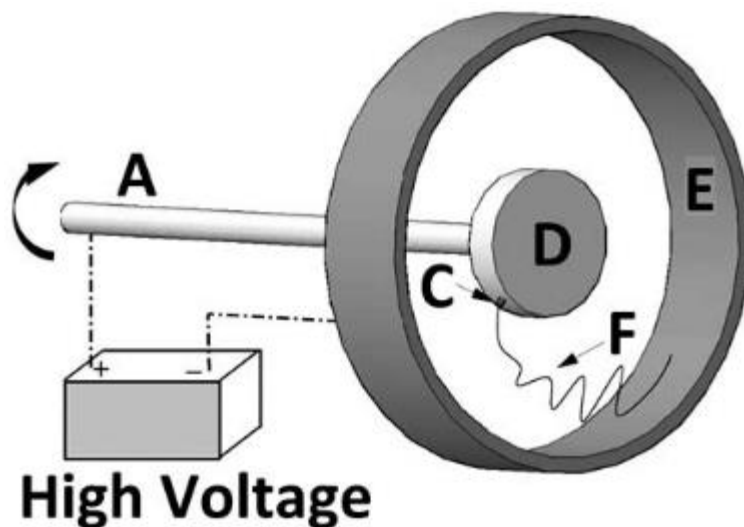
Obrázek 21 - Výchozí odstředivé zařízení s axiálním výstupem

Cílem této práce je modifikovat stávající zařízení pro odstředivé zvlákňování s axiálním výstupem (viz obrázek 21) na zařízení kombinující forcespinning a electrospinning. Bude využito střídavé vysoké napětí, protože při jeho aplikaci nejsou nutné elektricky aktivní kolektory. V rámci práce budou provedeny základní produkční testy upraveného stroje.

1.8 Elektroodstředivé zvlákňování

Jak již název napovídá, elektroodstředivé zvlákňování spočívá v kombinaci výše popsaných metod electrospinningu a odstředivého zvlákňování.

Na obrázku 22 je schematicky znázorněn elektroodstředivý systém. Podobně jako zařízení pro odstředivé zvlákňování se sestává z rotující hlavy (elektrody) (D) obsahující roztok polymeru. Kolektor je tvořen kovovým válcem (E). Na rozdíl od odstředivého zvlákňování jsou však obě elektrody připojeny ke zdroji stejnosměrného vysokého napětí. Během zvlákňování jsou z trysek po obvodu zvlákňovací hlavy (C) dlužena nanovláknna (F) jak za účinků elektrostatických, tak i odstředivých sil.



Obrázek 22 – Schématické znázornění DC elektroodstředivého systému, (A) osa rotace, (C) hrot trysky, (D) zvlákňovací hlava, (E) kolektor, (F) nanovláknenné tryska [22]

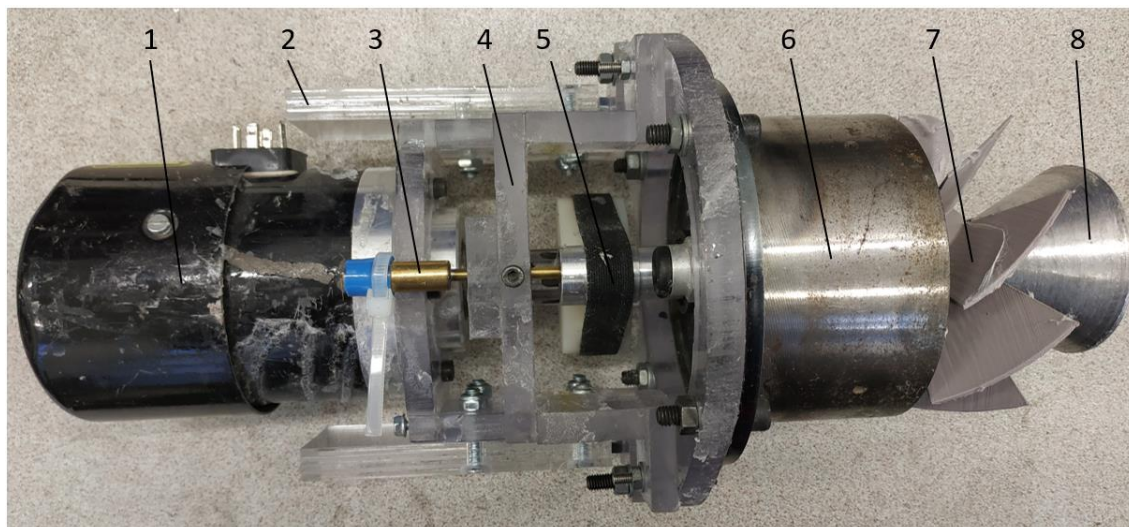
Vláknna vyrobená touto metodou zpravidla obsahují méně kapkovitých defektů, a dosahují pravidelnější orientace vláken v porovnání s metodou odstředivého zvlákňování. [21, 22]

Tato práce se věnuje návrhu nového zařízení kombinující AC electrospinning a odstředivé beztryskové zvlákňování.

2 PŮVODNÍ ZAŘÍZENÍ A JEHO PŘESTAVBA

Princip funkce používaného zařízení byl popsán v kapitole 1.7.2 výše. V této kapitole je popsáno, z jakých komponent se skládá zvlákňovací zařízení. V další části je popsáno, jaké úpravy byly na zařízení provedeny při přestavbě z odstředivého na elektroodstředivé zařízení.

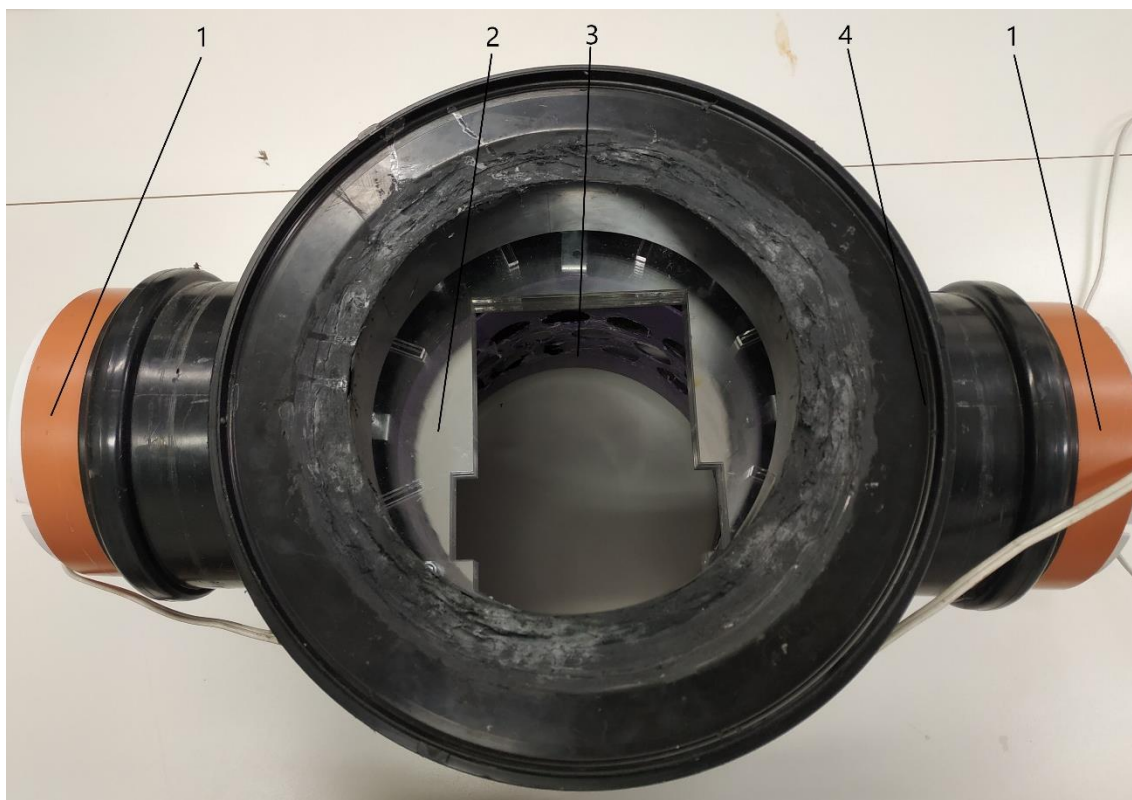
Na obrázku 23 níže je zobrazena odstředivá zvlákňovací jednotka. Pohon zajišťuje asynchronní motor ATAS FT4C52R (1). Pomocí řemene (5) je krouticí moment přenášén na dutou hřídel spinnerety uloženou v ložiskovém domku (6). Dutou hřídelí prochází dávkovací trubička (3), přes kterou je na vnitřní povrch kuželové hlavy (8) dopravován roztok. Ventilátor (7) umístěný za spinneretou má za úkol odvod vláken ze zařízení. Skelet jednotky (4) je slepen z polykarbonátu. Boky skeletu – vedení je tvořeno plochými tyčemi (2), po kterých je možné jednotku posouvat v axiálním směru, a nastavovat tím polohu relativně vůči vnějšímu plášti. Nastavení správné axiální polohy má podstatný vliv na správný odvod vláken.



Obrázek 23 - Původní zvlákňovací jednotka pro odstředivé zvlákňování, (1) motor, (2) vedení umožňující axiální posun, (3) dávkovací trubička, (4) skelet jednotky, (5) řemen, (6) vodivý ložiskový domek, (7) ventilátor, (8) kuželová hlava (spinnereta)

Na obrázku 24 je ukázán vnější plášť vyrobený z instalatérské tvarovky. Uvnitř pláště se nachází polykarbonátová přepážka s vodicími drážkami (2). V těchto drážkách lze jednotku axiálně posouvat. Jak již bylo popsáno v kapitole 1.7.2, součástí vnějšího pláště (4) jsou dva axiální ventilátory (1). Jejich úkolem je vytvoření vzduchové clony mezi vnějším pláštěm (4) a vnitřním pláštěm (fialová nádoba s otvory, pozice 3). Tím

vznikne takzvaná vzduchová clona, která brání nalepení vláken na povrchy uvnitř zařízení.



Obrázek 24 - Vnější plášť zařízení s příslušenstvím, (1) potrubní ventilátory, (2) přepážka s vodicími drážkami, (3) vnitřní plášť, (4) vnější plášť

2.1 Izolace mezi spinneretou a motorem

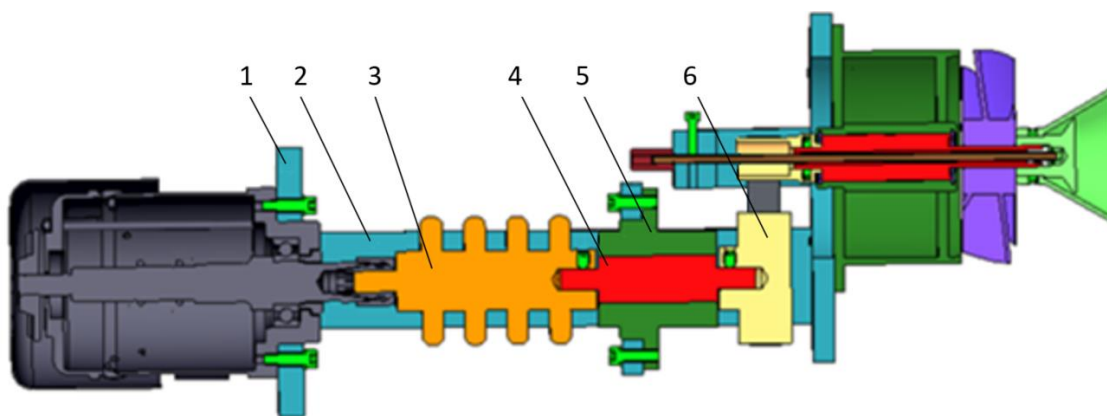
Před připojením vysokého střídavého napětí na spinneretu bylo třeba zajistit dostatečnou izolaci mezi motorem a spinneretou. Dle normy ČSN EN 60060-1 je třeba při rozdílu potenciálů $U_{ef} = 35$ kV efektivní hodnoty napětí dodržet minimální povrchovou vzdálenost mezi dvěma součástmi $v = 160$ mm. [5]

Z fyziky je známo použití Van de Graaffova generátoru, který pracuje na principu přenosu elektrického náboje pomocí pásu izolantu. Pokud má upravovaný stroj pracovat se stejnosměrným, nebo střídavým vysokým napětím, je nutné se vyvarovat jakémukoliv řešení pohonu, který by připomínal konstrukci Van de Graaffova generátoru. Kvůli nutnosti dávkování polymeru osou spinnerety, musí být náhon spinnerety řešen pomocí vhodného izolátoru, který na svém povrchu nepřenáší náboj – řemenový nebo pásový převod náboj přenáší, viz konstrukce Van de Graaffova generátoru. Řemenový převod

může být ponechán za podmínky, že bude primární řemenice důkladně izolována od motoru.

Při návrhu izolačního nástavce pro elektroodstředivou jednotku bylo postupováno podobným způsobem, jako při návrhu izolačního hřídele pohonné jednotky (viz obrázek 29) v bakalářské práci [5].

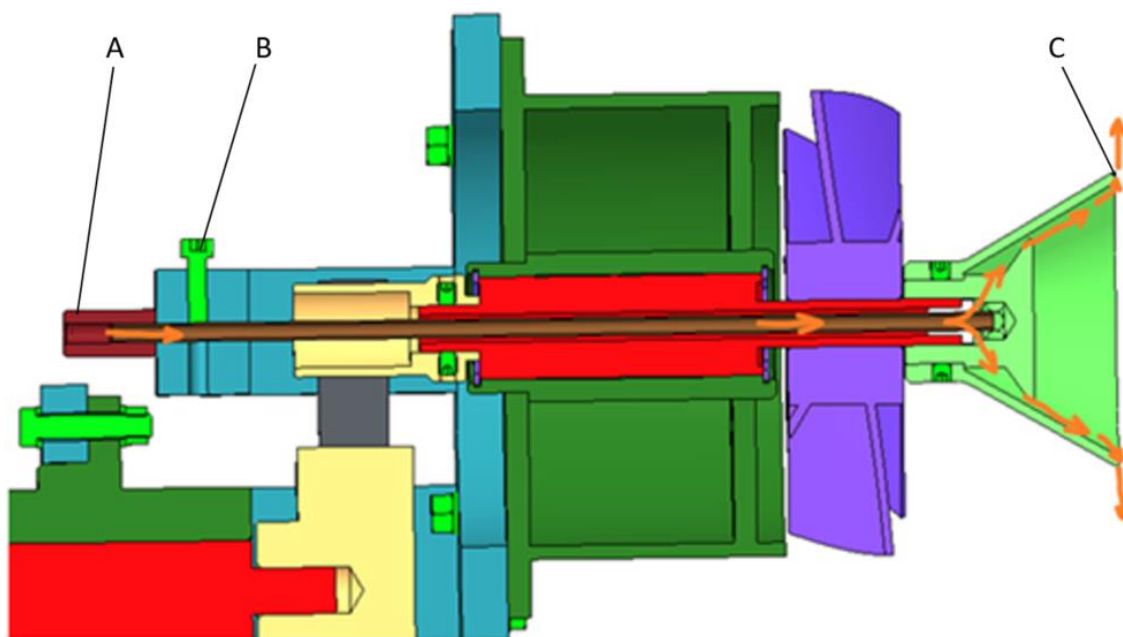
Pro zajištění dostatečné izolace byl navržen izolační nástavec vyrobený z materiálu polyamid 6 (viz obrázek 25, pozice 3). Tento materiál byl vybrán zejména kvůli dobrým mechanickým parametrům, dobrým elektroizolačním vlastnostem, dobré obrobitelnosti a chemické stálosti. Povrchová vzdálenost mezi oběma konci nástavce je 200 mm, což dostatečně splňuje výše zmíněnou normu. Čep izolačního nástavce (3) o průměru 10 mm byl uchycen přímo do kleštin motoru. Z důvodu kompenzování nesouosostí bude při návrhu zařízení nového zařízení mezi motor a izolační nástavec umístěna flexibilní spirálová spojka WKAK3038. Z druhé strany nástavce (3) je do otvoru o průměru 10 mm zasunuta hřídelka ložiskového pouzdra (4) a zajištěna stavěcím šroubem M6. Podobným způsobem byla z druhé strany ložiskového pouzdra připevněna řemenice (6), vyrobená opět z materiálu polyamid 6. Na místo motoru byl na stávající přírubu uchycen domek (5) vyrobený z materiálu polyamid, do kterého bylo vloženo ložiskové pouzdro (4). Pro uložení motoru byla vyrobena nová příruba (1), která byla uchycena na prodloužené, polykarbonátové vedení (2).



Obrázek 25 – Model elektroodstředivého zařízení, provedené úpravy na funkčním vzorku jsou označeny pozicemi, (1) příruba motoru, (2) prodloužené vedení, (3) izolační představec, (4) ložiskové pouzdro, (5) ložiskový domek, (6) řemenice

Obrázek 26 zachycuje detailní řez části pohonu spinnerety. Oranžové šipky v obrázku naznačují dráhu roztoku. Výtlačná hadička čerpadla je připojena hadicovou sponou na dávkovací trubičku (A). Dále je roztok tlačěn uvnitř duté hřídele spinnerety.

Na jejím konci vytéká kanály do vnitřní kuželové plochy spinnerety. Odstředivou silou je roztok unášen přes čelo nádoby až na její hranu (C). Tato hrana tvoří zvlákňovací oblast, ve které dochází vlivem odstředivé síly k tvorbě Taylorových kuželů a následné tvorbě vláken. V průběhu elektroodstředivého zvlákňování je rotující spinnereta připojena ke zdroji vysokého střídavého napětí. Připojení je uskutečněno v bodě (B) prostřednictvím šroubu M4, který zajišťuje polohu dávkovací trubičky přes kterou je dávkován roztok.



Obrázek 26 - Detailní řez spinneretou, (A) přípojný bod pro dopravu roztoku, (B) přípojný bod ke zdroji vysokého napětí, (C) zvlákňovací oblast, oranžové šipky znázorňují trasu roztoku

Díly potřebné pro modifikaci byly vyrobeny dle výkresové dokumentace v příloze. Na obrázku 27 je ukázána zvlákňovací jednotka po přestavbě. Experimentálnímu ověření tohoto zařízení se věnuje kapitola 4.



Obrázek 27 - Jednotka upravená pro elektroodstředivé zvlákňování

2.2 Izolace mezi roztokem a pohonem pumpy (obsluhou)

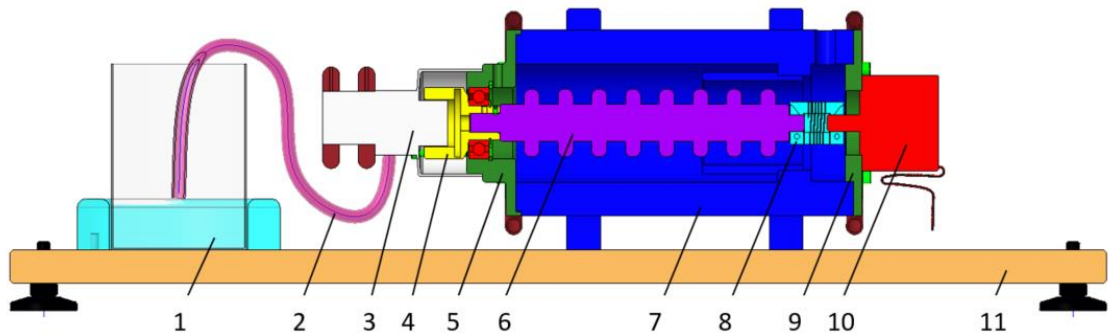
V průběhu elektroodstředivého zvlákňování je vysokým střídavým napětím nabíjen přes dávkovací trubičku i roztok vodivého polymeru. Z hlediska bezpečnosti je proto nutné zajištění bezpečné izolace mezi nabitým roztokem a pohonem pumpy, popřípadě mezi nabitým roztokem a obsluhou.

Z počátku byla pro pohon roztoku používána lineární pumpa (5), viditelná na obrázku 28. Posuvný tlačný blok (4) stlačuje přes izolační představec (3) píst injekční stříkačky (2), ze které je výtlačnou hadičkou (1) vytlačován polymerní roztok. Tato jednotka se však pro dávkování roztoku ukázala jako nedostatečná, neboť nedosahovala potřebného průtoku. Rozpouštědlo se tak odpařilo dříve, než roztok PVB dosáhl zvlákňovací oblasti na hraně spinnerety. Bylo tedy třeba zvolit jiný typ čerpacího systému, který poskytuje dostatečný průtok.



Obrázek 28 - Lineární pumpa s izolačním představcem, (1) výtlačná hadička, (2) injekční stříkačka, (3) izolační představec, (4) tlačný blok, (5) lineární pumpa

Pro dopravu roztoku byla z výše uvedených důvodů využita pohonná jednotka zobrazena na obrázku 29, která byla zkonstruována v rámci bakalářské práce [5]. Poskytuje dostatečný průtok a plynulé dávkování bez pulzů. Dále je z hlediska bezpečnosti zajištěna dostatečná vzdálenost mezi nabitým roztokem a pohonem čerpadla.



Obrázek 29 - Čerpací jednotka v řezu, (1) kádinka s polymerem, (2) sací hadička čerpadla, (3) zubové čerpadlo, (4) magnetická spojka, (5) ložiskový domek s ložiskem, (6) izolační hřídel, (7) svařenec, (8) flexibilní hřídelová spojka, (9) příruba motoru, (10) krokový motor, (11) základní deska

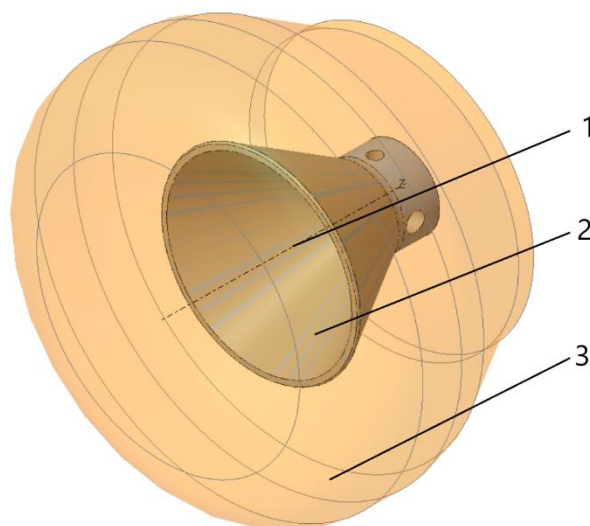
Na obrázku 29 je patrná čerpací jednotka znázorněna v řezu. Celá jednotka je pro usnadnění manipulace připevněna k základní desce z materiálu polypropylen (11). Zásobník s roztokem polymeru (1) je umístěna v prstenci, který zamezuje jejímu převrhnutí. Jednotka je uložena ve svařenci z materiálu polypropylen (7). Pohon jednotky zajišťuje krokový motor (10). Krouťící moment je přenášen přes pružnou hřídelovou spojku (8), izolační nástavec (6) a magnetickou spojku (4) uloženou v ložiskovém domku (5) až na zubové čerpadlo Micropump GJ – N25 (3). Roztok je nasáván hadičkou (2) z kádinky. Výstupní hadička z čerpadla je připojena na dávkovací hadičku zvláknovacího zařízení (viz obrázek 23, pozice 3).

3 ANALÝZY ELEKTRICKÉHO POLE

3.1 Analýza elektrického pole v okolí spinnerety

Pro tvorbu nanovláken pomocí metody AC electrospinning je nutné překročit kritickou hodnotu elektrické intenzity E . Tvar zvlákňovací elektrody byl navržen pro potřeby odstředivého zvlákňování, a nebylo proto jisté, zda je tvar vhodný i pro elektrické zvlákňování. Pro zjištění rozložení elektrické intenzity v okolí elektrody byla v softwaru Ansys Electronics Desktop provedena analýza intenzity elektrického pole.

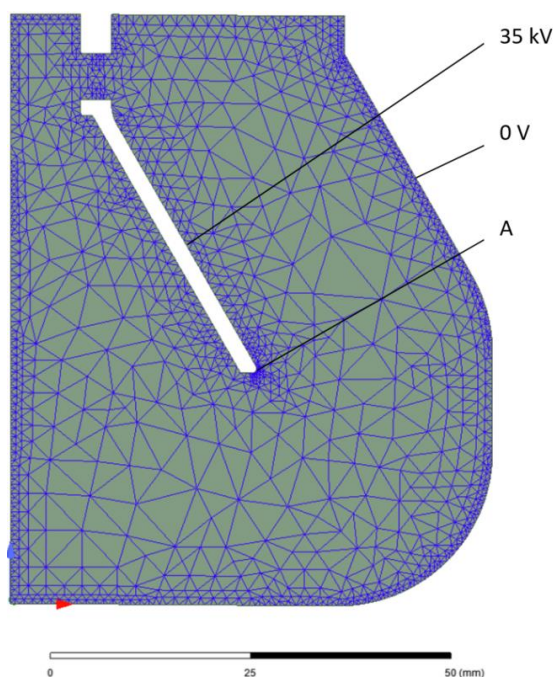
V rámci preprocessingu byl vytvořen model vzduchového okolí zvlákňovací elektrody znázorněn na obrázku 30. Vnější okraj vzduchového okolí je tvořen virtuálním kolektorem (3), ekvidistantně vzdáleným $x = 30$ mm od povrchu elektrody (2). Jedná se o přibližnou vzdálenost stanovenou při použití obvyklých roztoků (PVB, PVA) a běžných parametrů elektrického signálu (frekvence $f = 50$ Hz, sinový průběh a napětí o amplitudě $U_a = 35 - 50$ kV). Vnitřek je tvořen negativem elektrody. Pro zjednodušení modelu je při samotné analýze objem elektrody zanedbán. Úloha byla řešena ve 2D, symetrická kolem osy Z (1). [8]



Obrázek 30 – Osově symetrický model vzduchového okolí elektrody, (1) osa symetrie, (2) zvlákňovací elektroda, (3) virtuální kolektor

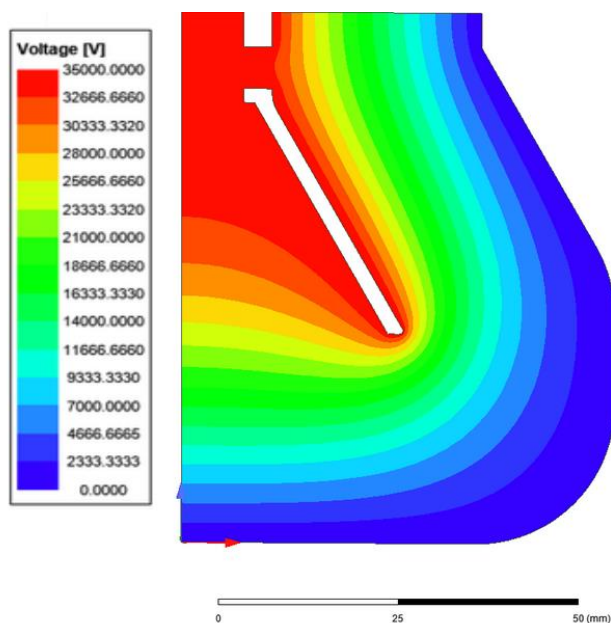
Dalším nezbytným krokem bylo definovat okrajové podmínky (obrázek 31). Geometrii elektrody bylo přiřazeno napětí $U = 35$ kV. Vnější hranici okolí (virtuálnímu kolektoru) bylo přiřazeno napětí $U = 0$ V. Z knihovny materiálů bylo pro analyzovanou

oblast vybráno vakuum. Následně byla vytvořena síť metodou *classic*. Poté byl spuštěn výpočet.



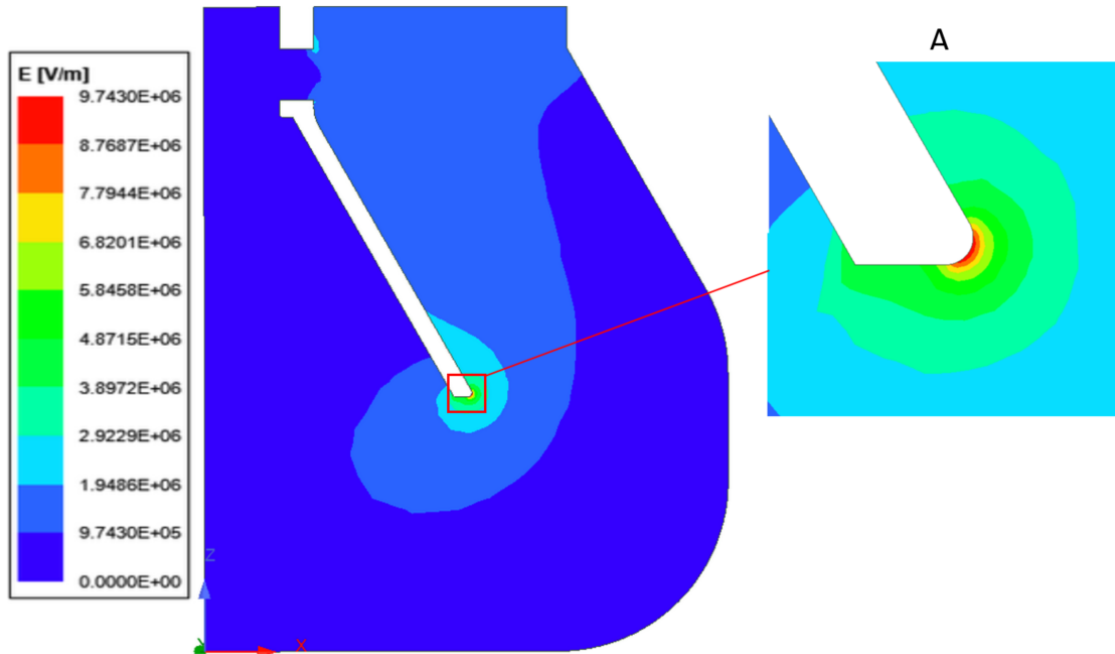
Obrázek 31 - Výpočetní model včetně sítě a okrajových podmínek, (A) oblast zájmu, ve které je síť zjemněna

V rámci postprocessingu byly vyhodnoceny a interpretovány výsledky analýzy. Obrázek 32 znázorňuje rozložení napětí v okolí elektrody, sloužící zejména pro verifikaci modelu. Z obrázku je patrné, že rozložení napětí je ekvidistantní a odpovídá zadaným okrajovým podmínkám.



Obrázek 32 - Rozložení napětí v okolí spinnerety

Obrázek 33 znázorňuje rozložení elektrické intenzity v okolí elektrody. Analýza odhalila, že nejvyšší hodnota elektrické intenzity se nachází na ploše o největším průměru zvlákňovací hlavy (detail A). Je tomu tak z důvodu vysoké křivosti plochy a expozice v prostoru.



Obrázek 33 - Rozložení elektrické intenzity v okolí spinnerety, (A) detail zvlákňovací oblasti - rozložení elektrické intenzity v okolí hrany spinnerety, kumulace intenzity ve zvlákňovací oblasti

Detail (A) na obrázku 33 ukazuje rozložení elektrické intenzity na hraně spinnerety. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.1, při odstředivém zvlákňování je roztok unášen z vnitřku spinnerety, přes čelo, a na hraně dochází k tvorbě vláken. Z obrázku je patrné, že se daří mít vysokou elektrickou intenzitu tam, kde se vlákna vlivem odstředivých sil tvoří. Lze předpokládat, že v oblasti s maximální elektrickou intenzitou jsou účinky elektrických sil nejvýznamnější. Dochází tak k žádoucímu synergickému efektu odstředivých sil a sil elektrických.

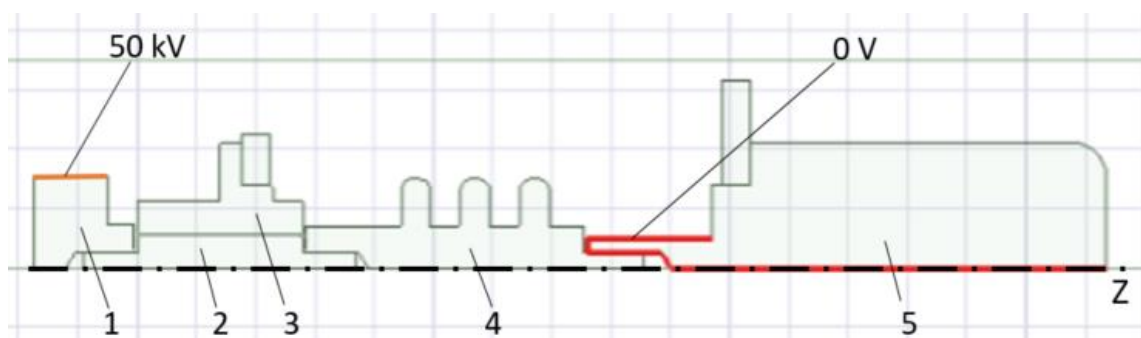
Při realizaci popsané analýzy elektrického pole došlo k řadě zjednodušení. Při tvorbě modelu byla zanedbána vrstva nabitého polymerního roztoku rozptýleného po povrchu elektrody. Tloušťka vrstvy se bude lišit v závislosti na viskozitě roztoku, otáčkách spinnerety, průtoku roztoku atd. Dále byl při analýze zanedbán vodivý domek, ve kterém je hřídel spinnerety uložena. Lze předpokládat, že nabitý ocelový domek bude tvořit elektrický stín, a z toho důvodu bude hodnota výsledné elektrické intenzity na spinneretě nižší. Cílem analýzy nebylo určení konkrétních hodnot elektrické intenzity, ale

posouzení vhodnosti tvaru zvlákňovací hlavy pro metodu electrospinning. Na základě této analýzy byla vhodnost potvrzena.

3.2 Analýza elektrického pole v okolí zvlákňovací jednotky

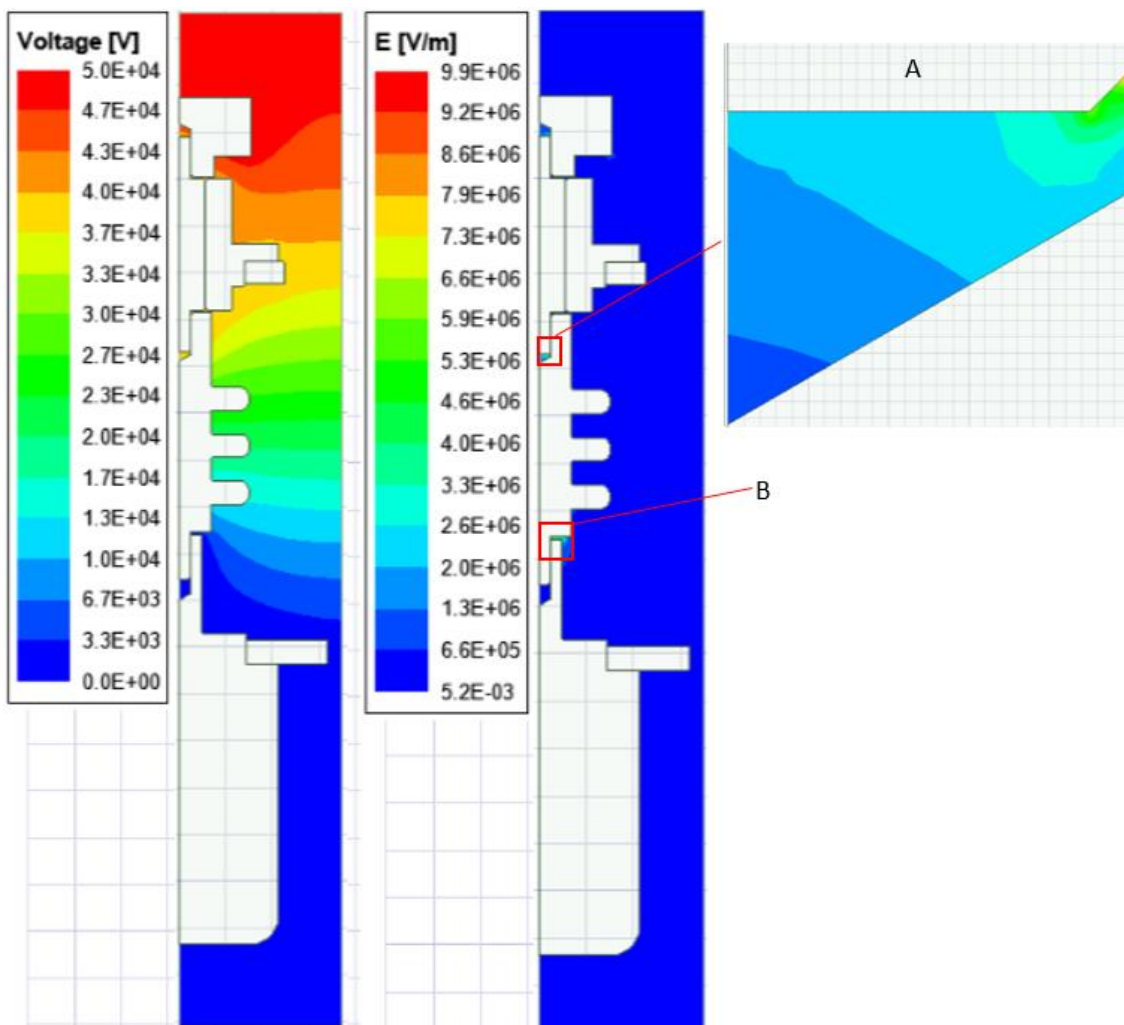
V rámci bezpečnosti provozu a obsluhy zařízení byla provedena analýza elektrického pole v okolí komponent zařízení s vysokým rozdílem potenciálů. Cílem analýzy bylo zabránit elektrickým výbojům, které představují nebezpečí požáru a odebírají zbytečně zařízení energii. [5]

Byl vytvořen zjednodušený 2D model hnací jednotky osově symetrický kolem osy Z (viz obrázek 34). Jednotlivým tělesům byly přiřazeny materiály. Řemenici (1), ložiskovému domku (3) a izolačnímu nástavci (4) byl přiřazen materiál PA. Ložiskovému pouzdru (2) a motoru (5) byla přiřazena ocel. Následně byly zadány okrajové podmínky. Na obvod řemenice bylo přidáno maximální provozní napětí $U = 50 \text{ kV}$. Lze předpokládat, že napětí na obvodu primární řemenice bude ve skutečnosti nižší, kvůli částečné izolaci řemene a sekundární řemenice. Na hřídel motoru bylo přiřazeno napětí 0 V. Následně byla spuštěna statická analýza.



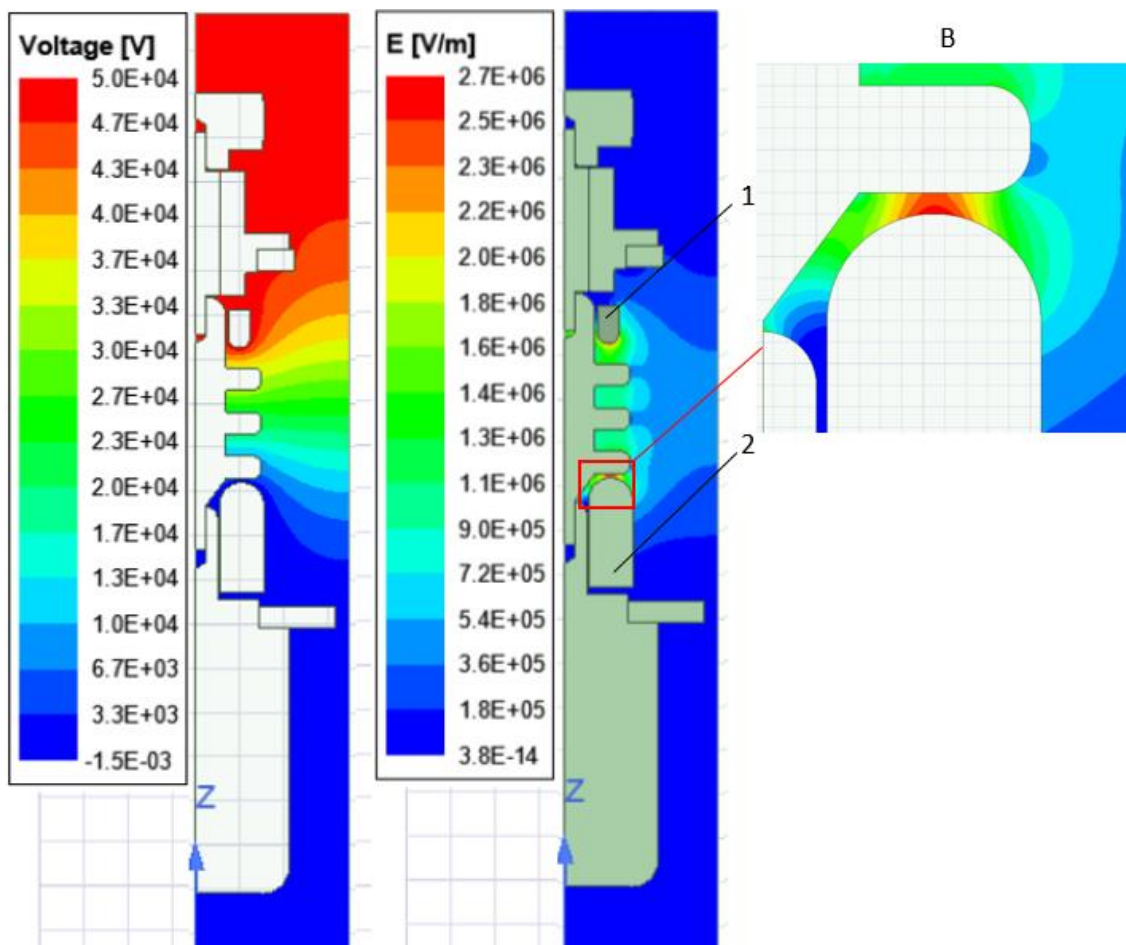
Obrázek 34 - Zjednodušený model hnací jednotky modifikovaného zařízení, (1) řemenice, (2) ložiskové pouzdro, (3) ložiskový domek, (4) izolační nástavec, (5) motor, (Z) osa symetrie Z

V rámci postprocessingu byly zjištěny vysoké hodnoty elektrické intenzity E na hranách hřídele ložiskového domku (A) a hřídele motoru (B) (viz obrázek 35). Maximální hodnota elektrické intenzity by neměla překročit průraznou hodnotu vzduchu $E_p = 3000 \text{ V/mm}$. Na modifikovaném zařízení byla vypočtena maximální hodnota elektrické intenzity $E = 9900 \text{ V/mm}$. Tato hodnota je pro dlouhodobý provoz stroje příliš vysoká. Je tedy třeba kritické oblasti (A) a (B) zastínit koronovými prstenci tak, aby došlo ke snížení maximální hodnoty elektrické intenzity pod hodnotu $E_p = 3000 \text{ V/mm}$.



Obrázek 35 – Výsledky analýz elektrického pole, vlevo - rozložení napětí v okolí hnací jednotky, vprostřed - rozložení elektrické intenzity v okolí hnací jednotky, (A) a (B) kritické oblasti s vysokou elektrickou intenzitou, vpravo – detail kritické oblasti (A)

Obrázek 36 zobrazuje výsledky analýzy po implementaci koronových prstenců (1) a (2). Je patrné, že přidáním koronových prstenců došlo k významnému snížení maximální hodnoty elektrické intenzity v kritické oblasti (B) pod průraznou hodnotu vzduchu. Maximální vypočtená hodnota elektrické intenzity po přidání koronových prstenců je $E = 2700 \text{ V/mm}$. Tato hodnota je již vyhovující.



Obrázek 36 – Výsledky analýzy po vytvoření koronových prstenců, vlevo – rozložení napětí, vprostřed – rozložení elektrické intenzity, (1) a (2) přidané koronové prstence, vpravo – detail kritické oblasti B

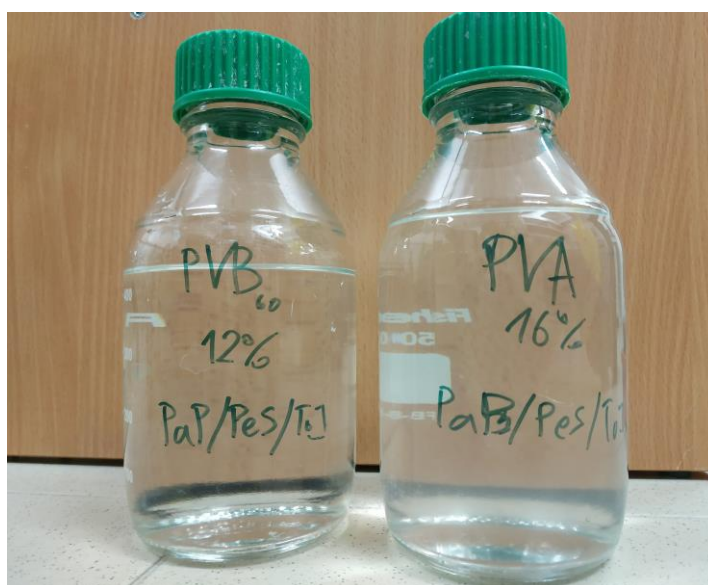
Na základě této analýzy byly do návrhu nového elektroodstředivého zařízení implementovány koronové prstence. Tyto prstence budou sloužit ke stínění ostrých hran hřídelky ložiskového pouzdra a hřídeli motoru, na kterých by mohlo docházet k nežádoucím výbojům.

V následující kapitole bude provedena řada testů na modifikovaném zařízení. Jedná se o funkční model zařízení, který není určený pro dlouhodobé použití. Proto budou následující krátkodobé testy provedeny bez koronových prstenců.

4 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ

V této kapitole jsou popsány zkoušky, které byly provedeny na funkčním modelu elektroodstředivého zařízení.

Všechny provedené zkoušky zařízení byly provedeny se dvěma různými roztoky (viz obrázek 37) – 12% roztok PVB v ethanolu a 16% roztok PVA ve vodě. Tyto roztoky byly vybrány na základě poznatků práce [23], která zkoumala chování roztoků při DC elektroodstředivém zvláknování. Výše zmíněné polymerní roztoky byly dobře zvláknitné, proto byly použity i pro zkoušky v dále popsaných kapitolách.



Obrázek 37 – Použité polymerní roztoky, 12% roztok PVB a 16% roztok PVA

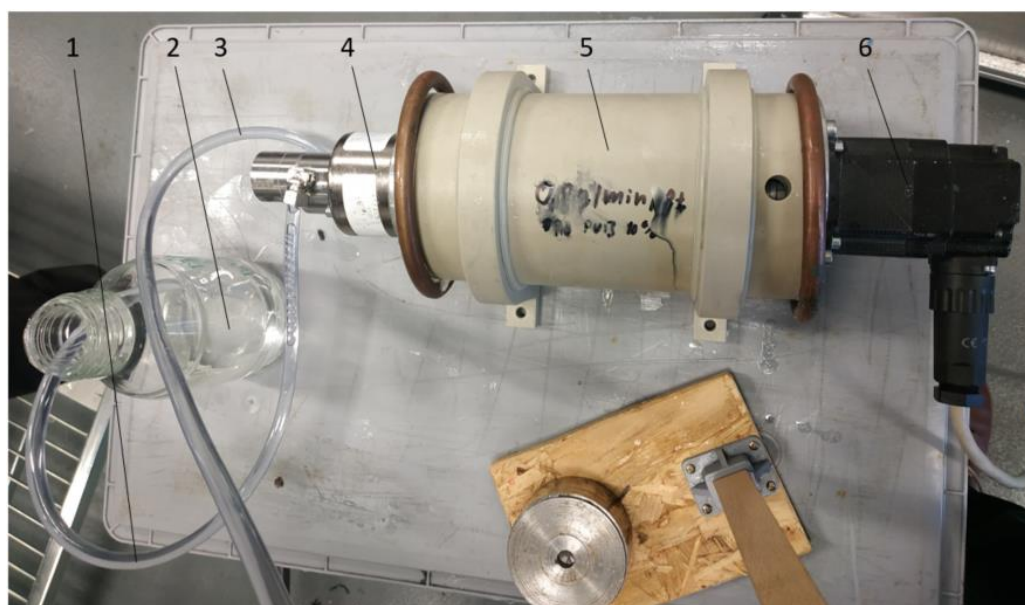
Zkoušky byly prováděny při teplotě 22°C a relativní vlhkosti 33%. Jako zdroj elektrického napětí byl použit vysokonapěťový zesilovač Trek 50/12. Všechny níže popsané zkoušky byly provedeny s elektrickým signálem o frekvenci 50 Hz a sinovém průběhu signálu.

Zvláknovací zařízení s připojenou čerpací jednotkou bylo umístěno před zvláknovací box (viz obrázek 38), ve kterém byla vlákna zachycována na perlinku. Pro lepší viditelnost vznikajících vláken bylo použito přisvícení (viz obrázek 42, kapitola 4.1).



Obrázek 38 - Testovací aparatura. Zleva - zvláknovací box, upravené elektroodstředivé zařízení, čerpací jednotka

Obrázek 39 ukazuje čerpací jednotku (5), včetně zubového čerpadla (4), jehož pohon zajišťuje krokový motor (6). Čerpadlo nasává roztok sací hadičkou (1) z lahvičky s rozpuštěným polymerem (2) a výtlačnou hadičkou (3) dávkuje roztok do zařízení.



Obrázek 39 - Čerpací jednotka včetně příslušenství, (1) sací hadička, (2) zásoba polymerního roztoku, (3) výtlačná hadička, (4) zubové čerpadlo, (5) čerpací jednotka, (6) krokový motor

4.1 Ověření funkčnosti upraveného zařízení

V rámci funkčních testů bylo cílem optimalizovat parametry procesu tak, aby vlákna vystupovala ve formě kompaktní vlečky s minimem kapkových defektů. Hlavními upravovanými parametry byly způsob odvádění vlečky z prostoru zařízení, otáčky spinnerety n a průtok polymerního roztoku Q .

Obrázek 40 zobrazuje elektrodu v průběhu funkčních testů. Z obrázku je patrné nerovnoměrné rozptýlení roztoku po celé vnitřní ploše elektrody. Vlivem povrchového napětí se roztok soustřeďuje v radiálních drahách. Na konci těchto drah dochází k tvorbě nánosů polymeru, omezujících kontinuální proces. Vytváření nežádoucích polymerních nánosů by se dalo předejít návrhem vhodného stíracího elementu.

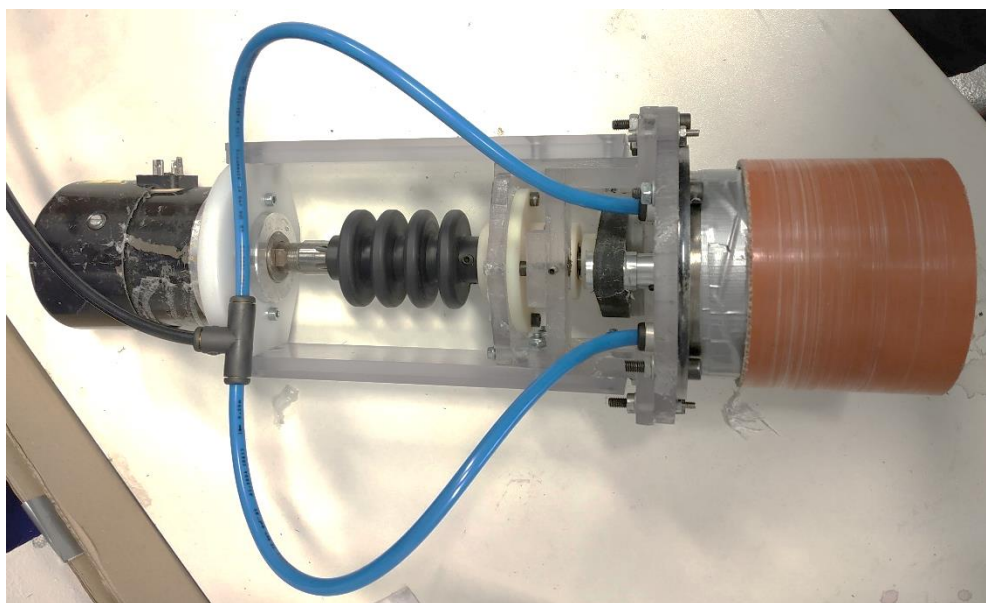


Obrázek 40 – Radiální cesty polymerního roztoku a nánosy na zvláknovací hlavě

Vlákna odletující od spinnerety jsou lepkavá a vlivem turbulencí v těle zařízení mají tendenci se vracet zpět dovnitř zařízení a ulpívat na površích uvnitř zařízení. Jak již bylo popsáno výše, část vláken se vrací i proto, že jsou přitahována zpět nabitou elektrodou. Problém vracejících se vláken zpět na elektrodu řeší takzvaný přeplavovací efekt. V případě rotující elektrody je přeplav celého povrchu značně komplikovaný. V průběhu testování zařízení byly nežádoucí nánosy polymeru z elektrody manuálně odstraňovány.

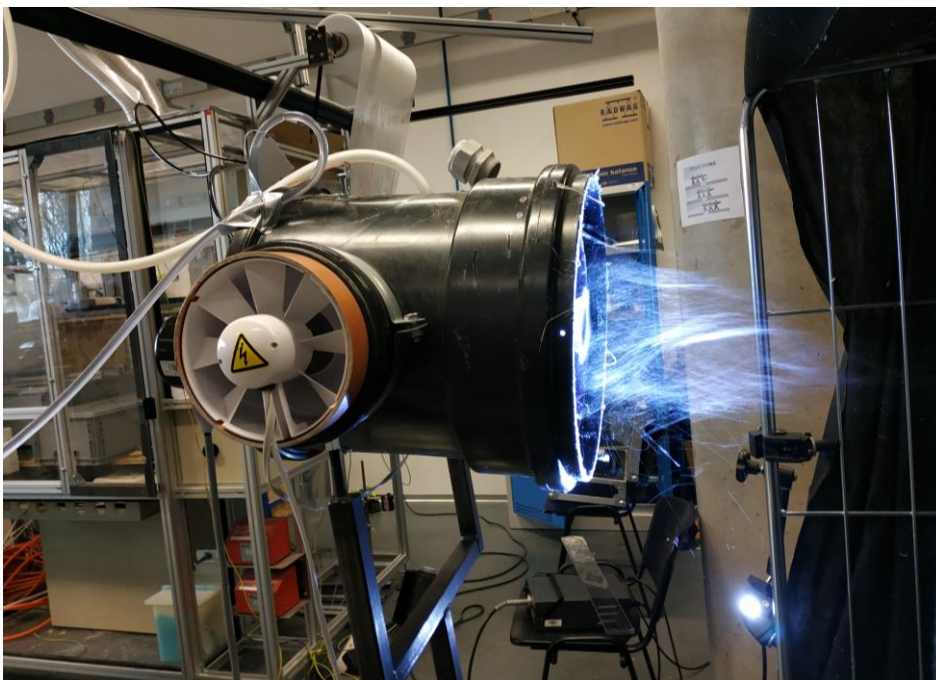
Na hřídeli spinnerety byl z počátku nainstalován ventilátor (viz obrázek 23, pozice 7). Při testech bylo zjištěno, že je nevyhovující, protože urychluje vlákna zejména v radiálním směru. Vznikající vlečku tím spíše rozmítal. Na tvorbě vlečky se pozitivně projevilo odstranění ventilátoru. Jeho nízká efektivita je zřejmě způsobena nulovou relativní rychlostí mezi ventilátorem a spinneretou. Další nevýhodou takto umístěného ventilátoru je absence samostatné regulace dodávaného vzduchu, nezávisle na otáčkách spinnerety.

Část vláken však měla stále tendenci vracet se zpět a lepit se na povrchy uvnitř zařízení. Do ložiskového domku byl proto přiveden stlačený vzduch (viz obrázek 41). Tubus domku byl pro zvýšení homogenity vzduchového proudu prodloužen trubkou z materiálu PVC. Vzduch vystupuje ze dvou šroubení v domku. Redukční ventil na přívodní hadičce vzduchu navíc umožňuje regulaci dodávaného vzduchu nezávislou na otáčkách spinnerety.



Obrázek 41 - Přivedení stlačeného vzduchu otvory v ložiskovém domku pro lepší odvod vlečky

Přivedení stlačeného vzduchu výrazně pomohlo odvádění vznikajících vláken vracejících se zpět na elektrodu. Kompaktní vlečka vláken zachycená po výše provedených úpravách je ukázána na obrázku 42.



Obrázek 42 - Kompaktní nanovláknenná vlečka po odladění systému

Základní parametry zařízení - průtok pumpy a otáčky spinnerety pro roztok PVB i PVA naladěny tak, aby byla vznikající vlákna co možná nejsušší s minimem kapkových defektů. Pro roztok PVB byl nastaven průtok roztoku na $Q = 5 \text{ ml/min}$ a otáčky spinnerety na $n = 9000 \text{ ot/min}$. Při práci s PVA byl průtok nastaven na hodnotu $Q = 2 \text{ ml/min}$ a otáčky na $n = 12000 \text{ ot/min}$. Každý zpracovávaný materiál potřebuje odladit recepturu a procesní parametry pro optimální produkci vláken. To však není předmětem této práce. Pro získání ideálních parametrů by byl třeba rozsáhlý technologický výzkum.

4.2 Vyhodnocení vzorků

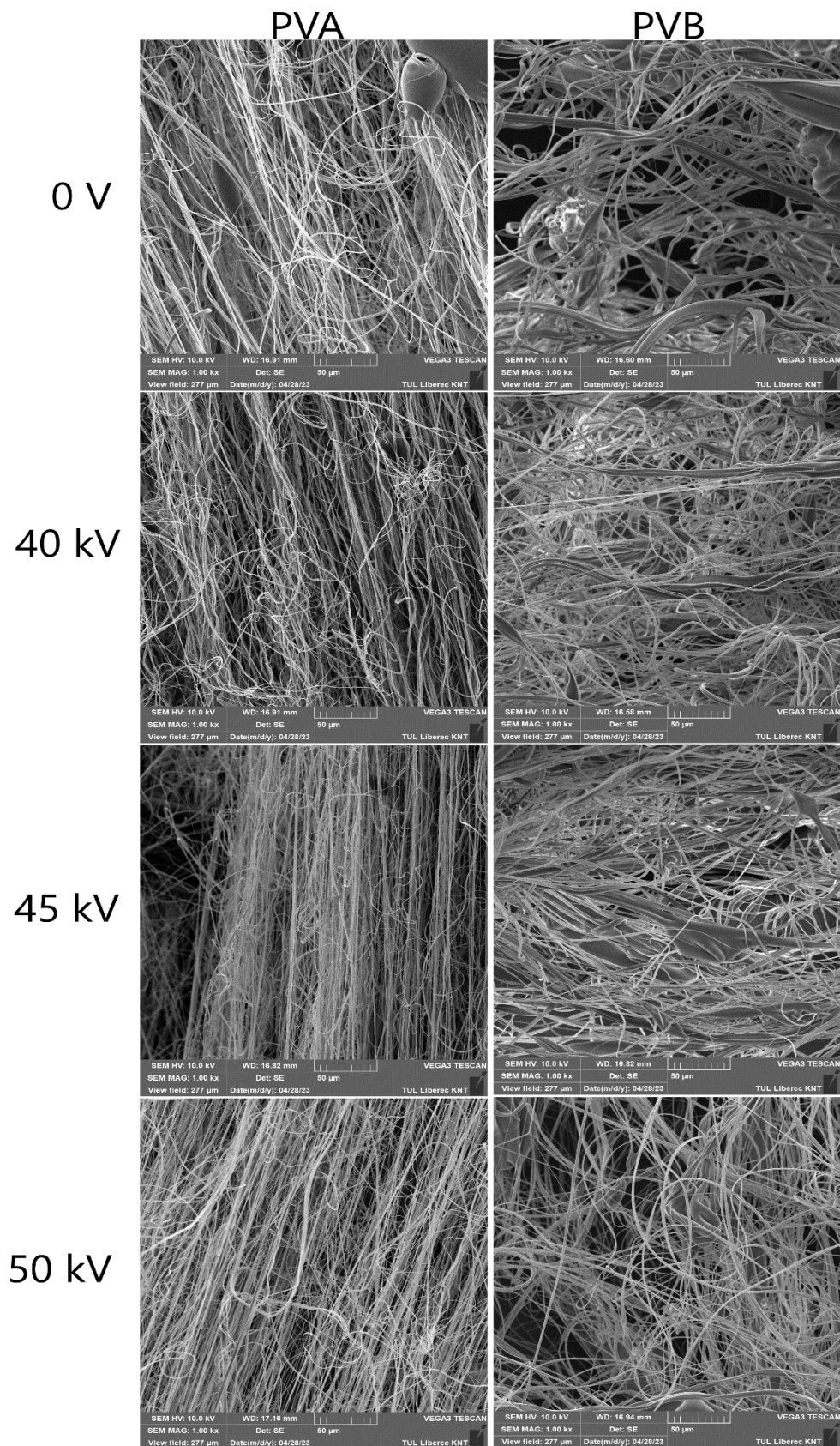
V průběhu modifikace zařízení byla získána řada vzorků. Sběr vzorků je zaznamenán na obrázku 43. Byl získán vzorek vláken, vyrobený pouze odstředivým způsobem. Následně byl připojen zdroj vysokého napětí, a byla odebrána vlákna při amplitudě napětí 40 kV, 45 kV a 50 kV. Totéž bylo realizováno pro 12% roztok polyvinylbutyralu (PVB) v ethanolu a 16% roztok polyvinylalkoholu (PVA) ve vodě. Vzorky byly následně podrobeny elektronovému mikroskopu (SEM).



Obrázek 43 – Sběr vzorků pro rastrovací elektronový mikroskop

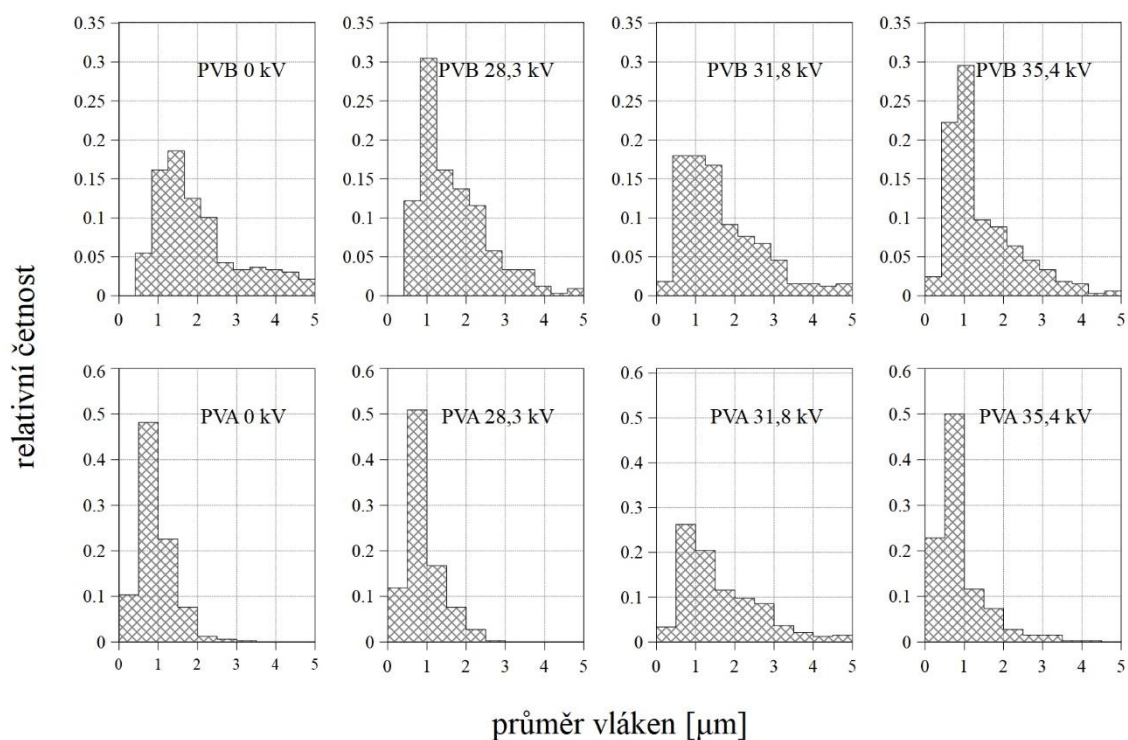
Na obrázku 44 jsou patrné SEM snímky PVA a PVB při velikostech amplitud napětí 0 V, 40 kV, 45 kV a 50 kV. Z obrázků se dá usuzovat, že vlákna vyrobená v odstředivém režimu (0 V) obsahují více kapkových defektů, a jsou méně sjednocené, než vlákna vyrobená v elektroodstředivém režimu.

Z těchto snímků byly vytvořeny pro jednotlivé snímky vytvořeny histogramy, patrné na dalším obrázku.



Obrázek 44 - Snímky vzorků PVA a PVB při napětích od amplitudy 0 V (odstředivý režim bez účinků elektrických sil) do 50 kV

Z histogramů na obrázku 45 je zřejmé, že aplikace vysokého napětí při procesu odstředivého zvlákňování zvyšuje počet vláken o menších průměrech ve zkoumaných vzorcích. Podíl vláken s průměrem pod 1 mikrometr je poměrně nízký. Je to dáno zřejmě recepturou zvlákňovaného roztoku. Detailní zkoumání a vysvětlení těchto jevů není cílem této práce. Bylo dokázáno, že kombinace střídavého vysokého napětí a zařízení pro odstředivé zvlákňování s axiálním výstupem vláken je možná a provozuschopná.



Obrázek 45 - Histogramy vytvořené pro jednotlivé vzorky PVB a PVA při různých napětích

4.3 Vyhodnocení produktivity

Na zařízení byly provedeny testy produktivity. Jejich cílem bylo zjistit, jaký vliv na produktivitu zařízení bude mít přivedení střídavého napětí na spinneretu ve srovnání s pouze odstředivým režimem. Tentýž test byl za stejných parametrů pro každý roztok proveden pětkrát v odstředivém režimu (bez účinků vysokého napětí) a pětkrát v režimu elektroodstředivém s amplitudou napětí $U_a = 50 \text{ kV}$. Na zadní stranu boxu byla nalepena perlina - podkladový materiál, která byl před každým měřením zvážena (viz obrázek 46). Poté bylo zařízení uvedeno do provozu a časomíra byla spuštěna. Vlákna byla zachytávána na podkladový materiál. Po deseti minutách byl provoz přerušen a po 24 hodinách byla perlina s nanosenou nanovláknennou vrstvou, byla opět zvážena. Z rozdílu hmotností byla vypočtena čistá hmotnost nanosených vyschlých vláken.

Z provedených pěti měření byla následně vypočtena průměrná produktivita v gramech za minutu (viz tabulka 1). Tentýž test byl za stejných parametrů pro každý roztok proveden pětkrát v odstředivém režimu (bez účinků vysokého napětí) a pětkrát v režimu elektroodstředivém s amplitudou napětí $U_a = 50 \text{ kV}$.



Obrázek 46 - Vážení nanosené nanovlákně vrstvy včetně perlíčky

Z tabulky 1 jsou patrné hmotnosti nanosených vláken na podkladovém materiálu nanosené za 10 minut provozu $m_{1-5} [\text{g}]$, a z nich vypočítané průměrné produktivity $P_p [\text{g}/\text{min}]$. V levé části tabulky jsou výsledky pro PVB při velikosti amplitudy napětí $U_a = 0 \text{ V}$ a $U_a = 50 \text{ kV}$. V pravé části tabulky jsou výsledky pro PVA při totožných napětích.

Tabulka 1 - Tabulka zjištěných hmotností vláken a průměrných produktivit., m_{1-5} hmotnost suchých vláken v gramech nanosených za 10 minut provozu [g], P_p průměrná produktivita [g/min]

PVB	0 V	50 kV	PVA	0 V	50 kV
$m_1 [\text{g}]$	2,56	4,86	$m_1 [\text{g}]$	1,11	1,63
$m_2 [\text{g}]$	2,31	4,57	$m_2 [\text{g}]$	1,35	1,55
$m_3 [\text{g}]$	2,67	4,21	$m_3 [\text{g}]$	1,05	1,85
$m_4 [\text{g}]$	2,82	5,03	$m_4 [\text{g}]$	1,3	1,77
$m_5 [\text{g}]$	3,28	4,65	$m_5 [\text{g}]$	1,24	1,69
$P_p [\text{g}/\text{min}]$	0,27	0,47	$P_p [\text{g}/\text{min}]$	0,12	0,17

Úkolem této tabulky není porovnávání produktivit jednotlivých polymerů, neboť technologické parametry pro jednotlivé roztoky byly různé. Tato tabulka dokazuje, že přivedení vysokého střídavého napětí na spinneretu se projevilo významným nárůstem průměrné produktivity P_p . Průměrná produktivita P_p elektroodstředivého zvlákňování PVB byla o 75 % vyšší, než při zvlákňování v pouze odstředivém režimu. K navýšení produktivity došlo i při zvlákňování roztoku polymeru PVA – průměrná produktivita P_p byla v elektroodstředivém režimu o 42 % vyšší, než bez účinků vysokého napětí.

Lze předpokládat, že nárůst produktivity byl způsoben dodáním další energie v podobě vysokého AC napětí. Roztoku na spinneretě je v odstředivém režimu dodávána mechanická energie v podobě rotace. Pomocí pouze mechanické energie lze vytvořit z principu metody pouze omezené množství vláken. Část zvlákňovaného polymerního roztoku opouští hranu spinnerety v podobě kapek, které v zachycené vrstvě vytvářejí defekty. Použité konstrukční uspořádání stroje pracuje částečně jako separátor kapek a tím i defektů. Po přivedení elektrického AC napětí na elektrodu nastává synergický efekt, při kterém dochází v téže oblasti k tvorbě vláken mechanickými, i elektrickými silami. V elektroodstředivém režimu dojde díky tomuto efektu k vytvoření většího množství vláken, než by tomu bylo v odstředivém režimu, přičemž vlákna vznikají i z roztoku, který by jinak opustil zařízení ve formě kapek. To má za následek zvýšení produktivity a zároveň zlepšení jakosti vyrobeného materiálu.

Po určité době provozu zařízení dochází k omezení průchodu vzduchu podkladovým materiálem a odražení vzduchového proudu, který s sebou odnáší vlákna s nedostatečnou rychlostí pohybu. Testy produktivity lze považovat za orientační, ale s dostatečnou vypovídací schopností.

5 KONSTRUKČNÍ NÁVRH ELEKTROODSTŘEDIVÉHO ZAŘÍZENÍ

V této kapitole bude popsán návrh elektroodstředivého zařízení a poloautomatického laboratorního zařízení pro výrobu plošných nanovlákných struktur.

5.1 Elektroodstředivé zařízení

Na základě výše popsaných testů byly vypracovány konstrukční varianty elektroodstředivého zařízení. V této kapitole jsou jednotlivé varianty popsány a na závěr je vybrána nejvhodnější varianta.

Experimenty provedené na funkčním modelu zařízení v kapitole 4 odhalily řadu nedostatků. Z důvodu absence pružné spojky na hřídeli docházelo vlivem nesouosostí k přehřívání motoru. Pro snížení nadbytečných pasivních odporů způsobených nesouosostmi je proto nutné vybavit nově navrhované zařízení pružnou spirálovou spojkou WKAK3038. Při experimentech bylo dále nutné manuálně odstraňovat nánosy polymeru ze zvlákňovací oblasti (viz obrázek 40, kapitola 4.1). Proto je třeba nové zařízení vybavit stíracím elementem, který bude zajišťovat odstraňování polymerních nánosů. Pro zlepšení schopnosti odvádět lepkavá vlákna ze zařízení bude navržena dýza.

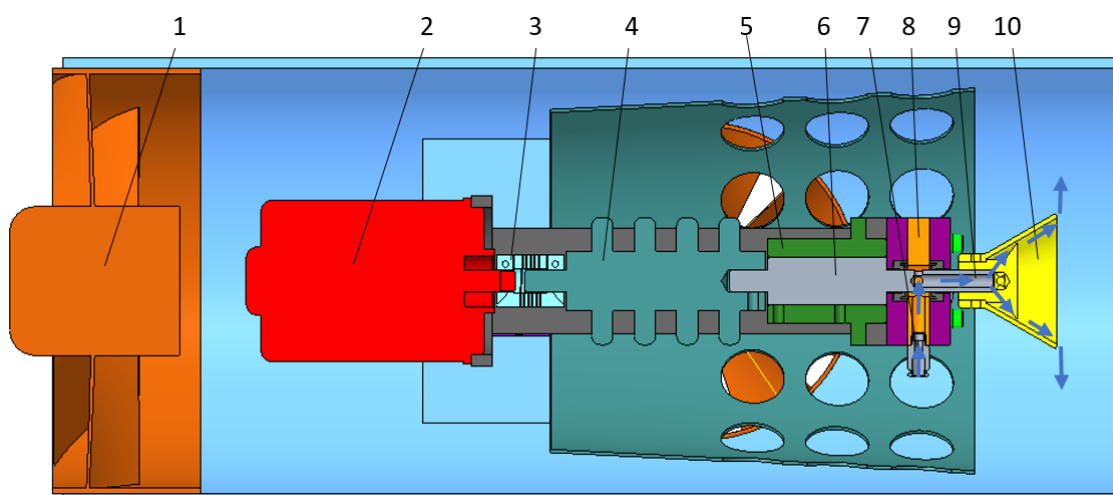
Při obsluze zařízení tohoto typu je třeba pravidelně udržovat průchodnost kapalinových cest, kterými roztok protéká. Při kontaktu se vzduchem dochází k odpařování rozpouštědla a tuhnutí roztoku. Po každém použití zařízení je třeba kapalinové cesty důkladně vyčistit, aby nedošlo k jejich zneprůchodnění. Pro snadnou obsluhu je žádoucí jednoduchá demontáž všech součástí, které jsou v kontaktu s roztokem (spinnereta, dávkovací trubička atd.) bez nutnosti použití nástrojů. Ponořením těchto komponent do rozpouštědla dojde k rozpuštění rezidua polymeru.

5.1.1 Způsob pohonu spinnerety

Důležitým rozhodnutím při návrhu nového elektroodstředivého zařízení bylo, jakým způsobem bude přenášen krouticí moment na spinneretu. Problematice vhodného konstrukčního řešení se věnuje následující kapitola.

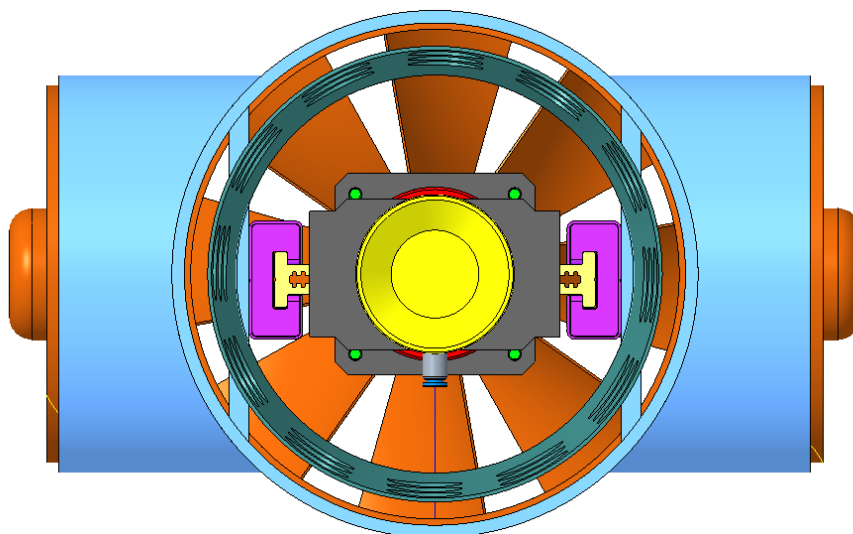
5.1.1.1 První varianta návrhu

Nejjednodušším a nejkompaktnějším způsobem pohonu je přímý pohon spinnerety. Varianta návrhu je znázorněna na obrázku 47. Celé zařízení je osově symetrické, všechny komponenty leží v jedné ose. Motor (2) a izolační nástavec (4) propojuje spirálová hřídelová spojka (3), kompenzující nesouososti. Dále je izolační nástavec spojen přímo s hřídelkou ložiskového pouzdra (6). Ložiskové pouzdro je uloženo v ložiskovém domku (5). Na druhém konci hřídelky je připevněna spinnereta (10). Z důvodu vysokého rozdílu potenciálů nelze vést hadičku s nabitým roztokem osou motoru. Roztok je přiveden z radiálního směru bezprostředně za spinneretou (7). Soustava těsnících desek s dvěmi hřídelovými těsněními (8) zajišťuje těsnost systému. Trasa roztoku je v obrázku vyznačena šipkami. Sérií radiálních otvorů se roztok dostává do axiálního otvoru v hřídelce ložiskového pouzdra (9), skrz který proudí na vnitřní povrch spinnerety, až do zvláknovací oblasti, kde dochází k tvorbě vláken.



Obrázek 47 – Řez první variantou návrhu – přímé uložení hřídele spinnerety, axiální uspořádání, (1) axiální ventilátor, (2) motor, (3) hřídelová spojka, (4) izolační nástavec, (5) ložiskový domek, (6) ložiskové pouzdro, (7) přípojný bod, (8) těsnící desky s guferami, (9) axiální kanál v hřídelce ložiskového pouzdra, (10) spinnereta

Tuto variantu lze kombinovat s axiálním ventilátorem za zvláknovací jednotkou (pozice 1 na obrázku 47) z důvodu axiálního uspořádání komponent, které je vhodné pro proudění vzduchu (viz obrázek 48).

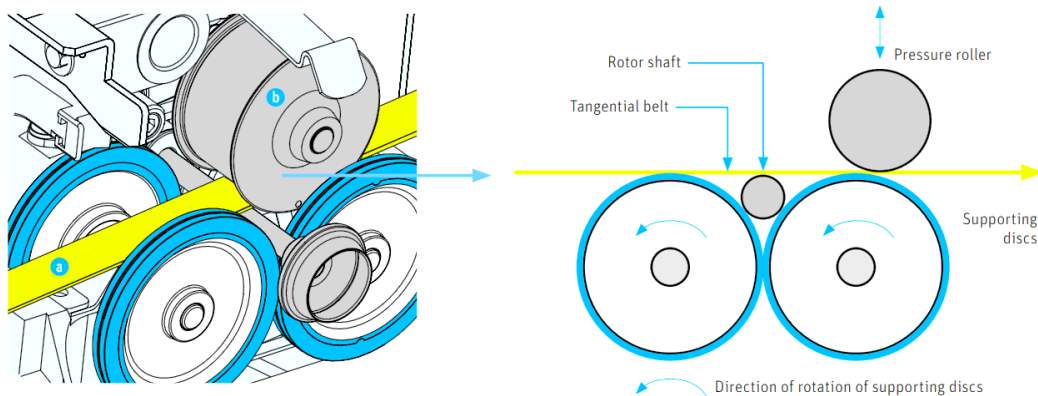


Obrázek 48 – První varianta návrhu – přímé uložení hřídele spinnerety, axiální uspořádání

Výhodou této varianty je minimum použitých komponent a celková jednoduchost zařízení. Nevýhodou je problematická demontáž hřídele spinnerety a těsnících desek a následné čištění kapalinových cest. To je způsobené přímým uložením hřídele spinnerety v ložiskovém pouzdru, které nelze jednoduše vyjmout. Pro vyčištění kapalinových cest této varianty je nutné nejprve sejmout spinneretu, která je na hřídeli přichycena dvěma stavěcími šrouby. Dále je nutné povolení čtyř šroubů a stažení těsnících desek z hřídele. Po vyčištění hřídelky a všech komponent následuje montáž všech komponent zpět na své místo. To výrazně zpomaluje údržbu a práci se zařízením.

5.1.1.2 Nepřímé uložení

Další varianty návrhů byly inspirovány nepřímým uložením rotoru (viz obrázek 49), využívaným pro rotorové dopřádání při výrobě příze. Základ je tvořen dvěma páry podpůrných kotoučů umístěných vedle sebe. Kotouče jsou vybaveny protiskluzovou vrstvou (na obrázku znázorněna modrou barvou). Mezi kotouče je vložena hřídelka rotoru. Hřídelka je roztáčena tečně plochým řemenem, který je přitlačován přítlačnou kladkou.



Obrázek 49 – Nepřímé uložení rotoru dopřádacího stoje [24]

Toto uložení bylo vyvinuto kvůli požadavku na velmi vysoké otáčky rotoru. Otáčky podpůrných kotoučů jsou díky vhodnému poměru průměru hřídele a průměrů kotoučů od 1:8 do 1:10, takže i při $n = 160\,000$ otáčkách rotoru za minutu jsou otáčky podpůrných kotoučů maximálně $n = 20\,000$ ot/min. Tento systém tak umožňuje dosažení vyšších otáček rotoru, než v případě přímého uložení. [24]

Důvodem, proč byl tento systém vybrán pro uložení spinnerety, však není potřeba dosažení vysokých otáček. Systém nepřímého uložení také přináší možnost velmi jednoduchého vyjmutí hřídele bez nutnosti použití nástrojů, a opětovného vložení. Tento systém přináší výrazné zjednodušení obsluhy zařízení, proto byl použit v dále popsaných variantách návrhů.

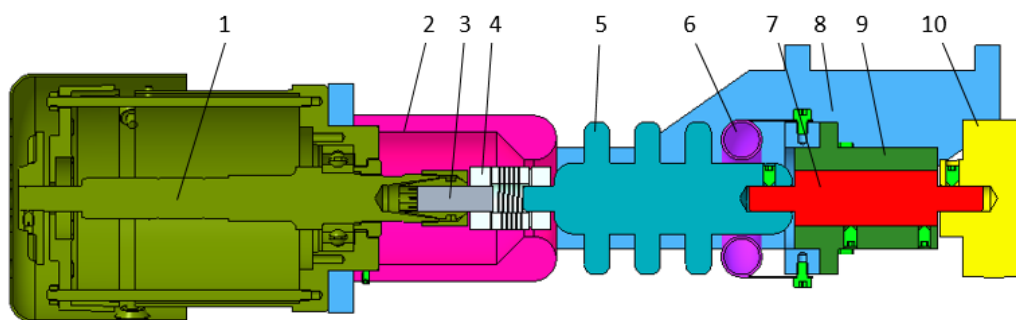
Všechny vytvořené varianty inspirované nepřímým uložením se skládají ze tří základních částí. Obal je tvořen vnějším pláštěm (obrázek 55, pozice 1), svařený z trubek z materiálu PP. Druhou část tvoří hnací jednotka. Třetí část představuje jednotka nepřímého uložení.

Přenos sil na hřídelku umožňuje kyvné uložení hnací jednotky vůči jednotce nepřímého uložení. Osa C kyvného uložení je zobrazena na obrázku 52. Pomocí šroubu, nebo závitové tyče z izolačního materiálu lze nastavit potřebné předpětí převodu. Toto předpětí také vtlačuje hřídelku mezi podpůrné kotouče nepřímého uložení a tím vymezuje její polohu. Po uvolnění předpětí lze hřídel snadno vyjmout ze zařízení.

Hnací jednotka

Hnací jednotka (viz obrázek 50) všech zbývajících variant se sestává ze stejných komponent. Proto zde bude podrobněji popsána. Základ je tvořen rámem (8) vyrobeným

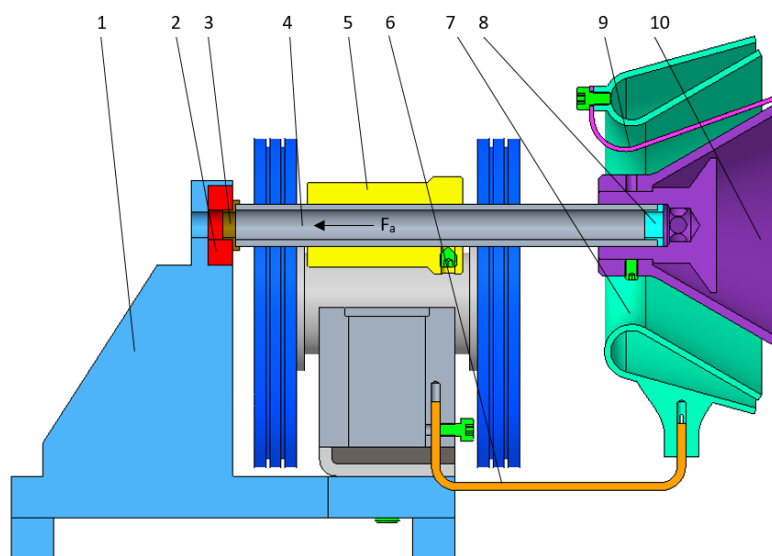
z materiálu PA6. Krouticí moment z motoru (1) je přenášén přes redukci (3), flexibilní hřídelovou spojku (4), izolační nástavec (5), hřídelku ložiskového pouzdra (7) a třecí kotouč (10), popřípadě řemenici, odkud je dále přenášén zvoleným převodem na hřídel spinnerety. Ložiskové pouzdro je uloženo v ložiskovém domku (9). Koronové prstence (2) a (6) stíní hrany ložiskového pouzdra a hřídelové spojky.



Obrázek 50 - Řez hnací jednotkou, (1) motor, (2) koronový prstenec, (3) redukce, (4) pružná spojka, (5) izolační nástavec, (6) koronový prstenec, (7) ložiskové pouzdro, (8) rám, (9) ložiskový domek, (10) řemenice

Jednotka nepřímého uložení

Obrázek 51 zobrazuje jednotku nepřímého uložení v řezu, a obrázek 52 kompletní jednotku nepřímého uložení s vloženou hřídelí spinnerety.



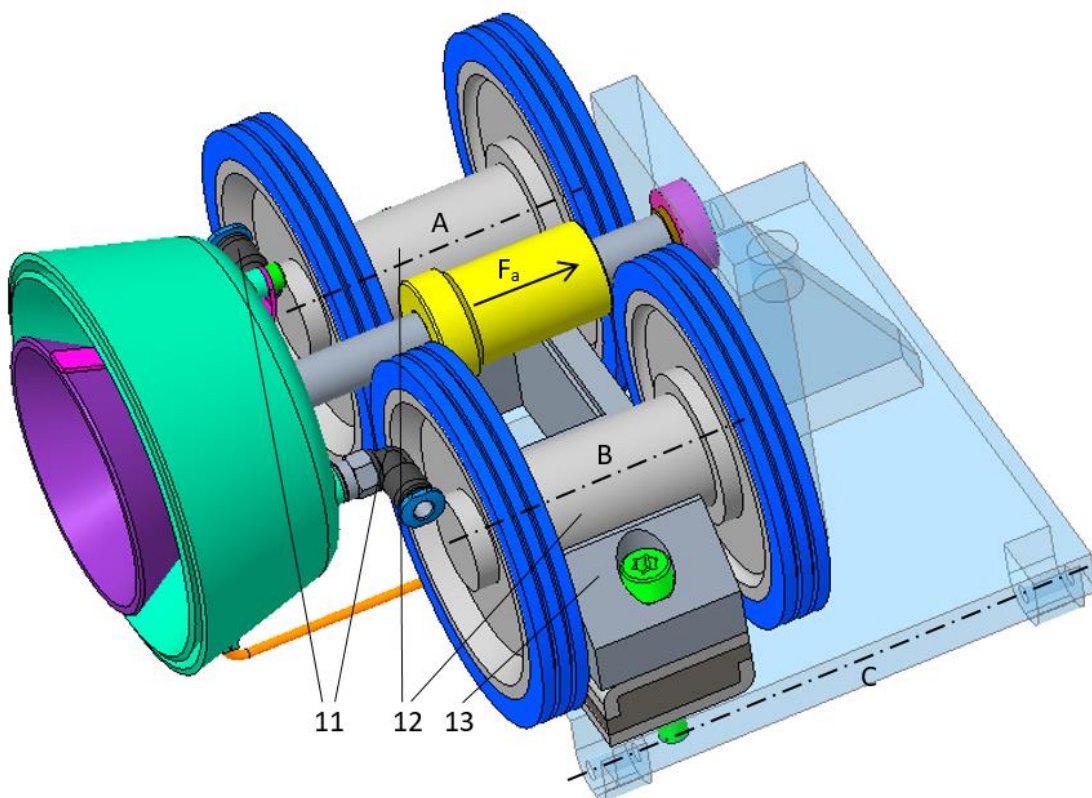
Obrázek 51 – Řez jednotkou nepřímého uložení s dutou hřídelí spinnerety, (1) skelet jednotky, (2) ložisko 607 zachycující axiální reakci, (3) osazení, (4) dutá trubka, (5) třecí segment/řemenice, (6) podpěra držící dýzu, (7) dýza, (8) zátko zamezující úniku roztoku, (9) stírací element, (10) spinnereta

Základ jednotky tvoří dva páry podpůrných kotoučů (12) uložené v těle (13), které je přišroubováno ke skeletu vyrobeného z materiálu PA (1). Protože osy rotací kotoučů (A) a (B) nejsou rovnoběžné, vzniká při rotaci axiální síla F_a . Tato axiální síla zlehka

tlačí hřídel přes osazení (3) na kuličkové ložisko (2), které zachytává axiální reakci. Axiální síla F_a zajišťuje pevnou polohu hřídele při rotaci a zamezuje jeho uvolnění.

Sestava hřídele spinnerety, volně vložená mezi kotouče se skládá z duté trubičky (4), na jejímž konci je připevněna spinnereta (10). Konec dávkovací trubičky je vsunut do zátky (8), vyrobené z materiálu PTFE. Zátka má za úkol vymezit polohu vyložené trubičky, a zamezit jejímu kmitání, dále by měla zabránit úniku roztoku do prostoru mezi hřídelí a dávkovací trubičkou. Krouticí moment je na hřídel přenášen přes třecí segment, nebo řemenici (5).

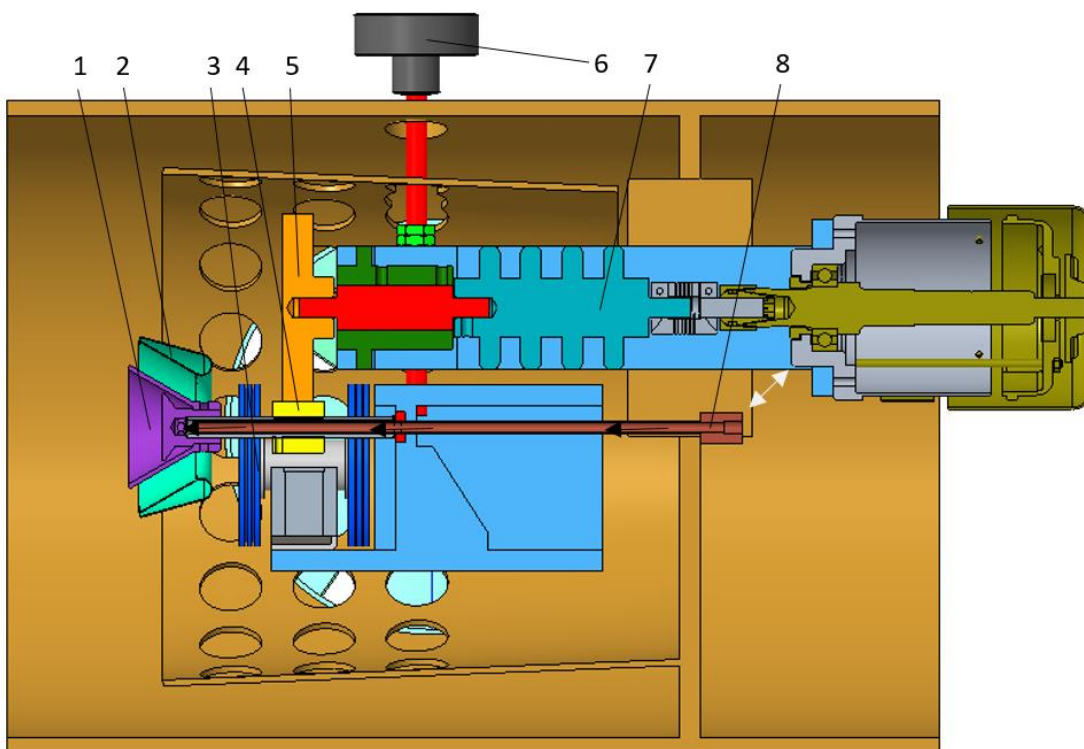
Odvodu nanovláken ze zařízení napomáhá dýza (7), připevněná k tělu nepřímého uložení pomocí vzpěry (6). Dýza je připojena k tlakovému vzduchu přes dvě pravouhlá šroubení (11). Průtok vzduchu lze regulovat pomocí redukčního ventilu umístěného na přívodní hadičce tlakového vzduchu. K dýze je připevněn stírací element (9), který odstraňuje nánosy polymeru ve zvláknovací oblasti.



Obrázek 52 – Jednotka nepřímého uložení s hřídelí spinnerety, (A) a (B) osy rotací podpůrných kotoučů, (C) osa rotace kyvného uložení, (11) šroubení pro připojení tlakového vzduchu, (12) pár podpůrných kotoučů, (13) tělo nepřímého uložení

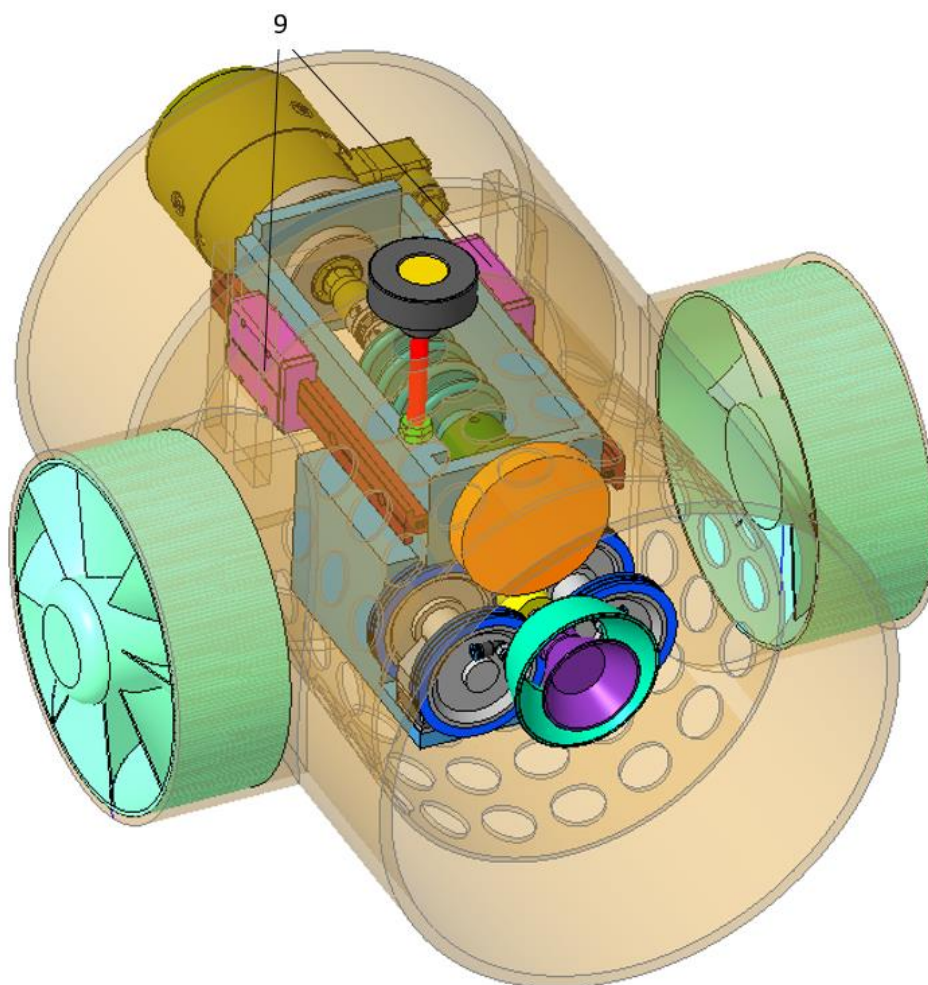
5.1.1.2.1 Druhá varianta návrhu

Na obrázku 53 je vidět řez druhou variantou využívající nepřímé uložení s třecím převodem. Krouticí moment je na hřídelku spinnerety (1) přenášen z hnací jednotky (7) prostřednictvím třecích sil mezi třecími kotouči (4) a (5). Přítlak mezi kotoučem a hřídelí spinnerety, potažmo mezi hřídelí a podpůrnými kotouči (3), lze nastavit dle potřeby otáčením rýhovanou ovládací maticí (6). Skrz otvor v hřídeli je prostrčena dávkovací trubička (8), kterou je dopravován roztok na spinneretu. Pro snadné vyjmutí a čištění je trubička přímá, bez ohybů. Odvodu vláken napomáhá nově navržená dýza (2), množství průtoku vzduchu je ovládáno redukčním ventilem.



Obrázek 53 - Řez druhou variantou návrhu - nepřímé uložení, třecí převod, (1) sestava hřídele spinnerety, (2) dýza, (3) podpůrné kotouče jednotky nepřímého uložení, (4) sekundární třecí kotouč, (5) primární třecí kotouč, (6) rýhovaná matice, (7) hnací jednotka, (8) dávkovací trubička

Na obrázku 54 je znázorněna druhá varianta využívající nepřímého uložení hřídele spinnerety v kombinaci s třecím převodem. Pro lepší viditelnost vnitřních komponent byl vnější plášť částečně zprůhledněn. Pozice (9) označuje lineární vedení, které umožňuje posuv zvlákňovací jednotky v axiálním směru.



Obrázek 54 – Druhá varianta návrhu – nepřímé uložení, převod třecím kotoučem, (9) lineární vedení

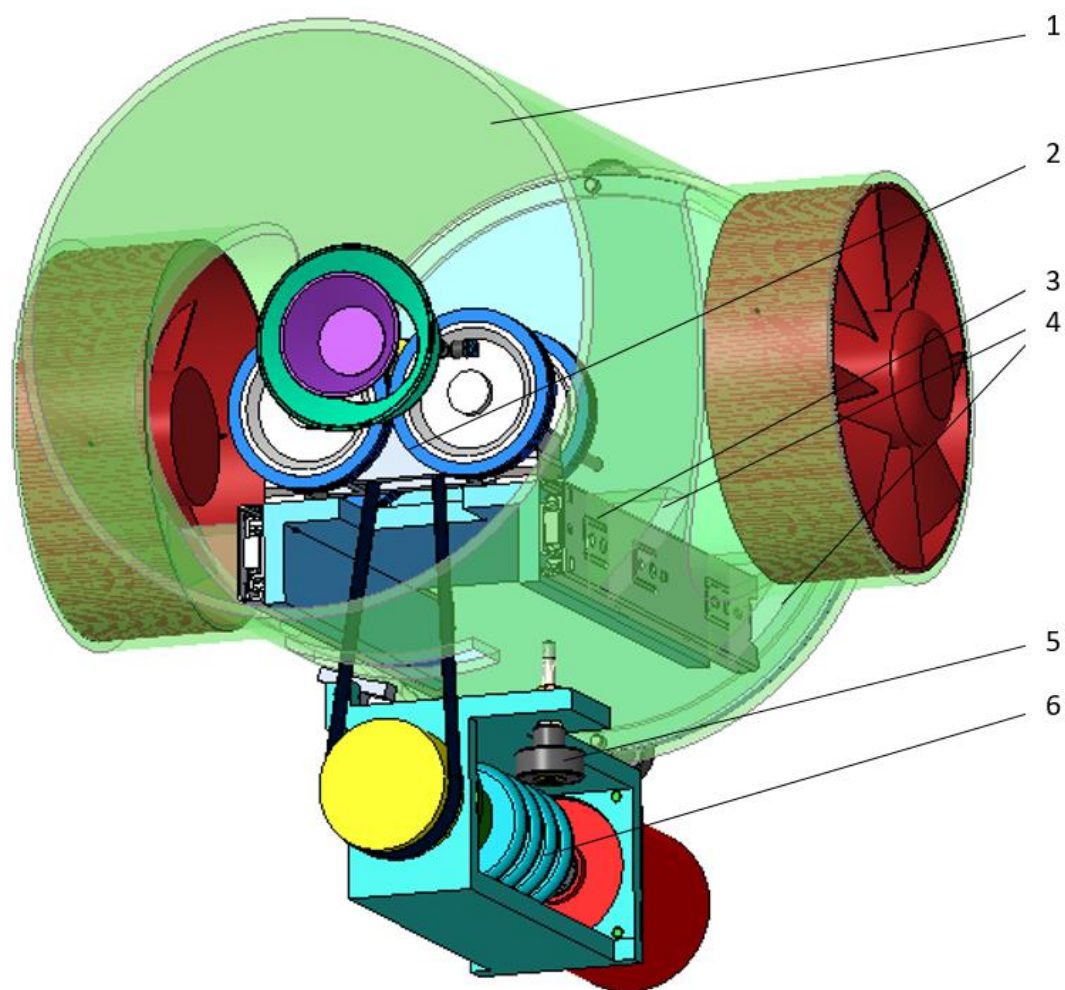
Nevýhodou konstrukční varianty je nedostatečná vzdálenost (55 mm) mezi nabitou hadičkou s roztokem a motorem (označena bílou šipkou v obrázku 53). Dle normy je třeba mezi dvěma součástmi s rozdílem potenciálů $U_{ef} = 35 \text{ kV}$ zachovat vzduchovou vzdálenost alespoň $v = 100 \text{ mm}$. Zvětšováním průměrů třecích kotoučů by docházelo k nadbytečnému narůstání zástavbového prostoru a nežádoucímu vlnění a uhýbání třecích kotoučů.

Z důvodu snahy o zvýšení osové vzdálenosti mezi motorem a spinneretou byl pro následující varianty zvolen řemenový převod.

5.1.1.2.2 Třetí varianta návrhu

Třetí varianta návrhu je opět inspirovaná systémem nepřímého uložení. K přenosu momentu je v tomto případě použit řemen. Hnací jednotka (6) je z důvodu zachování bezpečné osové vzdálenosti umístěna mimo vnější plášť (1) zařízení. Správné předpětí

řemene lze nastavit pomocí rýhovaného ovládacího šroubu (5). Celou vnitřní jednotku nepřímého uložení (2) lze díky kuličkovému výsuvu (3), kterému se blíže věnuje kapitola 5.1.4, vysunout mimo vnější plášť. Výsuv tohoto typu nelze přichytit k vnějšímu plášti letmo. Obě výsuvné lišty byly přichyceny ve dvou bodech k přepážkám (4) vnějšího pláště. Tyto přepážky však znemožňují vložení vnitřního děrovaného pláště (obrázek 24, pozice 3), který je nezbytný pro vytvoření vzduchové clony. Z tohoto důvodu se nábytkový výsuv pro tuto aplikaci neosvědčil.



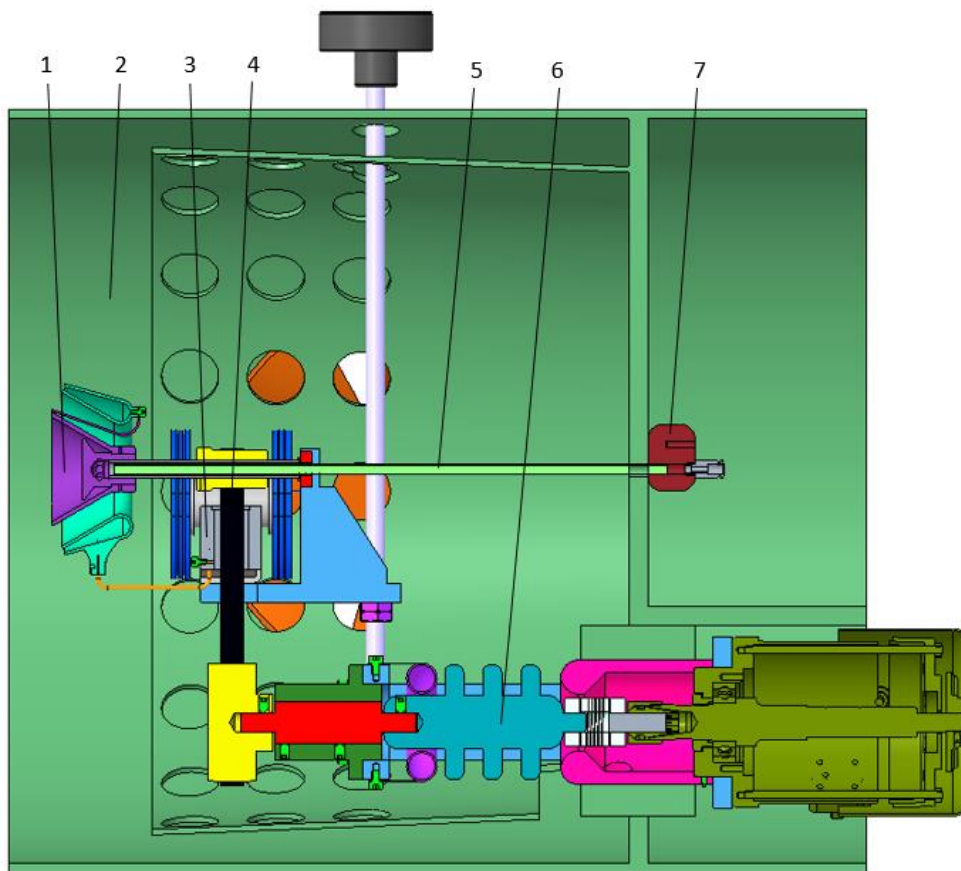
Obrázek 55 - Třetí varianta – nepřímé uložení, řemenový převod s hnací jednotkou mimo plášť, (1) vnější plášť, (2) jednotka nepřímého uložení, (3) kuličkový výsuv, (4) přepážky pro upevnění výsuvu, (5) šroub s rýhovanou hlavou, (6) hnací jednotka

Tato varianta návrhu zařízení zajišťuje bezpečnou vzdálenost (155 mm) mezi motorem a přípojným bodem, vytrácí se však kompaktnost celého zařízení.

5.1.2 Finální varianta

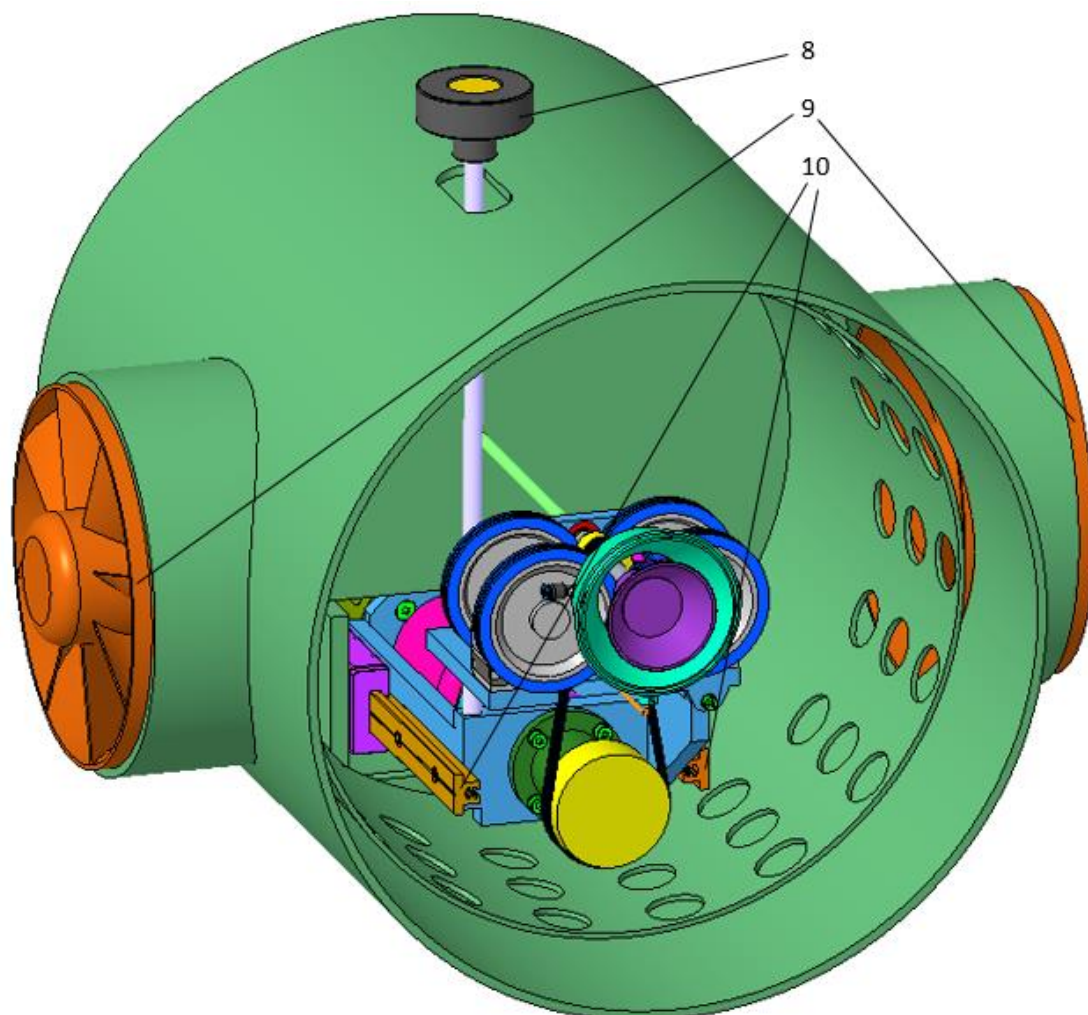
Finální varianta kombinuje stejně jako ta předchozí nepřímé uložení hřídele spinnerety a řemenový převod. V tomto případě je však hnací jednotka umístěna dovnitř pláště. Průměr pláště byl zvětšen tak, aby byla zachována bezpečná vzdálenost a zároveň se všechny komponenty vtěsňaly dovnitř pláště.

Finální varianta návrhu elektrodstředivého zařízení (viz obrázek 56) se podobně jako předchozí varianty skládá ze třech výše popsaných částí – vnějšího pláště (2), hnací jednotky (6) a jednotky nepřímého uložení (3). Mezi kouče nepřímého uložení je volně vložena dutá hřídele spinnerety (1), na kterou je přenášen moment přes řemenový převod (4), jehož předpětí lze nastavit pomocí ovládací rýhované matice (obrázek 57, pozice 8). Do duté hřídele lze vložit dávkovací trubičku (5), skrz kterou je na spinneretu dopravován polymerní roztok. Na konci dávkovací trubičky je nalisován přípojný bod (7) pro výtlačnou hadičku polymeru a vysokonapěťový zasilovač. Aby na jeho hranách nedocházelo ke koncentraci náboje, jsou zaoblené.



Obrázek 56 - Řez finální variantou návrhu, (1) sestava hřídele spinnerety, (2) vnější plášť, (3) jednotka nepřímého uložení, (4) řemenový převod, (5) dávkovací trubička, (6) hnací jednotka, (7) přípojný bod

Obrázek 57 zobrazuje finální variantu návrhu. Celou zvláknovací jednotku lze díky lineárnímu vedení (10) HEYMAN DFG115 posouvat v axiálním směru. Axiální ventilátory (9) vytvářejí vzduchovou clonu, která unáší vlákna, a zamezuje jejich nalepení na vnější plášť.



Obrázek 57 - Finální varianta návrhu, (8) matice nastavující předpětí řemene, (9) axiální ventilátory, (10) lineární vedení

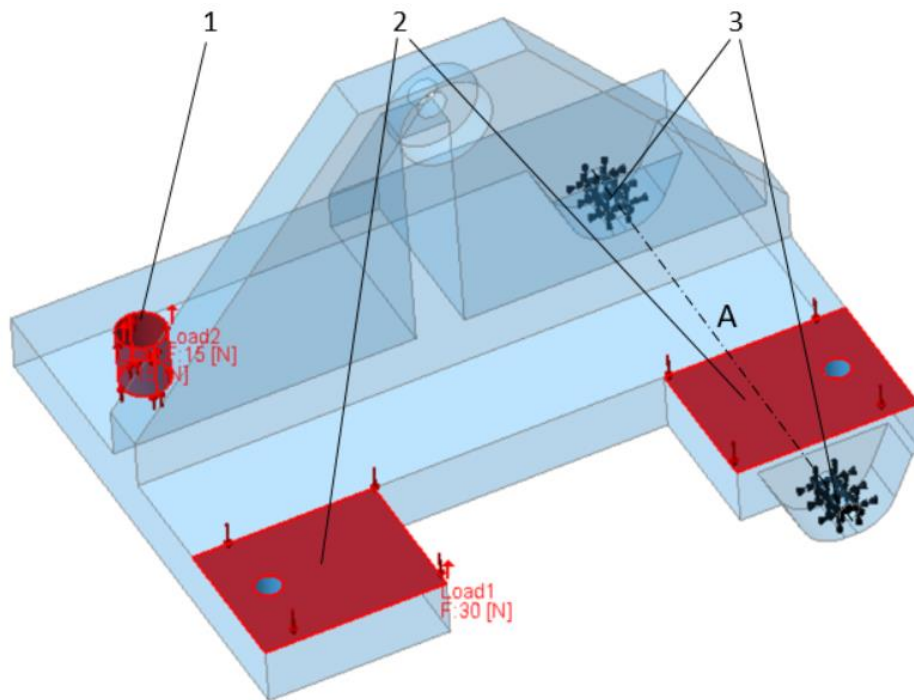
Toto zařízení umožňuje běžnou údržbu a čištění kapalinových cest zcela bez nutnosti použití nástrojů. Otáčením rýhované matice lze snadno povolit předpětí řemene. Poté je možné ze zadní strany vysunout dávkovací hadičku, a vyjmout sestavu hřídele spinnerety.

Byly vytvořeny výkresy sestav, které lze najít v příloze.

5.1.3 Analýza MKP

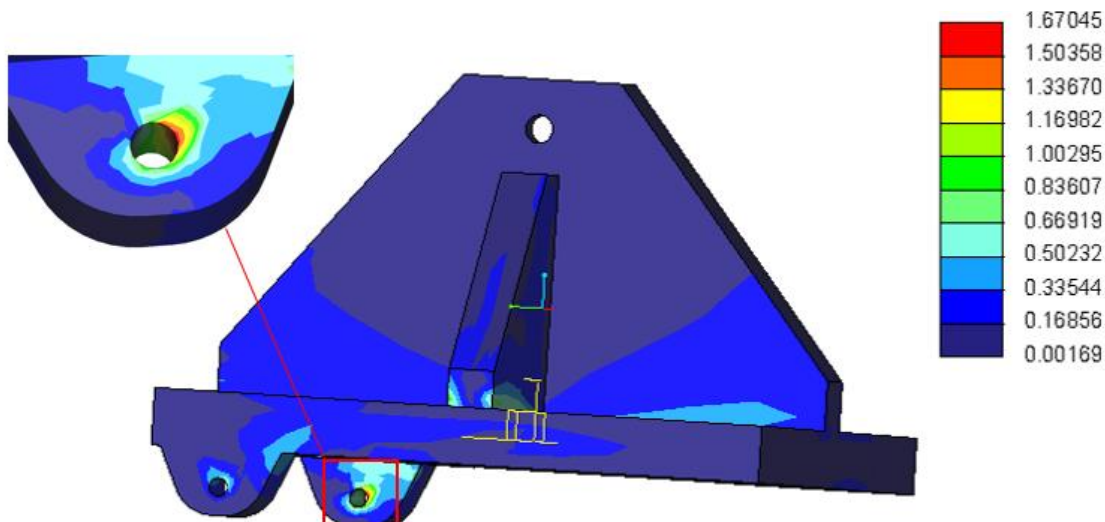
Konzola jednotky nepřímého uložení byla podrobena analýze metody konečných prvků (MKP) v softwaru Creo Parametric. Tento díl je zobrazen na obrázku 57. Jedná se o nosnou konzolu (skelet) jednotky nepřímého uložení. Díl je svařovaný z materiálu PA6.

Na obrázku 58 je zobrazený model (pro lepší viditelnost částečně zprůhledněn) včetně okrajových podmínek. V rámci preprocessingu byl z knihovny vybrán materiál PA6. Dále bylo třeba definovat geometrické okrajové podmínky (3). Konzola je kyvně uložena kolem osy (A), má pouze jeden stupeň volnosti. Silové okrajové podmínky jsou v obrázku označeny červenou barvou. Síla (2) reprezentuje sílu předpětí řemene. Hodnota předpětí řemene byla experimentálně stanovena na $F_0 = 30 \text{ N}$. Řemen působí přes hřídelku na podpůrné kotouče a tělo nepřímého uložení na konzolu. Síla tedy byla přidána na oblast (2). Druhou silou působící na konzolu je síla od závitové tyče F_1 , která působí opačným směrem než síla F_0 , zvedá konzolu i s hřídelí, a tím napíná řemen. Obě síly působí v jiné vzdálenosti od osy otáčení konzoly (A), a jsou ve vzájemné rovnováze. Dle vzdálenosti sil F_0 a F_1 od osy otáčení (A) byla vypočtena síla od závitové tyče tak, aby se oba momenty vzájemně vyrušily. Na válcovou plochu závitů (1) byla přidána síla od závitové tyče $F_1 = -15 \text{ N}$. Následně byla spuštěna analýza.



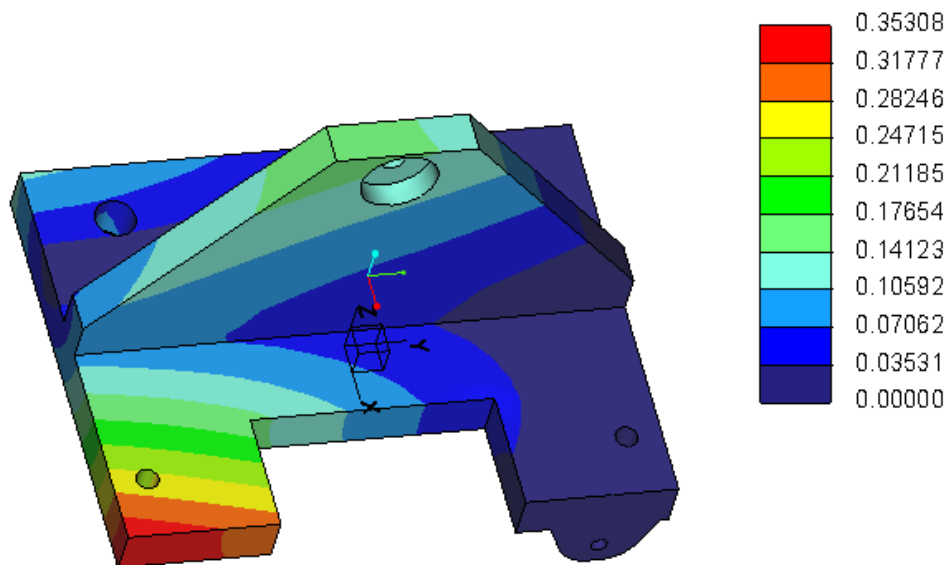
Obrázek 58 - Model konzoly s okrajovými podmínkami, (1) síla F_1 od závitové tyče, (2) síla předpětí řemene F_0 , (3) vazby konzoly v prostoru, umožněna pouze rotace kolem osy (A)

V rámci postprocessingu byly zhodnoceny výsledky analýzy. Na obrázku 59 je zobrazeno rozložení napětí na konzole. Nejvyšší napětí σ [MPa] je v oblasti uložení čepu (viz detail). Maximální hodnoty napětí na konzole jsou zanedbatelné.



Obrázek 59 – Rozložení napětí von Mises na konzole, jednotky legendy [MPa], oblast s nejvyšší hodnotou napětí v detailu

Na obrázku 60 je patrné rozložení posunutí uzlů p [mm] na konzole. Maximální posunutí uzlu je vyhovující.



Obrázek 60 - Rozložení posunutí uzlů na konzole [mm]

5.1.4 Vedení výsuvu

Pro uložení a umožnění posuvu zvláknovací jednotky vůči vnějšímu plášti bylo třeba vybrat vhodný systém. Výběr je popsán v této kapitole.

5.1.4.1 Kuličkový celovýsuv

Kuličkový celovýsuv (viz obrázek 61) se používá především v nábytkářství pro výsuv šuplíků. Výhodou je aretace v zasunuté poloze, a dále možnost úplného výsuvu jednotky, což by významně usnadnilo obsluhu zařízení. Nosnost výsuvu je $m = 15$ kg. Nevýhodou je, že výsuv nelze namontovat letmo do vnějšího pláště. Přepážka pro namontování výsuvu (viz obrázek 55, pozice 4) ve dvou bodech by následně komplikovala usazení vnitřního pláště, který je nutný pro vytvoření potřebné vzduchové clony. Další nevýhodou výsuvu je citlivost vůči nečistotám.



Obrázek 61 – Kuličkový celovýsuv

5.1.4.2 Lineární vedení

HEYMAN DFG115 umožňuje lineární posuv s manuálně nastavitelnou vůlí nebo předpětím. Skládá se z hliníkového profilu a pohyblivého vozíku, obsahujícím kluzné prvky z technického plastu. Je odolný proti nečistotám a prachu, a nevyžaduje mazání. Nosnost výsuvu je $m = 50$ kg. Pomocí čtyř šroubů lze vozík jednoduše uchytit letmo k plášti (viz obrázek 62). Zvlákňovací jednotku lze kdykoliv snadno vysunout z vnějšího pláště. Zároveň je možné manuálně nastavit předpětí tak, aby za chodu stroje nedocházelo k samovolnému vysouvání jednotky.



Obrázek 62 - Lineární posuv HEYMAN DFG115

Pro uložení zvlákňovací jednotky bylo kvůli výše zmíněným výhodám vybráno toto lineární vedení.

5.1.5 Výběr vhodného motoru

Následující kapitola se věnuje výpočtu potřebného výkonu motoru pro variantu návrhu využívající nepřímého uložení hřídele (kapitola 5.1.1.2), a pro variantu s přímým uložení (kapitola 5.1.1.1).

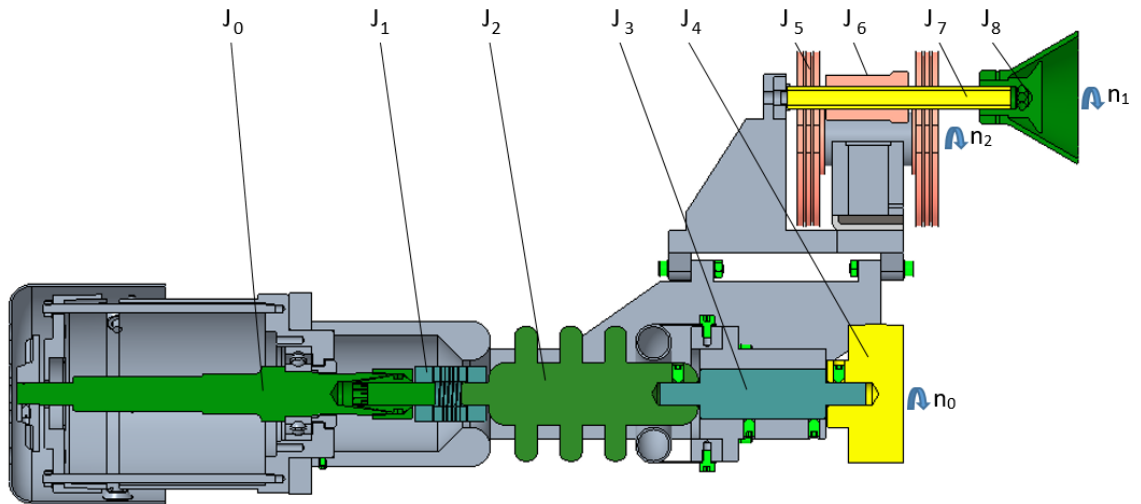
Na upravovaném funkčním vzorku byl umístěn motor ATAS FT4C52R zajišťující pohon zvlákňovací jednotky (viz obrázek 23, pozice 1). Úkolem této kapitoly je ověření správnosti využití tohoto motoru, případně vybrání vhodnějšího motoru pro nově navrhované zařízení.

Pro zjištění potřebného krouticího momentu a výkonu motoru pro danou aplikaci je třeba nejprve vypočítat moment setrvačnosti redukovaný na hřídel motoru. Výpočet redukovaného momentu setrvačnosti vychází ze vzorce (1) pro výpočet kinetické energie.

$$\frac{1}{2} J_{red_0} \cdot \omega_0^2 = \frac{1}{2} J_0 \cdot \omega_0^2 + \frac{1}{2} J_1 \cdot \omega_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \cdot \omega_2^2 \quad (1)$$

Obrázek 63 znázorňuje všechny rotující komponenty finální varianty návrhu, s nepřímým uložení hřídele spinnerety. Pro každý rotující komponent byla v softwaru Creo Parametric 9 vypočítána hodnota momentu setrvačnosti k ose rotace $J_{0-8} [kgm^2]$. Pro výpočet momentu setrvačnosti přímé varianty byly do výpočtu zahrnuty pouze součásti označené zelenou barvou (J_0, J_1, J_2, J_3, J_8). Vypočtené hodnoty byly následně zapsány do tabulky 2. V tabulce 3 jsou zapsány hodnoty otáček $n_{0-2} [ot/min]$ jednotlivých hřídelů.

Otáčky spinnerety byly stanoveny experimentálně, v kapitole 4.1. Otáčky motoru a podpůrných kotoučů byly dopočítány pomocí převodových poměrů.



Obrázek 63 - Nákres rotujících komponent varianty nepřímého uložení (barevně), komponenty varianty přímého uložení jsou označeny tmavě zelenou barvou, pozicemi J_{0-8} označeny momenty setrvačnosti jednotlivých komponent, $n_{0,2}$ jsou označeny otáčky jednotlivých hřídelů

Tabulka 2 – Momenty setrvačnosti jednotlivých komponent k ose rotace J_{0-9} [kgm²]

Komponent	Značka	Hodnota [kgm ²]
Rotor motoru	J_0	$1.25 \cdot 10^{-4}$
Hřídelová spojka	J_1	$2.77 \cdot 10^{-6}$
Izolační nástavec	J_2	$5.68 \cdot 10^{-5}$
Hřídelka ložiskového pouzdra	J_3	$6.92 \cdot 10^{-7}$
Řemenice 1	J_4	$4.16 \cdot 10^{-5}$
Dvojice podpůrných kotoučů	J_5	$2.03 \cdot 10^{-4}$
Řemenice 2	J_6	$7.74 \cdot 10^{-7}$
Hřídelka spinnerety	J_7	$5.90 \cdot 10^{-7}$
Spinnereta	J_8	$1.43 \cdot 10^{-5}$

Tabulka 3 – Otáčky jednotlivých hřídelů za minutu $n_{0,2}$ [ot/min]

Název	Značka	Hodnota [ot/min]
Otáčky rotoru motoru	n_0	3000
Otáčky spinnerety	n_1	9000
Otáčky podpůrných kotoučů	n_2	1000

Po upravení vzorce (1) pro jednotlivé varianty zařízení dostáváme následující vztahy pro výpočet redukovaného momentu setrvačnosti pro nepřímé uložení $J_{red_{NU}}$ (2), a pro přímé uložení $J_{red_{PU}}$ (3).

$$J_{red_{NU}} = (J_0 + J_1 + J_2 + J_3 + J_4) + \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^2 \cdot (J_6 + J_7 + J_8) + 2 \left(\frac{n_2}{n_0}\right)^2 \cdot J_5 \quad (2)$$

$$J_{red_{PU}} = (J_0 + J_1 + J_2 + J_3 + J_8) \quad (3)$$

Po dosazení hodnot z tabulek 2 a 3 do vzorců (2) a (3) vychází redukovaný moment setrvačnosti pro nepřímé uložení $J_{red_{NU}} = 4.2 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$ a pro přímé uložení $J_{red_{PU}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$.

Při návrhu motoru byly zanedbány pasivní odpory - odpor vzduchu, tření v ložiscích a pasivní odpory řemene. Rozběhový moment M_r potřebný k roztočení soustavy se tedy rovná momentu potřebnému pro urychlení rotačních hmot M_{zr} .

$$M_r = M_{zr} \quad (4)$$

Rozběhový moment M_r lze vypočítat dle vzorce (5). Do vzorce byly dosazeny výše vypočítané redukované momenty J_{red} pro obě varianty zařízení. Vypočtené hodnoty rozběhových momentů M_r v závislosti na času rozběhu t byly zobrazeny v tabulce 3.

$$M_r = J_{red_0} \cdot \varepsilon_0 = J_{red_0} \cdot \frac{\omega_0}{t} = J_{red_0} \cdot \frac{2\pi \cdot n_0}{60 \cdot t} \quad (5)$$

Výkon P potřebný k urychlení všech rotujících komponent v čase rozběhu t byl vypočten ze vzorce (6). Vypočtené hodnoty byly zaneseny do tabulky 3.

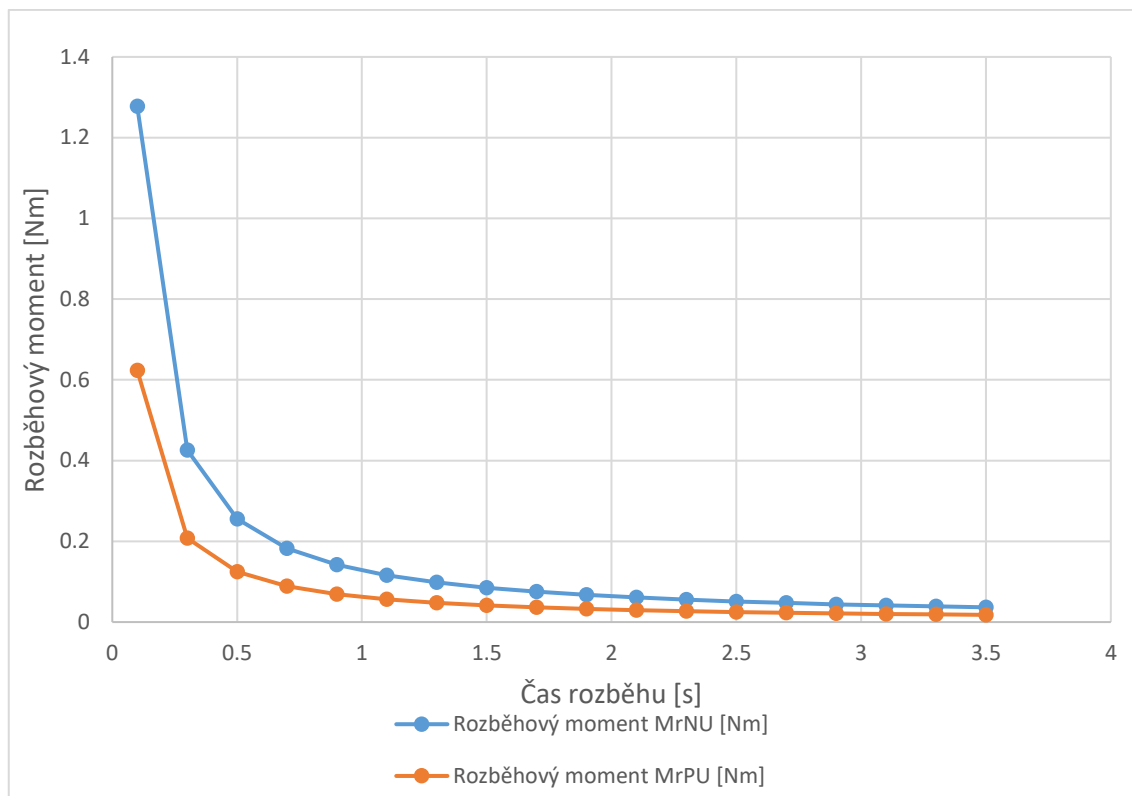
$$P = M_r \omega_0 = \frac{2\pi \cdot M_r}{60} \quad (6)$$

Tabulka 4 znázorňuje závislosti rozběhových momentů M_r a výkonů P na rozběhovém čase t pro obě varianty návrhů. Na základě vypočtených dat v tabulce 4 byl vytvořen graf 1.

Tabulka 4 - Závislosti rozběhových momentů a výkonů na čase rozběhu pro nepřímé (NU) a přímé uložení (PU)

Čas rozběhu t [s]	Rozběhový moment $M_{r_{NU}}$ [Nm]	Výkon P_{NU} [W]	Rozběhový moment $M_{r_{PU}}$ [Nm]	Výkon P_{PU} [W]
0.1	1.317268573	413.6223319	0.235278926	73.87758287
0.3	0.439089524	137.8741106	0.078426309	24.62586096
0.5	0.263453715	82.72446639	0.047055785	14.77551657
0.7	0.188181225	59.08890456	0.033611275	10.55394041
0.9	0.146363175	45.95803688	0.026142103	8.208620319
1.1	0.119751688	37.60203018	0.021388993	6.716143898
1.3	0.101328352	31.81710246	0.018098379	5.68289099
1.5	0.087817905	27.57482213	0.015685262	4.925172192
1.7	0.077486387	24.33072541	0.013839937	4.345740169
1.9	0.069329925	21.76959642	0.012383101	3.888293836
2.1	0.062727075	19.69630152	0.011203758	3.517980137
2.3	0.057272547	17.98357965	0.010229519	3.212068821
2.5	0.052690743	16.54489328	0.009411157	2.955103315
2.7	0.048787725	15.31934563	0.008714034	2.736206773
2.9	0.045423054	14.26283903	0.008113066	2.547502858
3.1	0.042492535	13.34265587	0.007589643	2.383147835
3.3	0.039917229	12.53401006	0.007129664	2.238714633
3.5	0.037636245	11.81778091	0.006722255	2.110788082

V grafu 1 je znázorněna závislost rozběhového momentu M_r na čase rozběhu t . Při pohledu na graf je patrné, že při rostoucím čase rozběhu t klesá hyperbolicky rozběhový moment M_r . Graf 1 zobrazuje dvě křivky, modrá křivka značí rozběhový moment zařízení s nepřímým uložením hřídele $M_{r_{NU}}$, a oranžová rozběhový moment zařízení s přímým uložením $M_{r_{PU}}$. Rozběhový moment pro nepřímou variantu uložení je vyšší, neboť je třeba urychlit více těles, než v případě přímé varianty.



Graf 1 - Závislost rozběhového momentu na času rozběhu

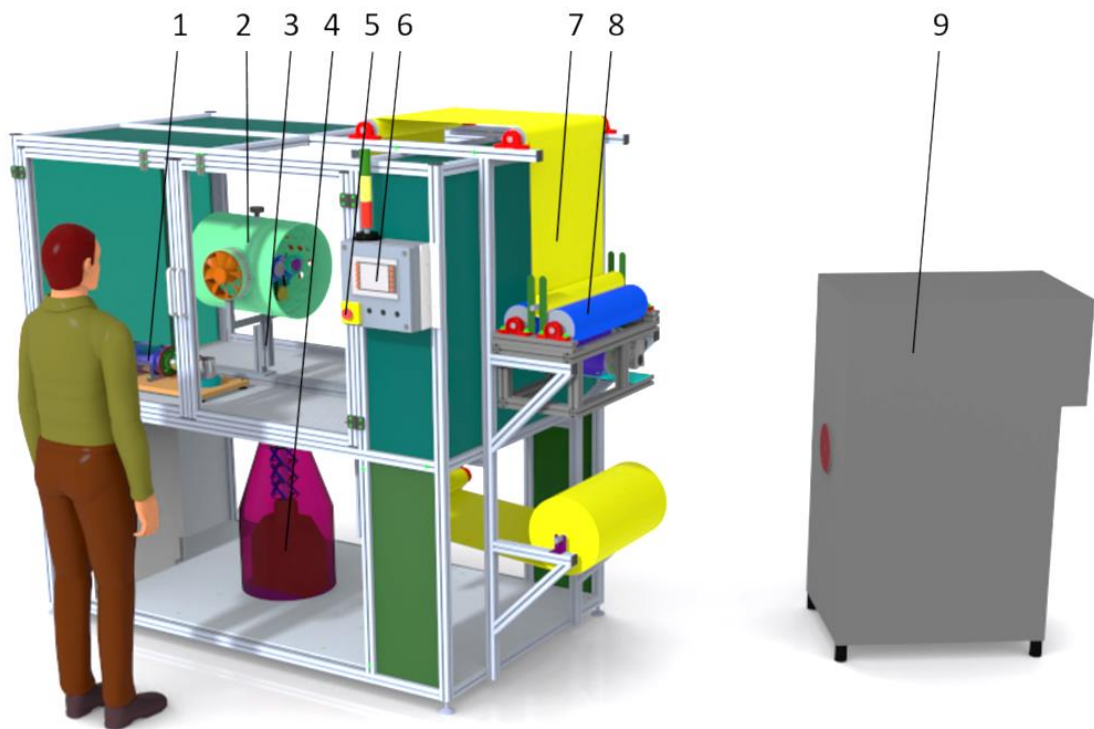
Bylo zjištěno, že motor ATAS FT4C52R používaný k pohonu funkčním modelem byl vhodně vybrán. Proto bude použit i pro pohon nového zařízení. Oproti většině asynchronních motorů dosahujících maximálně cca $n = 3000 \text{ ot/min}$ má tu výhodu, že dosahuje až $n = 24000 \text{ ot/min}$ při frekvenci $f = 400 \text{ Hz}$. Vybraný motor poskytuje dostatečný výkon $P = 500 \text{ W}$ i včetně výkonové rezervy.

5.2 Laboratorní zařízení

V rámci této diplomové práce bylo navrženo poloautomatické laboratorní zařízení, obsahující elektrodstředivé zařízení. V této kapitole bude laboratorní zařízení představeno, a následně budou popsány jednotlivé konstrukční uzly.

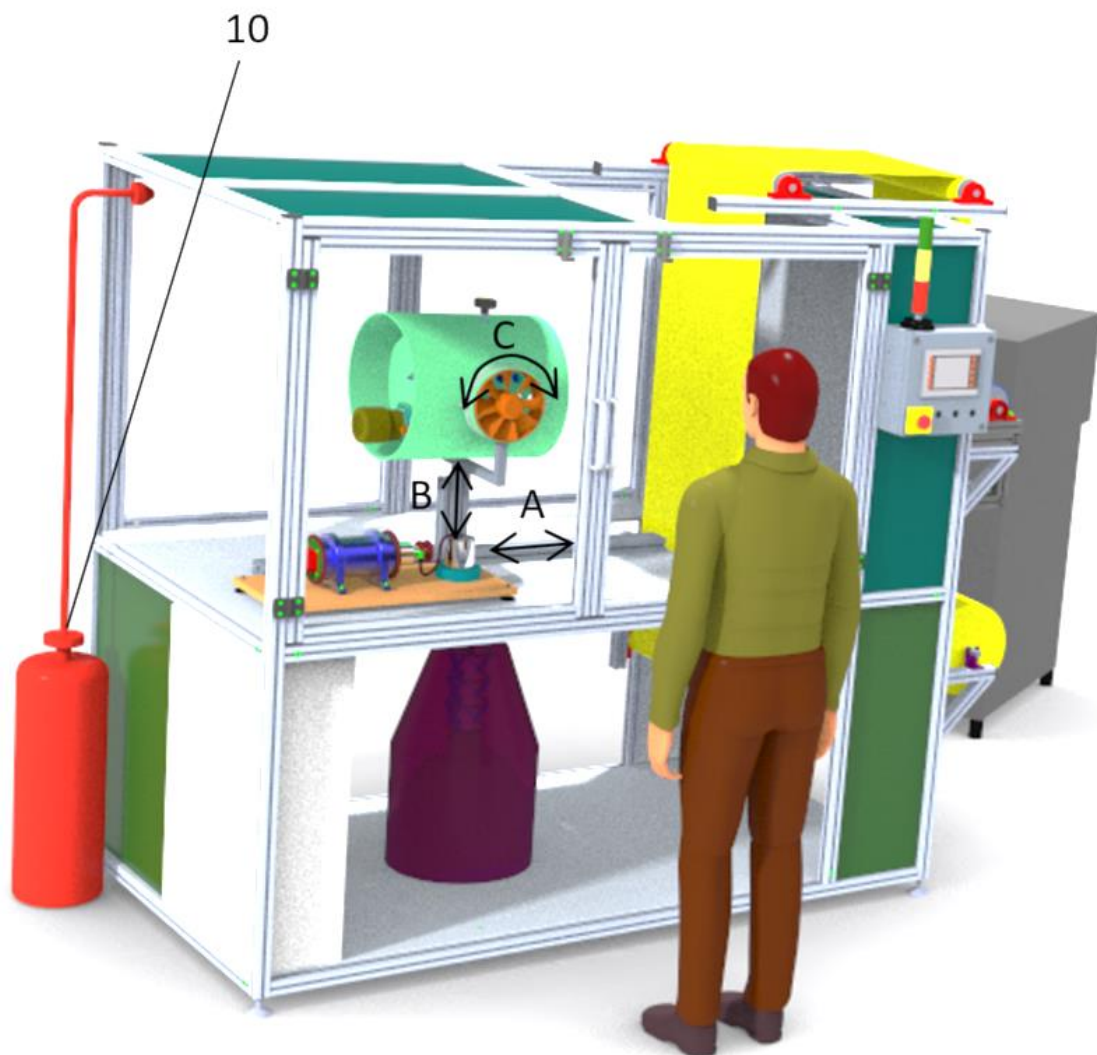
5.2.1 Kompletní laboratorní zařízení

Na obrázku 64 je zachyceno laboratorní zařízení, včetně elektrodstředivého zařízení. Pro lepší viditelnost bylo skryto krytování ve spodní části zařízení.



Obrázek 64 - Celkové laboratorní zařízení s obsluhou, (1) čerpací jednotka, (2) elektroodstředivé zvlákňování, (3) nastavitelný stojan, (4) ovládací panel, (5) tlačítko total stop, (6) vysokonapěťový transformátor, (7) podkladová textilie, (8) navíjecí zařízení, (9) vysokonapěťový zesilovač

Elektroodstředivé zařízení pracuje s nebezpečným vysokým napětím, proto byl navržen rám z hliníkových profilů, do něhož je zařízení umístěno. Dveře byly vybaveny bezpečnostními zámky. Pro zvýšení bezpečnosti při práci se zařízením byl rám vybaven automatickým hasicím systémem (pozice 10 na obrázku 65) a tlačítkem total stop (5). Základním zdrojem elektrického napětí je vysokonapěťový transformátor (6), s možností připojení vysokonapěťového zesilovače Trek 50/12 (9), který umožňuje modifikaci průběhů signálů vysokého napětí. Čerpací jednotka (1) zajišťuje dopravu polymerního roztoku. Elektroodstředivé zvlákňovací zařízení (2) je upevněno ke stojanu (3). Stojan je navržen tak, aby bylo možné zvlákňovací zařízení libovolně posouvat v axiálním směru (A), vertikálním směru (B), a lze ho také naklápět kolem horizontální osy (C). Vlákna jsou nanášena na podkladovou textilii (7), která je převíjena stoupavým navíječem (8). Zařízení lze ovládat přes ovládací panel (4) s dotykovou obrazovkou.

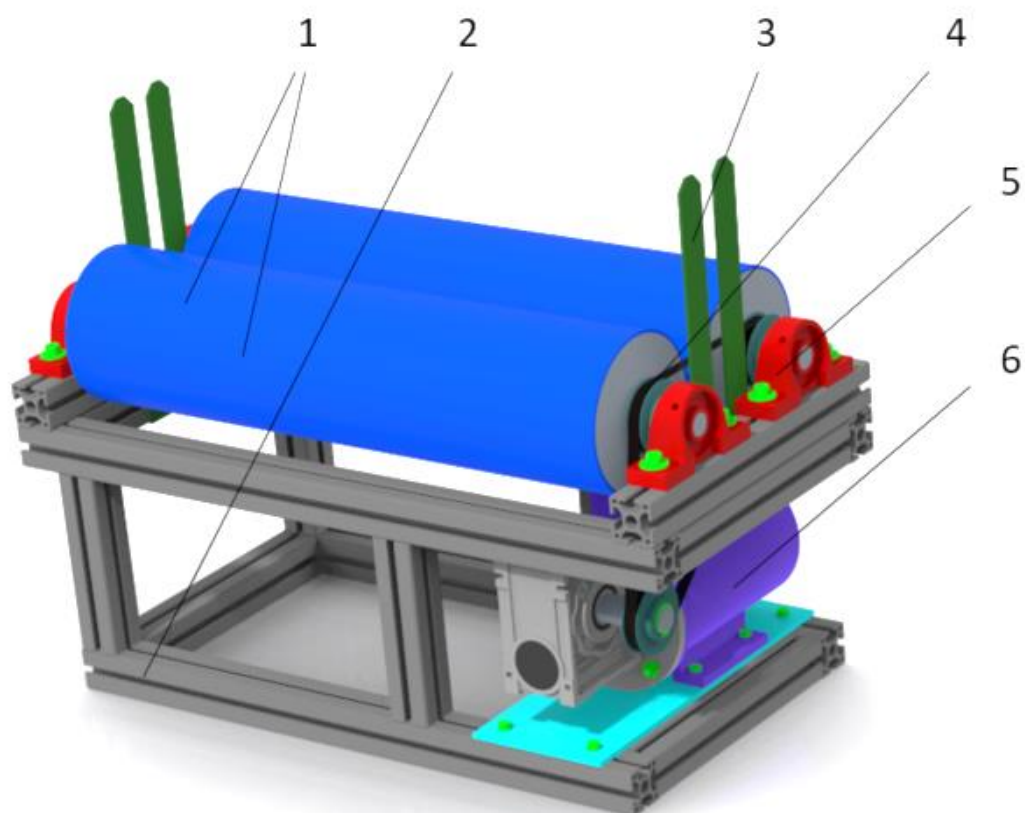


Obrázek 65 - Celkové laboratorní zařízení s obsluhou, (10) automatický hasící systém, šipky (A), (B) a (C) vyznačují směry, ve kterých lze posouvat a natáčet elektroostředivé zařízení dle potřeby

5.2.2 Převíjecí systém

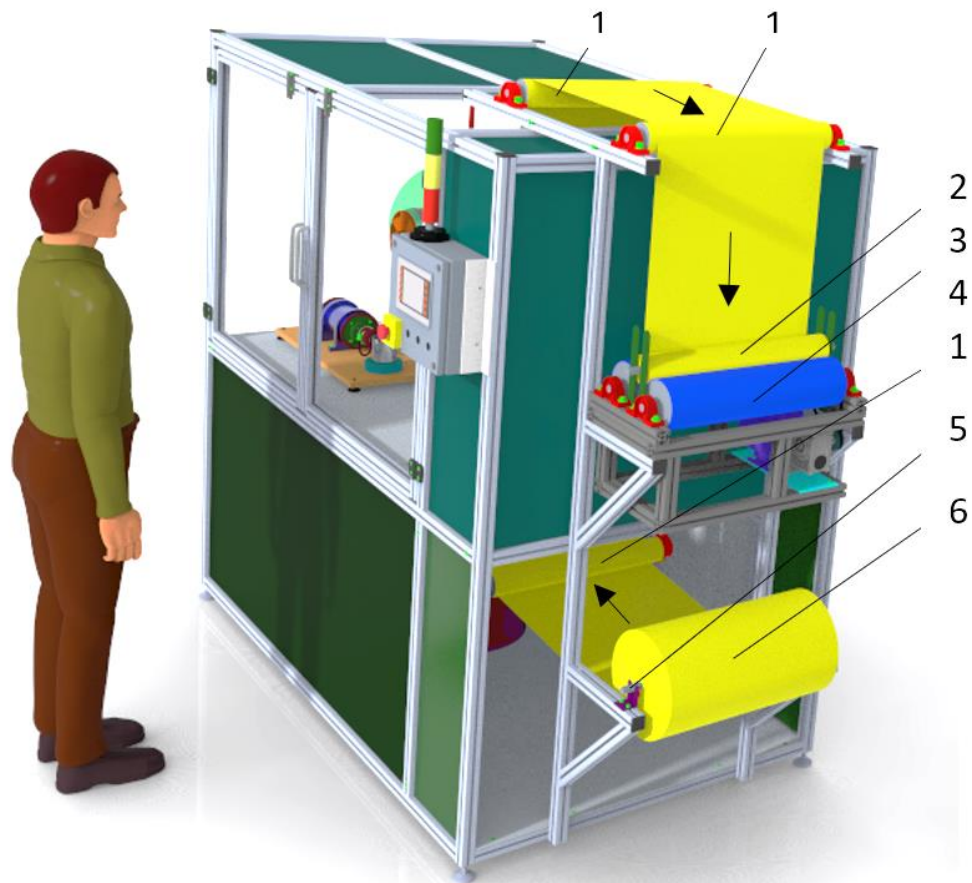
Pro další zpracování vyrobené nanovlákněné vrstvy je nutné její vhodné uložení. Proto bude v následné kapitole popsán návrh vhodného převíjecího systému.

Pro navíjení byl především pro svou jednoduchost použit stoupavý (obvodový) navíječ znázorněný na obrázku 66. Rám navíječe (2) se skládá z hliníkových profilů. Ve vrchní části jsou v ložiskových domcích (5) uloženy dva navíjecí válce (1), na nichž je nanášena protiskluzová vrstva. Oba válce jsou poháněny přes ozubený řemen (4) asynchronním motorem se šnekovou převodovkou (6). Vodicí lišty (3) zajišťují správnou polohu vložené dutinky vůči navíjecím válcům.



Obrázek 66 - Stoupavý navíječ, (1) navíjecí válce s protiskluzovou vrstvou, (2) rám, (3) vodící lišta, (4) ozubený řemen, (5) ložiskový domek, (6) asynchronní motor se šnekovou převodovkou

Na obrázku 67 je ukázáno kompletní převíjecí systém implementovaný na laboratorním zařízení. Podkladová textilie (2) je převíjena ve směru šípek ze vstupního návinu (6) na dutinku (3) umístěnou ve vodících lištách stoupavého navíječe (4). Osa vstupního návinu (5) je bržděna integrovanou brzdou, kterou lze nastavovat předpětí podkladové textilie uvnitř zařízení. Vedení textilie uvnitř stroje zajišťují tři vodící válce (1).



Obrázek 67 – Implementovaný převijecí systém, (1) vodící válce, (2) podkladová textilie, (3) dutinka s navinutou textilií, (4) stoupavý navíječ, (5) osa vstupního návinu s integrovanou brzdou, (6) vstupní návin

Při zahájení navíjecího cyklu je do vodících lišt mezi válci umístěna prázdná dutinka. Na začátek navíjecího zařízení je umístěn vstupní návin s netkanou textilií. Obsluha následně zavede textilii ze vstupního návinu přes vodící válce navíjecího zařízení, a textilii přichytí na prázdnou dutinku. Poté je navíjecí zařízení uvedeno do provozu spuštěním motoru. Dutinka je po obvodu roztáčena navíjecími válci, a tím dochází k převíjení textilie ze vstupního návinu na dutinku.

Výhodou obvodového navíjení oproti středovému je konstantní obvodová rychlost při změně průměru stoupavého válce. S přibývajícím návinem se totiž mění průměr stoupavého válce. Osa dutinky mezi vodícími lištami stoupá, proto se tomuto navíječi přezdívá stoupavý.

5.2.3 Princip dopravy polymerního roztoku

Pro dopravu polymerního roztoku byla v nově navrženém řešení využita čerpací jednotka popsaná v kapitole 2.2.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl konstrukční návrh hybridní zvlákňovací jednotky kombinující metody forcespinning a AC electrospinning.

První část práce se věnuje rešerši různých způsobů výroby nanovláknenných struktur. Součástí rešerše je podrobnější popis technologie odstředivého zařízení s axiálním výstupem nanovláken.

Druhá část práce je zaměřena na modifikaci konceptu odstředivého zařízení na zařízení kombinující metody forcespinning a AC electrospinning. Bylo nutné zajistit dostatečnou izolaci mezi motorem a zvlákňovací hlavou. V rámci modifikace byl zvolen vhodný čerpací systém pro dopravu polymerního roztoku. V softwaru Ansys Electronics Desktop 2020 byla provedena analýza elektrického pole v okolí spinnerety, která ověřila možnost použití výchozího tvaru zvlákňovací hlavy, navržené pro odstředivé zvlákňování.

V následující části bylo uvedené elektroodstředivé zařízení verifikováno s kladným výsledkem. Vyrobené nanovláknenné struktury byly analyzovány elektronovým mikroskopem (SEM). Na základě SEM snímků byly vytvořeny histogramy vztahující se k získaným strukturám. Posouzení produktivity prokázalo, že kombinací forcespinningu a AC electrospinningu lze dosáhnout produktivity až o 74% vyšší, ve srovnání s odstředivým zvlákňováním.

V poslední části práce byly uvedeny čtyři typy konstrukčních variant elektroodstředivého zařízení, z nichž byla vybrána vhodná varianta řešení. V rámci práce byla navržena koncepce poloautomatického laboratorního zařízení pro výrobu plošné nanovláknenné struktury prostřednictvím elektroodstředivého zvlákňování.

Z výsledků diplomové práce je zřejmé, že úspěšná kombinace střídavého vysokého napětí a odstředivého zvlákňování s axiálním výstupem vláken je perspektivní a robustní technologie. Je doporučen další konstrukční a technologický vývoj. Bylo by vhodné provést v rámci dalších testů rozsáhlé technologické zkoušky, které by měly vyústit v sestavení jistého katalogu procesních parametrů zařízení pro různé polymery a různé rozpouštědlové systémy.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Proces výroby nanovlákná pomocí technologie dloužení [1]	13
Obrázek 2 - Schéma technologie melt blowing [2]	13
Obrázek 3 – Detail zvlákňovací trysky [4]	14
Obrázek 4 - Výroba nanovláken pomocí technologie melt blowing [3].....	14
Obrázek 5 - Schéma procesu samoorganizování [4]	14
Obrázek 6 – Schéma procesu šablonové syntézy [4].....	15
Obrázek 7 - Schéma metody fázové separace [4].....	16
Obrázek 8 - Princip technologie DC electrospinning [6]	17
Obrázek 9 – Vícejehlová elektroda [7]	18
Obrázek 10 – Válcová elektroda [9]	19
Obrázek 11 – Strunová elektroda [12]	20
Obrázek 12 – Výsledný produkt AC electrospinningu - kompaktní nanovláknenná vlečka se kterou lze dále manipulovat [13].....	21
Obrázek 13 - Vznikající vlákna dloužená z povrchu kapky roztoku [14]	22
Obrázek 14 – Bodová elektroda s kuželovou přeplavovací hlavou, (1) pohonná jednotka, (2) zvlákňovací nádoba [13]	23
Obrázek 15 – Rozložení intenzity elektrického pole v okolí bodové elektrody [16]	23
Obrázek 16 - Disková elektroda [8].....	24
Obrázek 17 – Rozložení elektrické intenzity v okolí diskové elektrody [8]	24
Obrázek 18 - Zařízení využívající strunovou elektrodu ve střídavém elektrickém poli [17]	25
Obrázek 19 – Schema tryskového odstředivého zvlákňování, Zařízení Cyclone™ FE 1.1 vyvinuté firmou FibeRio [18]	26

Obrázek 20 - Schematický nákres bezjehlového odstředivého zařízení [21]	27
Obrázek 21 - Výchozí odstředivé zařízení s axiálním výstupem.....	28
Obrázek 22 – Schématické znázornění DC elektroodstředivého systému, (A) osa rotace, (C) hrot trysky, (D) zvlákňovací hlava, (E) kolektor, (F) nanovláknenné tryska [22]	29
Obrázek 23 - Původní zvlákňovací jednotka pro odstředivé zvlákňování, (1) motor, (2) vedení umožňující axiální posun, (3) dávkovací trubička, (4) skelet jednotky, (5) řemen, (6) vodivý ložiskový domek, (7) ventilátor, (8) kuželová hlava (spinnereta)	30
Obrázek 24 - Vnější plášť zařízení s příslušenstvím,(1) potrubní ventilátory, (2) přepážka s vodícími drážkami, (3) vnitřní plášť, (4) vnější plášť	31
Obrázek 25 – Model elektroodstředivého zařízení, provedené úpravy na funkčním vzorku jsou označeny pozicemi, (1) příruba motoru, (2) prodloužené vedení, (3) izolační představec, (4) ložiskové pouzdro, (5) ložiskový domek, (6) řemenice.....	32
Obrázek 26 - Detailní řez spinneretou, (A) přípojný bod pro dopravu roztoku, (B) přípojný bod ke zdroji vysokého napětí, (C) zvlákňovací oblast, oranžové šipky znázorňují trasu roztoku	33
Obrázek 27 - Jednotka upravená pro elektroodstředivé zvlákňování	33
Obrázek 28 - Lineární pumpa s izolačním představcem, (1) výtlačná hadička, (2) svorka pro uchycení injekční stříkačky (izolačního představce), (3) injekční stříkačka, (4) izolační představec, (5) tlačný blok, (6) lineární pumpa	34
Obrázek 29 - Čerpací jednotka v řezu, (1) kádinka s polymerem, (2) sací hadička čerpadla, (3) zubové čerpadlo, (4) magnetická spojka, (5) ložiskový domek s ložiskem, (6) izolační hřídel, (7) svařenec, (8) flexibilní hřídelová spojka, (9) příruba motoru, (10) krokový motor, (11) základní deska	35

Obrázek 30 – Osově symetrický model vzduchového okolí elektrody, (1) osa symetrie, (2) zvlákňovací elektroda, (3) virtuální kolektor	36
Obrázek 31 - Výpočetní model včetně sítě a okrajových podmínek, (A) oblast zájmu, ve které je síť zjemněna	37
Obrázek 32 - Rozložení napětí v okolí spinnerety.....	37
Obrázek 33 - Rozložení elektrické intenzity v okolí spinnerety, (A) detail zvlákňovací oblasti - rozložení elektrické intenzity v okolí hrany spinnerety, kumulace intenzity ve zvlákňovací oblasti	38
Obrázek 34 - Zjednodušený model hnací jednotky modifikovaného zařízení, (1) řemenice, (2) ložiskové pouzdro, (3) ložiskový domek, (4) izolační nástavec, (5) motor, (Z) osa symetrie Z.....	39
Obrázek 35 – Výsledky analýz elektrického pole, vlevo - rozložení napětí v okolí hnací jednotky, vprostřed - rozložení elektrické intenzity v okolí hnací jednotky, (A) a (B) kritické oblasti s vysokou elektrickou intenzitou, vpravo – detail kritické oblasti (A)..	40
Obrázek 36 – Výsledky analýzy po vytvoření koronových prstenců, vlevo – rozložení napětí, vprostřed – rozložení elektrické intenzity, (1) a (2) přidané koronové prstence, vpravo – detail kritické oblasti B	41
Obrázek 37 – Použité polymerní roztoky, 12% roztok PVB a 16% roztok PVA.....	42
Obrázek 38 - Testovací aparatura. Zleva - zvlákňovací box, upravené elektrodostředivé zařízení, čerpací jednotka	43
Obrázek 39 - Čerpací jednotka včetně příslušenství, (1) sací hadička, (2) zásoba polymerního roztoku, (3) výtlačná hadička, (4) zubové čerpadlo, (5) čerpací jednotka, (6) krokový motor.....	43
Obrázek 40 – Radiální cesty polymerního roztoku a nánosy na zvlákňovací hlavě.....	44

Obrázek 41 - Přivedení stlačeného vzduchu otvory v ložiskovém domku pro lepší odvod vlečky.....	45
Obrázek 42 - Kompaktní nanovláknenná vlečka po odladění systému	46
Obrázek 43 – Sběr vzorků pro rastrovací elektronový mikroskop	47
Obrázek 44 - Snímky vzorků PVA a PVB při napětích od amplitudy 0 V (odstředivý režim bez účinků elektrických sil) do 50 kV	48
Obrázek 45 - Histogramy vytvořené pro jednotlivé vzorky PVB a PVA při různých napětích.....	49
Obrázek 46 - Vážení nanosené nanovláknenné vrstvy včetně perlíčky.....	50
Obrázek 47 – Řez první variantou návrhu – přímé uložení hřídele spinnerety, axiální uspořádání, (1) axiální ventilátor, (2) motor, (3) hřídelová spojka, (4) izolační nástavec, (5) ložiskový domek, (6) ložiskové pouzdro, (7) přípojný bod, (8) těsnicí desky s gufery,(9) axiální kanál v hřídelce ložiskového pouzdra, (10) spinnereta.....	53
Obrázek 48 – První varianta návrhu – přímé uložení hřídele spinnerety, axiální uspořádání	54
Obrázek 49 – Nepřímé uložení rotoru dopřádacího stoje [24]	55
Obrázek 50 - Řez hnací jednotkou, (1) motor, (2) koronový prstenec, (3) redukce, (4) pružná spojka, (5) izolační nástavec, (6) koronový prstenec, (7) ložiskové pouzdro, (8) rám, (9) ložiskový domek, (10) řemenice	56
Obrázek 51 – Řez jednotkou nepřímého uložení s dutou hřídelí spinnerety, (1) skelet jednotky, (2) ložisko 607 zachycující axiální reakci, (3) osazení, (4) dutá trubka,(5) třecí segment/řemenice, (6) podpěra držící dýzu, (7) dýza, (8) zátka zamezující úniku roztoku, (9) stírací element, (10) spinnereta	56

Obrázek 52 – Jednotka nepřímého uložení s hřídelí spinnerety, (A) a (B) osy rotací podpůrných kotoučů, (C) osa rotace kyvného uložení, (11) šroubení pro připojení tlakového vzduchu, (12) pár podpůrných kotoučů, (13) tělo nepřímého uložení.....	57
Obrázek 53 - Řez druhou variantou návrhu - nepřímé uložení, třecí převod, (1) sestava hřídele spinnerety, (2) dýza, (3) podpůrné kotouče jednotky nepřímého uložení, (4) sekundární třecí kotouč, (5) primární třecí kotouč, (6) rýhovaná matice, (7) hnací jednotka, (8) dávkovací trubička	58
Obrázek 54 – Druhá varianta návrhu – nepřímé uložení, převod třecím kotoučem, (9) lineární vedení.....	59
Obrázek 55 - Třetí varianta – nepřímé uložení, řemenový převod s hnací jednotkou mimo plášť, (1) vnější plášť, (2) jednotka nepřímého uložení, (3) kuličkový výsuv, (4) přepážky pro upevnění výsuvu, (5) šroub s rýhovanou hlavou, (6) hnací jednotka.....	60
Obrázek 56 - Řez finální variantou návrhu, (1) sestava hřídele spinnerety, (2) vnější plášť, (3) jednotka nepřímého uložení, (4) řemenový převod, (5) dávkovací trubička, (6) hnací jednotka, (7) přípojný bod	61
Obrázek 57 - Finální varianta návrhu, (8) matice nastavující předpětí řemene, (9) axiální ventilátory, (10) lineární vedení.....	62
Obrázek 58 - Model konzoly s okrajovými podmínkami, (1) síla F_1 od závitové tyče, (2) síla předpětí řemene F_0 , (3) vazby konzoly v prostoru, umožněna pouze rotace kolem osy (A).....	63
Obrázek 59 – Rozložení napětí von Mises na konzole, jednotky legendy [MPa], oblast s nejvyšší hodnotou napětí v detailu	64
Obrázek 60 - Rozložení posunutí uzlů na konzole [mm]	64
Obrázek 61 – Kuličkový celovýsuv	65

Obrázek 62 - Lineární posuv HEYMAN DFG115	66
Obrázek 63 - Nákres rotujících komponent varianty nepřímého uložení (barevně), komponenty varianty přímého uložení jsou označeny tmavě zelenou barvou, pozicemi J ₀₋₈ označeny momenty setrvačností jednotlivých komponent, n ₀₋₂ jsou označeny otáčky jednotlivých hřídelí	67
Obrázek 64 - Celkové laboratorní zařízení s obsluhou, (1) čerpací jednotka, (2) elektroodstředivé zvlákňování druhé generace, (3) nastavitelný stojan, (4) ovládací panel, (5) tlačítko total stop, (6) vysokonapěťový transformátor, (7) podkladová textilie, (8) navíjecí zařízení, (9) vysokonapěťový zesilovač.....	71
Obrázek 65 - Celkové laboratorní zařízení s obsluhou, (10) automatický hasicí systém	72
Obrázek 66 - Stoupavý navíječ, (1) navíjecí válce s protiskluzovou vrstvou, (2) rám, (3) vodící lišta, (4) ozubený řemen, (5) ložiskový domek, (6) asynchronní motor se šnekovou převodovkou	73
Obrázek 67 – Implementovaný převíjecí systém, (1) vodící válce, (2) podkladová textilie, (3) dutinka s navinutou textilií, (4) stoupavý navíječ, (5) osa vstupního návinu s integrovanou brzdou, (6) vstupní návin	74

SEZNAM LITERATURY

- [1] PATIL, Jyoti V., Sawanta S. MALI, Archana S. KAMBLE, Chang K. HONG, Jin H. KIM a Pramod S. PATIL. Electrospinning: A versatile technique for making of 1D growth of nanostructured nanofibers and its applications: An experimental approach. *Applied Surface Science* [online]. 2017, **423**, 641–674. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2017.06.116
- [2] STRÁNSKÁ, Denisa. *Nanovláknenné membrány jako nosiče léčiv*. B.m., 2018. Univerzita Karlova v Praze.
- [3] *Melt-blown* [online]. 2023 [vid. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Melt-blown&oldid=22501417>
- [4] ZHANG, Xiangwu a Yao LU. Centrifugal Spinning: An Alternative Approach to Fabricate Nanofibers at High Speed and Low Cost. *Polymer Reviews* [online]. 2014, **54**(4), 677–701. ISSN 1558-3724. Dostupné z: doi:10.1080/15583724.2014.935858
- [5] JANEČEK, Tomáš. *Zvlákňovací elektroda pro výrobu plošného nanovláknenného materiálu*. Liberec, 2021. Technická univerzita v Liberci.
- [6] R.O, ASIO, spol s. Aplikace nanotechnologií ve vodním hospodářství. *ASIO, spol. s r.o.* [online]. [vid. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/361.aplikace-nanotechnologii-ve-vodnim-hospodarstvi>
- [7] Yflow® Coaxial Electrospinning Multi-Nozzle Device. *Yflow S.D.* [online]. [vid. 2021-06-06]. Dostupné z: http://www.yflow.com/services/custom_devices/
- [8] FRIEDRICH, Ondřej. *Optimalizace zvlákňovacího zařízení s diskovou elektrodou*. B.m., 2020. Technická univerzita v Liberci.
- [9] SOUČEK, Jiří. *Zvlákňovací elektroda pro výrobu směšového nanovláknenného materiálu*. Liberec, 2017. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [10] LIBERCI, Technická univerzita v. Příběh světové expanze nanovláken začal právě před 15 lety psát tým profesora Jirsáka. *T-uni* [online]. [vid. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://tuni.tul.cz/rubriky/udalosti/id:104576/pribeh-svetove-expanze-nanovlaken-zacal-prave-pred-15-lety-psat-tym-profesora-jirsaka->
- [11] ELMARCO, S. R. O., LIBEREC, CZ. Způsob zvlákňování kapalně matrice, zařízení pro výrobu nanovláken elektrostatickým zvlákňováním kapalně matrice a zvlákňovací elektroda pro takové zařízení. 2007–485.
- [12] [HTTP://WWW.UVM.CZ](http://WWW.UVM.CZ), UVM interactive. NS Technologie. *Elmarco CZ* [online]. [vid. 2021-06-07]. Dostupné z: <https://www.elmarco.cz/ns-technologie>
- [13] VALTERA, Jan, Tomáš KALOUS, Pavel POKORNÝ, Ondřej BAŤKA, Martin BÍLEK, Jiří CHVOJKA, Petr MIKES, Eva KOSTAKOVA, Petr ŽABKA, Jana ORNSTOVÁ, Jaroslav BERAN, Andrei STANISHEVSKY a David LUKAS.

- Fabrication of dual-functional composite yarns with a nanofibrous envelope using high throughput AC needleless and collectorless electrospinning. *Scientific Reports* [online]. 2019, **9**, art.#1801. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-019-38557-z
- [14] POKORNY, P., E. KOSTAKOVA, F. SANETRNIK, P. MIKES, J. CHVOJKA, T. KALOUS, M. BILEK, K. PEJCHAR, J. VALTERA a D. LUKAS. Effective AC needleless and collectorless electrospinning for yarn production. *Phys. Chem. Chem. Phys.* [online]. 2014, **16**(48), 26816–26822. ISSN 1463-9076, 1463-9084. Dostupné z: doi:10.1039/C4CP04346D
- [15] JÍRA, Martin. *Zvláknovací elektroda s integrovaným systémem dodávky polymerního roztoku při elektrickém zvláknování*. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [16] BAŤKA, Ondřej. *Zařízení na výrobu jádrové příze*. Liberec, 2015. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [17] SRINIVAS, Yeshwanth Balaji. *Cable electrode system for AC electrospinning technology* [online]. Liberec, 2009 [vid. 2023-05-15]. Technická univerzita v Liberci. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405160902904641>
- [18] PRIYANTO, Aan, Dian Ahmad HAPIDIN, Tri SUCIATI a Khairurrijal KHAIRURRIJAL. Current Developments on Rotary Forcespun Nanofibers and Prospects for Edible Applications. *Food Engineering Reviews* [online]. 2022, **14**(3), 435–461. ISSN 1866-7929. Dostupné z: doi:10.1007/s12393-021-09304-w
- [19] *FibeRio Debuts Cyclone™ FE 1.1 – Extrusion Group* [online]. 19. prosinec 2011 [vid. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.extrusiongroup.com/fiberio-debuts-cyclone-fe-1-1/>
- [20] *FibeRio presents Forcespinning nanofiber technology at Techtexil NA* [online]. [vid. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.innovationintextiles.com/fiberio-presents-forcespinning-nanofiber-technology-at-techtexil-na/>
- [21] POKORNÝ, Pavel. *Zařízení pro výrobu nanovláken a/nebo mikrovláken odstředivým zvláknováním roztoku nebo taveniny polymeru*.
- [22] DABIRIAN, F., S. HOSSEINI RAVANDI a A. PISHEVAR. Investigation of Parameters Affecting PAN Nanofiber Production Using Electrical and Centrifugal Forces as a Novel Method. *Current Nanoscience* [online]. 2010, **6**(5), 545–552. ISSN 15734137. Dostupné z: doi:10.2174/157341310797575078
- [23] KUSEDOVÁ, Michaela. *Studium a vyhodnocení vybraných parametrů nanovlákných vrstev vyrobených různými technologiemi*. B.m., 2023. Technická univerzita v Liberci.
- [24] ERNST, Heinz. *The Rieter Manual of Spinning*. nedatováno, **5**.

PŘÍLOHY

CD obsahující kopii bakalářské práce a výkresovou dokumentaci

Výkresová dokumentace