



# Vývoj a návrh konstrukce pro automatické zpracování nanovlakenných přízí

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení  
*Autor práce:* **Anton Krotov**  
*Vedoucí práce:* Ing. Michal Moučka, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechanical Engineering ■

# Development and design of equipment for automatic processing of nanofiber yarns

## Master thesis

*Study programme:* N2301 – Mechanical Engineering  
*Study branch:* 2302T010 – Machine and Equipment Systems  
*Author:* **Anton Krotov**  
*Supervisor:* Ing. Michal Moučka, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Anton Krotov**

Osobní číslo: **S12000450**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**

Název tématu: **Vývoj a návrh konstrukce pro automatické zpracování nanovláknenných přízí**

Zadávací katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je navržení nového experimentálního zařízení pro automatické zpracování nanovláknenných přízí. Stroj musí splňovat následující požadavky: sběr nanovláknenných přízí; formování vícevrstvého nanovláknenného výrobku a příprava na další zpracování; zajistit možnost modernizace stroje.

Doporučené metody pro vypracování:

1. Literární průzkum a seznámení se s technologií elektrostatického zvlákňování pro výrobu nanovláknenných přízí.
2. Navrhnout technologický postup na zpracování nanovláknenných přízí.
3. Na základě definovaných parametrů provést návrh konstrukce prototypu experimentálního zařízení.
4. Provést realizaci a otestování zařízení.
5. Součástí práce bude technická dokumentace nejvhodnějšího řešení a nezbytné výpočty.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **60 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] LUKÁŠ, D., A. SARKAR, L. MARTINOVÁ, K. VODSEĎÁLKOVÁ, D. LUBASOVÁ, J. CHALOUPEK, P. POKORNÝ, P. MIKEŠ, J. CHVOJKA, et al. *Physical principles of electrospinning (Electrospinning as a nano-scale technology of the twenty-first century)*. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 2009. DOI 10.1080/00405160902904641.
- [2] GUPTA, P., J. CHVOJKA, et al. *Electrospinning of linear homopolymers of poly(methyl methacrylate): exploring relationships between fiber formation, viscosity, molecular weight and concentration in a good solvent*. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005. DOI 10.1016/j.polymer.2005.04.021.
- [3] SHIGLEY, J. E., Ch. R. MISCHKE, R. G. BUDYNAS a M. VLK (ed.). *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [4] SKAŘUPA, J. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1522-0.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Moučka, Ph.D.**  
Katedra výrobních systémů a automatizace

Konzultant diplomové práce: **Ing. Andrii Shynkarenko**  
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání diplomové práce: **15. března 2016**  
Termín odevzdání diplomové práce: **15. června 2017**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. března 2016

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, 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 (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Chtěl bych na tomto místě poděkovat svému školiteli, panu doktorovi Ing. Michalu Moučkovi, PhD. za odborné vedení a připomínky k problematice, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.

V neposlední řadě bych rád poděkoval kolegům (zejména Ing. Andrea Klapšťová) za součinnost při experimentech i za cenné rady, a dále rodině, která mi byla celou dobu velkou oporou.

Dále bych chtěl poděkovat projektu SGS 21070 Vývoj zařízení pro výrobu nanovlákných přízí a jejich optimalizace pro oftalmologické implantáty a projektu SGS 21183 Vývoj dávkovacího zařízení polymerů pro výrobní systém nanovlákných přízí, protože tyto projekty umožnily výrobu a stavbu zařízení, jeho testování a uhradily veškeré finanční náklady. Děkuji vedoucímu SGS projektu, Ing. Andrii Shynkarenkovi, jenž byl současně i mým konzultantem.

## **Anotace**

Diplomová práce je zaměřena na návrh mikromanipulátoru na výrobu vícevrstevných nanovlákných přízí z nanovláken. Navržený stroj je dílčí částí výrobní linky obsahující zařízení na výrobu nanovláken metodou dloužení a metodou elektrostatického zvlákňování. Popis celého výrobního procesu včetně možných modernizací je součástí této práce. Mikromanipulátor používá jako osu pro budoucí příze nanovláknem vyrobené pomocí metody dloužení, sbírá nanovláknem vyrobené metodou elektrostatického zvlákňování pomocí kartáčů, poté je svazek nanovláken zkroucen do příze.

Diplomová práce obsahuje popis procesu výroby mikromanipulátoru, jehož funkčnost byla následně ověřena. Také je v práci uvedeno předpokládané uspořádání výrobní linky, do které bude tento stroj umístěn.

**Klíčová slova:** nanovláknem, nanopříze, elektrostatické zvlákňování, mikromanipulátor, návrh

## **Annotation**

The master's thesis aims to design of micromanipulator for production of multilayer nanofiber yarns from nanofibers. The designed device is the part of a production line that contains equipment for production of nanofibers using methods of drawing and electrospinning. Description of entire production process, including possible improvements, is the part of this thesis. Micromanipulator uses a nanofiber, which was produced using the method of drawing, as an axis for a yarn. Then it collects nanofibers, which was produced using the method of electrospinning, and afterwards it twists a sheaf of nanofibers into a yarn.

The master's thesis contains description of a production process of the micromanipulator. Its functionality was then successfully tested. Also a possible layout of the production line, that includes designed micromanipulator, is described in this thesis.

**Keywords:** nanofiber, nanoyarn, elektrospinning, micromanipulator, design



## Obsah

Seznam symbolů.....	10
Úvod.....	14
1 Elektrostatické zvlákňování.....	15
2 Technologický postup na zpracování nanovláknenných přízí.....	20
3 Návrh výrobní linky.....	22
3.1 Zařízení na elektrostatické zvlákňování.....	24
3.2 Mikromanipulátor.....	28
3.2.1 Koncepce.....	28
3.2.2 Popis jednotlivých technologických operací.....	29
3.2.3 Návrh možných řešení manipulace.....	35
3.2.4 Popis mikromanipulátoru.....	36
3.2.5 Návrh dávkovacího zařízení.....	52
4 Ověření funkčnosti, testování zařízení.....	60
Závěr.....	62
Seznam použité literatury.....	63
Seznam příloh.....	66

## Seznam symbolů

$U$	napětí, rozdíl potenciálu
$\omega_{kr}$	úhlová rychlost pootočení kartáčů
$v_{kr}$	rychlost přímočarého pohybu kartáčů
$v_p$	rychlost přímočarého pohybu
$v_s$	rychlost svislého pohybu
$\omega_R$	úhlová rychlost pootočení stolu
$\omega_k$	úhlová rychlost pootočení kolektoru
$v$	maximální rychlost posuvu pístu stříkačky
$i$	převodové číslo
$\beta$	úhel uložení
$V_I$	objem dávkované kapaliny na jednu otáčku elektromotoru
$v_B$	běžná rychlost posuvu pístu stříkačky
$Q_V$	maximální průtok kapaliny
$Q$	průtok kapaliny
$A$	plocha pístu stříkačky
$c$	celkový zdvih stříkačky
$h$	stoupání šroubu
$n_1$	číslo otáček ozubeného kola 1
$n_2$	číslo otáček ozubeného kola 2
$n_S$	číslo otáček šroubu
$n_{max}$	maximální otáčky elektromotoru
$n_M$	otáčky elektromotoru
$n_B$	běžné otáčky elektromotoru
$M_{max}$	maximální moment motoru
$M_S$	moment na šroubu
$P_{max}$	maximální výkon elektro motoru
$P_M$	výkon předávaný elektromotorem
$P_Z$	výkon předávaný ozubeným převodem
$P_S$	výkon předávaný šroubovým převodem
$P_T$	příkon stříkačky
$\eta_z$	účinnost ozubeného převodu
$\eta_S$	účinnost šroubového převodu
$\eta_T$	účinnost ve vedení a na stříkačce

$k$	koeficient bezpečnosti
$P_o$	výkon elektromotoru
$F_T$	síla působena tlakem na stříkačce
$F_S$	síla působící na šroub
$F_a$	axiální síla ve převodu
$M_M$	moment předaný motorem
$M_1$	moment přenášený ozubeným kolem 1
$M_2$	moment přenášený ozubeným kolem 2
$M_0$	moment motoru
$V_S$	objem stříkačky
$m_z$	hmotnost zátěže
$g$	gravitační konstanta
$t$	čas dobíjení stříkačky
$l_0$	délka šroubu
$i_{in}$	požadovaný převodový poměr
$m$	modul
$\beta_s$	úhel sklonu
$\alpha$	úhel profilu
$a_w$	vzdálenost os
$a$	roztečná vzdálenost os
$\Sigma x$	celková jednotková korekce
$p$	rozteč zubů
$p_{tb}$	základní rozteč
$\alpha_w$	provozní úhel záběru
$\varepsilon$	součinitel trvání záběru
$f_x, f_y$	mezní úchylka rovnoběžnosti os
$z$	počet zubů
$x$	jednotkové posunutí
$d$	průměr roztečné kružnice
$d_a$	průměr hlavové kružnice
$d_f$	průměr patní kružnice
$d_b$	průměr základní kružnice
$d_w$	pracovní roztečný průměr
$b$	šířka ozubení

$b_r$	šířkový poměr
$a^*$	výška hlavy zubu
$c^*$	hlavová vůle
$r_f^*$	zaoblení paty
$s$	tloušťka zubu
$s_t$	čelní tloušťka zubu
$t_c$	tloušťka zubu na tětivě
$a_c$	výška hlavy zubu nad tětivou
$B_m$	rozměr přes zuby
$z_w$	rozměr přes zuby
$M$	rozměr přes válečky (kuličky)
$d_M$	průměr válečku (kuličky)
$F_\beta$	mezní úchylka sklonu zubu
$F_r$	mezní obvodové házení ozubení
$f_{pt}$	mezní úchylka čelní rozteče
$f_{pb}$	mezní úchylka základní rozteče
$z_v$	náhradní počet zubů
$d_n$	virtuální roztečný průměr
$d_{an}$	virtuální hlavový průměr
$d_{bn}$	virtuální průměr základní kružnice
$x_z$	jednotková korekce bez zúžení
$x_p$	jednotková korekce bez podříznutí
$x_d$	jednotkové posunutí s dovol. podříznutím
$k_z$	snížení hlavy zubu
$s_a$	jednotková šířka hlavy zubu
$\alpha_a$	hlavový úhel profilu
$p_o$	napětí opotřebení
$S_z$	plocha profilu závitů
$H$	výška profilu závitů
$z_m$	číslo závitů matice
$p_z$	stoupání závitů
$h_m$	výška matice
$d_1$	vnější průměr závitů matice
$d_2$	střední průměr závitů
$d_3$	průměr tělesa šroubu

$\sigma$	dovolené napětí
$\sigma_K$	mez kluzu
$\sigma_m$	napětí na tělese matici
$D$	vnější průměr tělesa matice
$N_r$	radiální síla
$d_z$	průměr závitu
$\sigma_S$	napětí v šroubu
$\sigma_o$	namáhání ohybem
$\tau_k$	namáhání krutem
$N$	síla reakce
$\sigma_U$	styčné povrchové napětí
$S$	plocha styčného povrchu
$h_s$	výška styčného povrchu
$d_S$	střední průměr
$l$	délka styčného povrchu

## Úvod

Cílem práce je návrh, výroba a testování nového experimentálního zařízení pro automatické zpracování nanovláknenných přízí. Stroj musí splnit následující požadavky: sběr nanovláknenných přízí, formování vícevrstvého nanovláknenného výrobku a příprava na jeho další zpracování a možnost budoucí modernizace stroje. To ve finále předpokládá návrh mikromanipulátoru, který realizuje jenom jednu část celkového technologického postupu výroby hotových "nanovláknenných dílů". Hlavní důraz mé diplomové práce je kladen na konstrukci zařízení, nikoliv na oživení a technologii výroby. Proto jsou informace ohledně uspořádání linky a postupu technologických operací jen orientační a slouží pouze k pochopení celkové problematiky a konstrukce manipulátoru.

Manipulátory jsou součástí výrobních řetězců a jejich vývoj zapadá do složitého evolučního procesu celého strojírenství, elektroniky a dalších oborů. Účel mého snažení je snaha vytvořit zařízení s takovým stupněm automatizace, aby nahradilo člověka v celém výrobním procesu. Ten však bude stále počítačem sledován a řízen, a to od výroby, zpracování nanovláknenných přízí až do hotového výrobku. Dojde k odstranění tzv. lidského faktoru a tím snížení chyb a mimo jiné i jasné pochopení problematiky projevu možných vad a jejich důsledků.

Diplomová práce se nezabývá detailním rozbořem řídicích prvků a návrhem softwaru, protože celkový postup výroby a konečné uspořádání pracovní linky je neznámé. Z těchto důvodů bude ovládání stroje prováděno pomocí IPC řídicích prvků a procesů (řízení na bázi PC), což poskytuje všechny výhody spojené s testováním softwaru, vylepšením polohování, počítačového vidění, pružností změn a sledování veškerých experimentů.

# 1 Elektrostatické zvlákňování

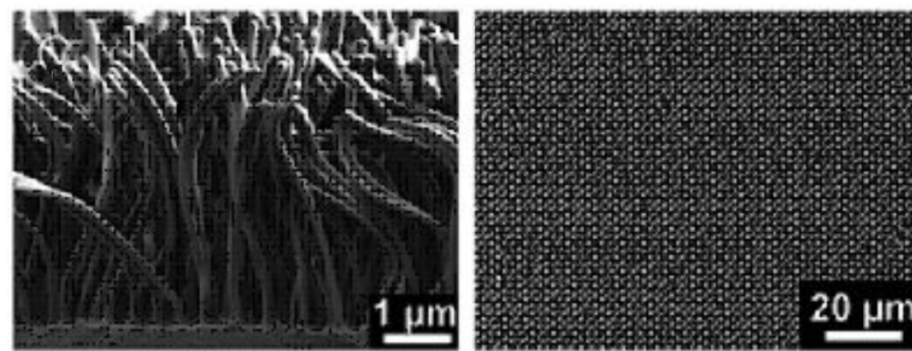
Nanovlákná jsou vlákna s průměrem v rozmezí desítek až stovek nanometrů. Podle technologie výroby se délka vlákna může pohybovat od řádu desítek až stovek mikrometrů až po metry. Hranice velikosti nanovláken se liší podle názoru různých autorů. Nejčastěji se v literatuře setkáváme s definicí, že v případě nanovláken se jedná o vlákna s průměrem menším než 1 [μm]. Možnosti uplatnění nanovláken jsou v oblastech tkáňového inženýrství, medicíny, filtrace, nanokompozitů, ochranných pomůcek a dalších odvětvích lidské činnosti. Existuje několik principů přípravy nanovláken.<sup>[1,3]</sup>

Dloužení (drawing) je metoda tažení z kapek polymeru. Při dloužení je využíván dloužicí stroj, na němž je vlákno taženo mezi dvěma body do délky značně větší, než byla původní délka vlákna. Díky tomu můžeme získat dlouhá samostatná vlákna požadované orientace a struktury (viz obr. 1).<sup>[2]</sup>



Obrázek 1: Snímek povrchu a tvaru vlákna (drawing)<sup>[2]</sup>

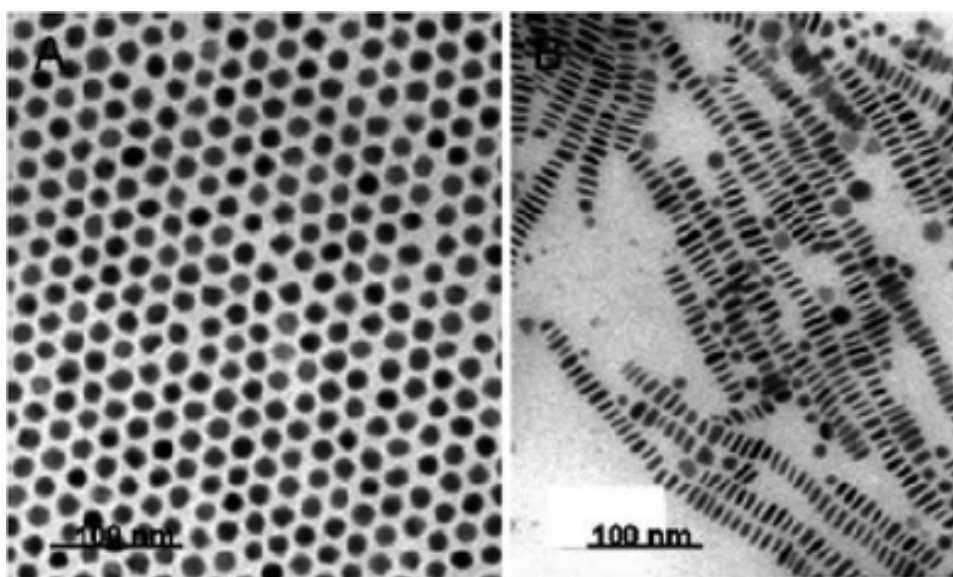
Podložková syntéza (template synthesis) používá pórovitou membránu, průměr pórů je v nanometrech, kterou se protlačí polymer. Vznikají tedy nanovlákná, která mají průměr odpovídající průměru póru na formě (viz obr. 2).<sup>[3]</sup>



Obrázek 2: Snímek povrchu a tvaru vlákna (template synthesis)<sup>[3]</sup>

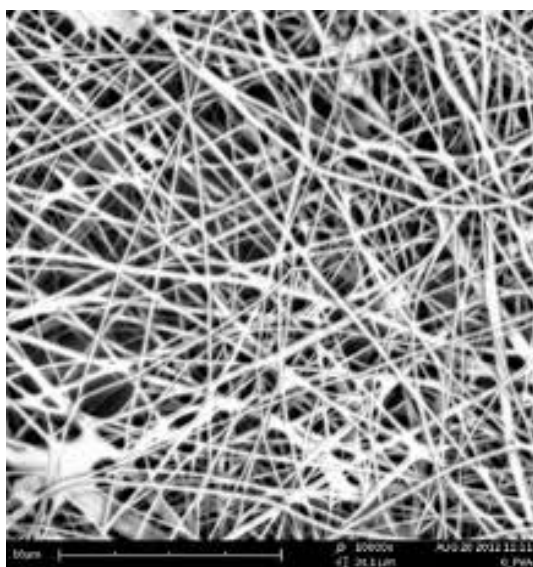
Samo-organizování (self assembly) představuje tvorbu nanovláken za použití malých částic nebo molekul jako základních stavebních bloků, které jsou soustředně uspořádány. Molekulové samo-organizování probíhá na základě chemické komplementarity a strukturní kompatibility. Částice se samy seskupují a organizují do stálé a strukturně dobře definovatelné podoby díky slabým a

nekovalentním vazbám jako jsou elektrostaticky odpuzivé síly, vodíkové vazby a elektrostatické interakce (viz obr. 3).<sup>[3]</sup>



Obrázek 3: Snímek povrchu a tvaru vlákna (self assembly)<sup>[3]</sup>

Elektrosprejování (electrospraying) je další metoda výroby vlákna. Při elektrorozprašování je kapalina protékající tenkou kapilárou vystavena vysokému DC napětí. Na konci tenké kapiláry vznikají v důsledku interakce elektrostatických sil a povrchového napětí malé kapičky, které se dále samovolně štěpí na menší a menší kapičky v důsledku povrchové hustoty náboje a odpařování rozpouštědla. Konečným produktem jsou tak nanočástice. Touto metodou lze také připravovat vrstvy nanočástic (viz obr. 4). Metoda elektrosprayingu je principiálně podobná elektrospinningu.<sup>[4]</sup>

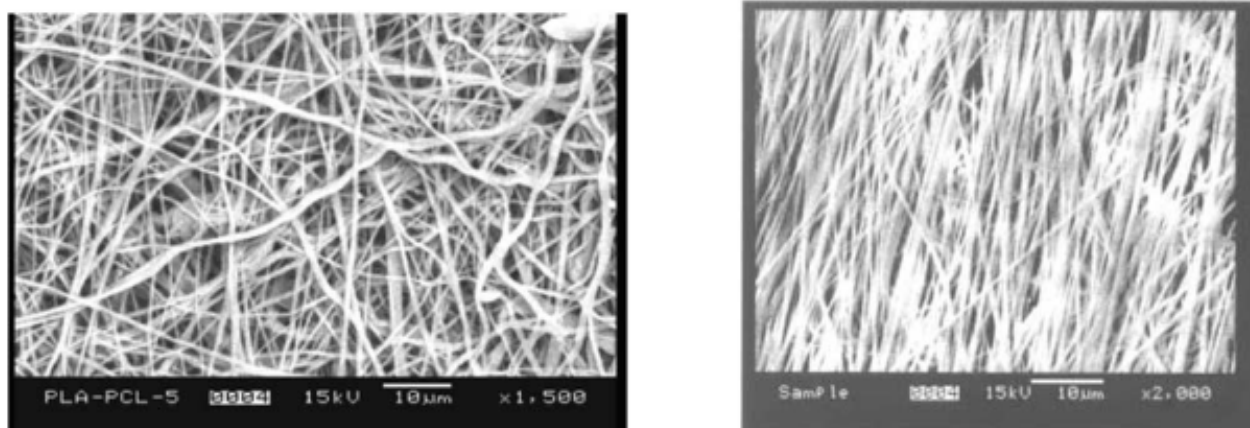


Obrázek 4: Snímek povrchu a tvaru vlákna (electrospraying)<sup>[4]</sup>

Jednou z metod výroby nanovlákn je elektrostatické zvlákňování neboli elektrospinning. Elektrostatické zvlákňování je způsob přípravy ultrajemných vláken z polymerního roztoku nebo polymerní taveniny pomocí elektrostatických a kapilárních sil. Právě největší výhodou dané metody

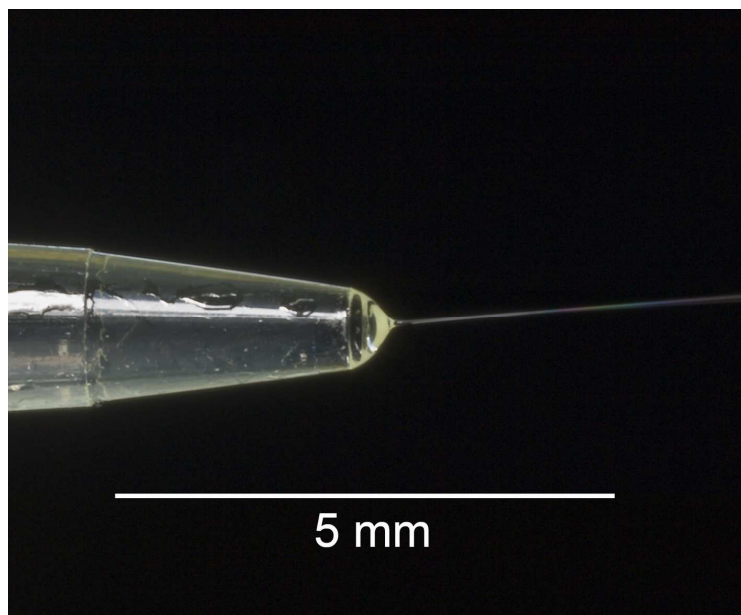


je vysoká produktivita a možnost připravovat vlákna o velmi malém průměru. Elektrostatické zvlákňování se liší od elektrosprayingu vznikem vláken, kdežto při elektrosprayingu dochází k úplnému rozptylu roztoku do kapek až k jeho atomizaci a nejsou formována žádná vlákna.



Obrázek 5: Snímek povrchu a tvaru vlákna (electrospinning) <sup>[5]</sup>

Princip tvorby vlákna je odvozen od vláken v řádech stovek nanometrů po vlákna s průměrem okolo pěti mikrometrů (viz obr. 5). Díky tomu, že mají všechna vlákna v elektrickém poli stejný náboj, mají tendenci se vrstvit na místo s co nejmenším množstvím vláknenné hmoty. Tím je zajištěna poměrně vysoká plošná rovnoměrnost za využití silného elektromagnetického pole, vytvořeného mezi dvěma elektrodami, které jsou připojeny na zdroj vysokého napětí. Elektrické pole se ustanovuje mezi povrchem tzv. zvlákňovací elektrody, která přivádí roztok polymeru a kolektorem, kde dochází ke sběru vláken. Kapka roztoku polymeru je držena pohromadě pomocí povrchového napětí. Pod vlivem silného elektrického pole je v roztoku indukován náboj na povrchu kapaliny, dochází k vzájemnému odpuzování souhlasně nabitých molekul a vytváření smykového napětí. Opudivé síly působí v opačném směru k povrchovému napětí. Takže jakmile elektrické pole dosáhne tzv. kritické hodnoty, ve které opudivé elektrické síly převýší velikost povrchového napětí, dochází k vzniku tzv. Taylorova kužele (viz obr. 6), k dalšímu vytahování polymeru a formování stabilního útvaru tzv. vláknenné trysky, která se pohybuje velkou rychlostí po směru elektrického pole, tedy k protější elektrodě. Při tomto pohybu dochází k odpařování rozpouštědla, což vede k formování a postupnému ztenčování vláken. Při formování vláken se významně uplatňuje tzv. ohybová nestabilita, která zakřivuje a prodlužuje dráhu polymeru směrem ke kolektoru, což podporuje odpařování rozpouštědla a napomáhá formování vláken (viz obr. 7). Různost tvarů vláken polymerů je dána různým stupněm nestability, která se projevuje podél dráhy letu vlákna. Průměr nanovlákna je pak ovlivněn mnoha faktory a pohybuje se v rozmezí několika desítek až stovek nanometru. <sup>[5,6]</sup>



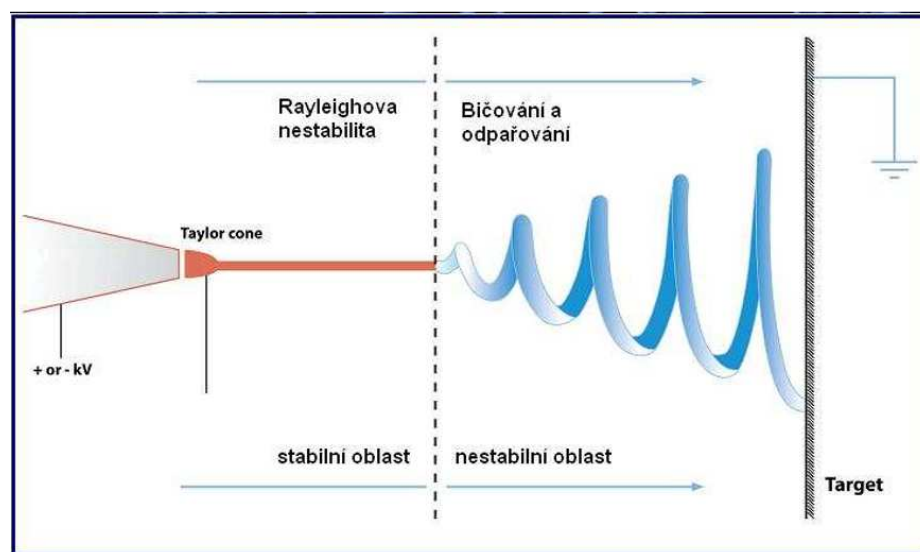
Obrázek 6: Taylorův kužel <sup>[6]</sup>

Technologie elektrostatického zvlákňování je rozdělena do dvou větví:

- zvlákňování z jehly/kapiláry (Needle electrospinning);
- zvlákňování založené na bezjehlovém zvlákňování tedy samoorganizace polymerních trysek z povrchu kapaliny (bezjehlové zvlákňování).

Při jehlovém zvlákňování dochází k vytlačení pouze malé kapky roztoku polymeru, při hladinovém zvlákňování je roztok vytlačován na nástavec s větší plochou a tím dochází ke zvýšení počtu vlákných trysek s větší výtěžností zvlákňování.

Pomocí electrospinningu lze zpracovat v podstatě všechny rozpustné, nebo tavitelné polymery. Materiály používané v současnosti pro zvlákňování můžeme rozdělit do tří základních skupin: organické polymery, biopolymery (biomateriály) a anorganické materiály.

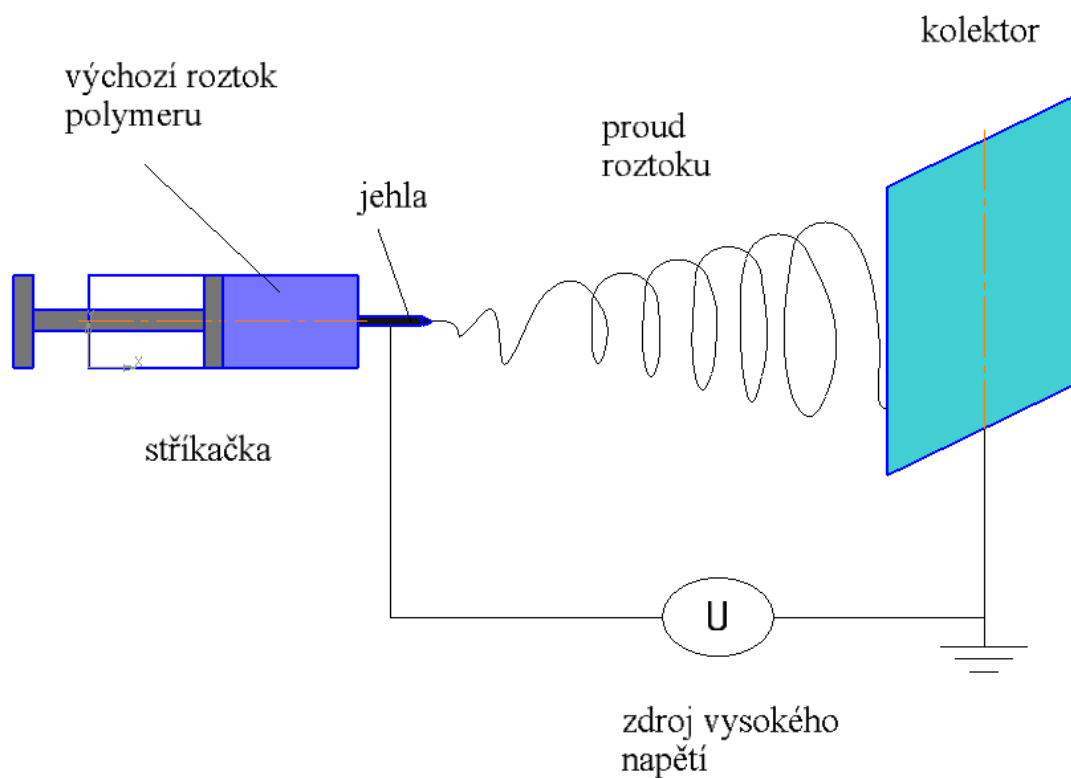


Obrázek 7: Schéma electrospinningu z kapiláry <sup>[6]</sup>

Základní zařízení elektrospinningu je tvořeno (viz obr. 8):

- zdrojem vysokého napětí;
- napájenou a zemnicí elektrodou;
- sběrným zařízením, kolektorem (může být i elektroda).

Takže může být využita dávkovací stříkačka, která slouží k ovládní průtoku roztoku polymeru.<sup>[5,6]</sup>

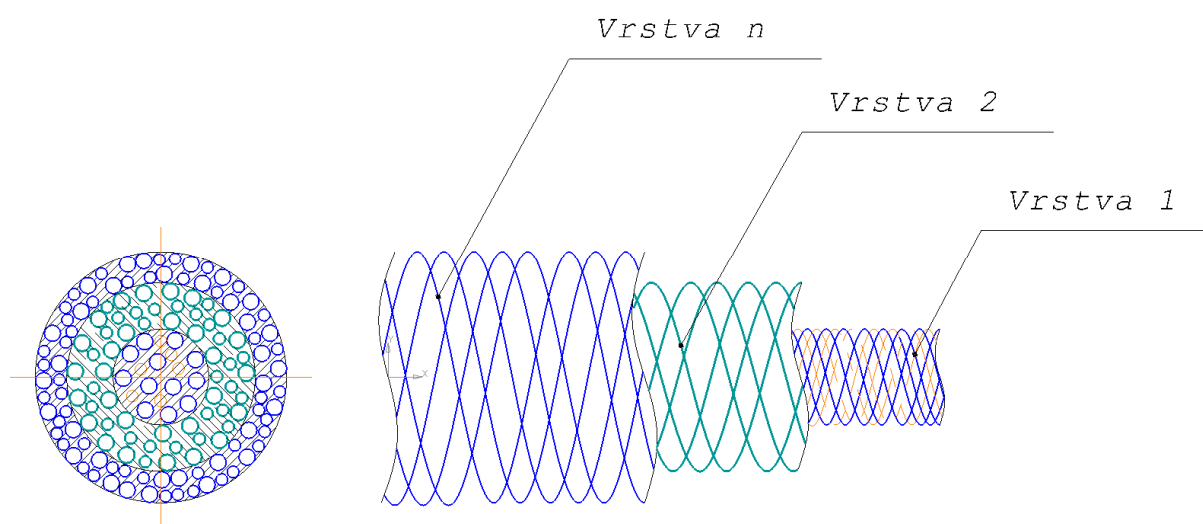


Obrázek 8: Schéma zařízení na elektrospining

## 2 Technologický postup na zpracování nanovláknenných přízí

Je potřeba realizovat a automatizovat postup výroby a zpracování jedno nebo vícevrstvé nanovláknenné příze (viz obr. 9). Oblast využití konečného výrobku je poměrně rozsáhlá, zahrnuje medicínu, elektroniku, inženýrství a další. Experimentální stroj musí vykonávat určité množství pracovních operací. Aby bylo možné navrhnout konstrukční řešení dané problematiky, je důležité nejprve provést rozbor postupu výroby, použité technologie a definovat přechod mezi jednotlivými operacemi. Je tedy zapotřebí zohlednit možnost modernizace stavěného stroje pro další experimenty.

Základní postup technologických operací není mým vlastním návrhem. Byl vyvinut ve spolupráci s Fakultou textilní Technické univerzity v Liberci a dalšími konzultanty. <sup>[2,7,8]</sup> Předpokládá se výzkum a vývoj vícevrstvého nanovláknenného výrobku a sledování vlastností různých nanovláknenných materiálů a látek v průběhu jejich přípravy a dalšího provozu zařízení.



Obrázek 9: Schéma nanovláknenné příze

Technologický postup obsahuje:

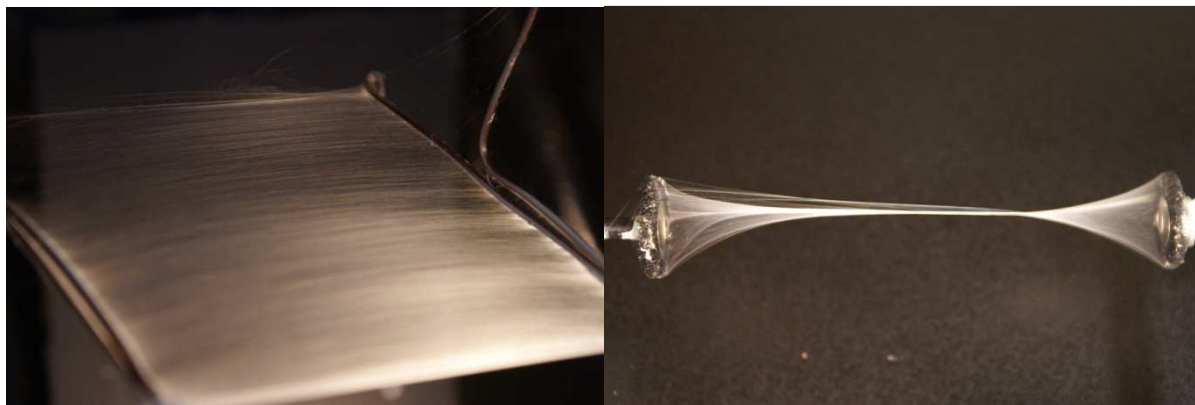
- výrobu nanovláknenných přízí
- sběr nanovláknenných přízí
- formování jedno nebo vícevrstvého nanovláknenného výrobku
- zpracování výrobku
- pomocné operace

Základní metody výroby a formování nanovláknenné příze se dají rozdělit do dvou operací. První je výroba vrstvy číslo 1, další je výroba vrstvy číslo 2 a dalších vrstev (viz obr. 9).

K výrobě a formování vrstvy číslo 1 se využívá metoda dlužení (drawing). Experimentální stroj na tažení nanovláken byl vyvinut a úspěšně otestován na Technické univerzitě v Liberci ve spolupráci KKY FS (Katedra aplikované kybernetiky, fakulta strojní) a KNT FT (Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů, fakulta textilní) pánem Ph.D. Lukášem Stanislavem. Stroj vyrábí jednotlivá nanovláknna, která lze přesně uložit na předem definovaná místa. Princip výroby spočívá v mechanickém tažení vhodného polymerního roztoku takovou rychlostí, která

zajistí přeměnu viskózního polymeru v pevné vlákno v důsledku vypařování rozpouštědla. Tím lze docílit i vznik paralelně uspořádaných nanovláken, s kterými lze dále manipulovat. Samotná aplikace vláken vychází z vlastností použitého polymeru.<sup>[2]</sup>

Na základě stanovených experimentů bylo zjištěno, že pro výrobu příze (vrstva číslo 2 až  $n$ ) je nejlepší používat jemná, paralelně orientovaná nanovlákná. Nanovlákná jsou připravena metodou elektrospiningu s rotujícím kolektorem. Sběr vlákná ke zpracování se provádí dvěma kartáči umístěnými proti sobě, pro formování stačí jen stočit kartáče proti sobě o daný počet otáček. Některé fotografie z této operace je možné vidět na obrázku 10.<sup>[7]</sup>



Obrázek 10: Nanovláknenná příze<sup>[7]</sup>

Zpracování výrobku může zahrnovat krájení nití formovaného vlákna, balení hotových výrobků atd... Takže je potřeba zohlednit možnost nahrazení vrstvy nanovlákná číslo 2 až  $n$  roztokem s obsahem různých látek.

Pomocné operace zahrnují jakékoli manipulace, dopravu a polohování výrobku mezi jednotlivými operacemi, čištění kartáčů, kontrolu výrobků a přípravu zařízení pro další využití.

Druhá metoda výroby vícevrstvého nanovláknenného dílu založená na rozprašování vhodného roztoku dovnitř nebo na povrch vrstvy číslo 2. Metoda neumožňuje výrobu vrstvy číslo 1 z technických příčin. Diplomová práce se zabývá pouze návrhem konstrukce vhodného zařízení. Rozprašování dovnitř nanovláknenného výrobku doposud nebyla realizována. Tuto metodu lze použít, dosud však nebyly provedeny žádné experimenty ani nebylo postaveno patřičné zařízení.

Ke zpracování všech popsaných operací je zapotřebí navrhnout, vyrobit a vyzkoušet pracovní linku. Linka musí splňovat požadavky na pružnost výroby hotových dílů, chování různých látek, bezpečnost, snadnost obsluhy, možnost realizace veškerých experimentů, možnost rychlé modernizace a automatizace. Bez označení a detailního popisu této linky (označení všech parametrů zařízení) nelze identifikovat práci manipulátoru

### 3 Návrh výrobní linky

Na základě technologického postupu se předběžná výrobní linka skládá z:

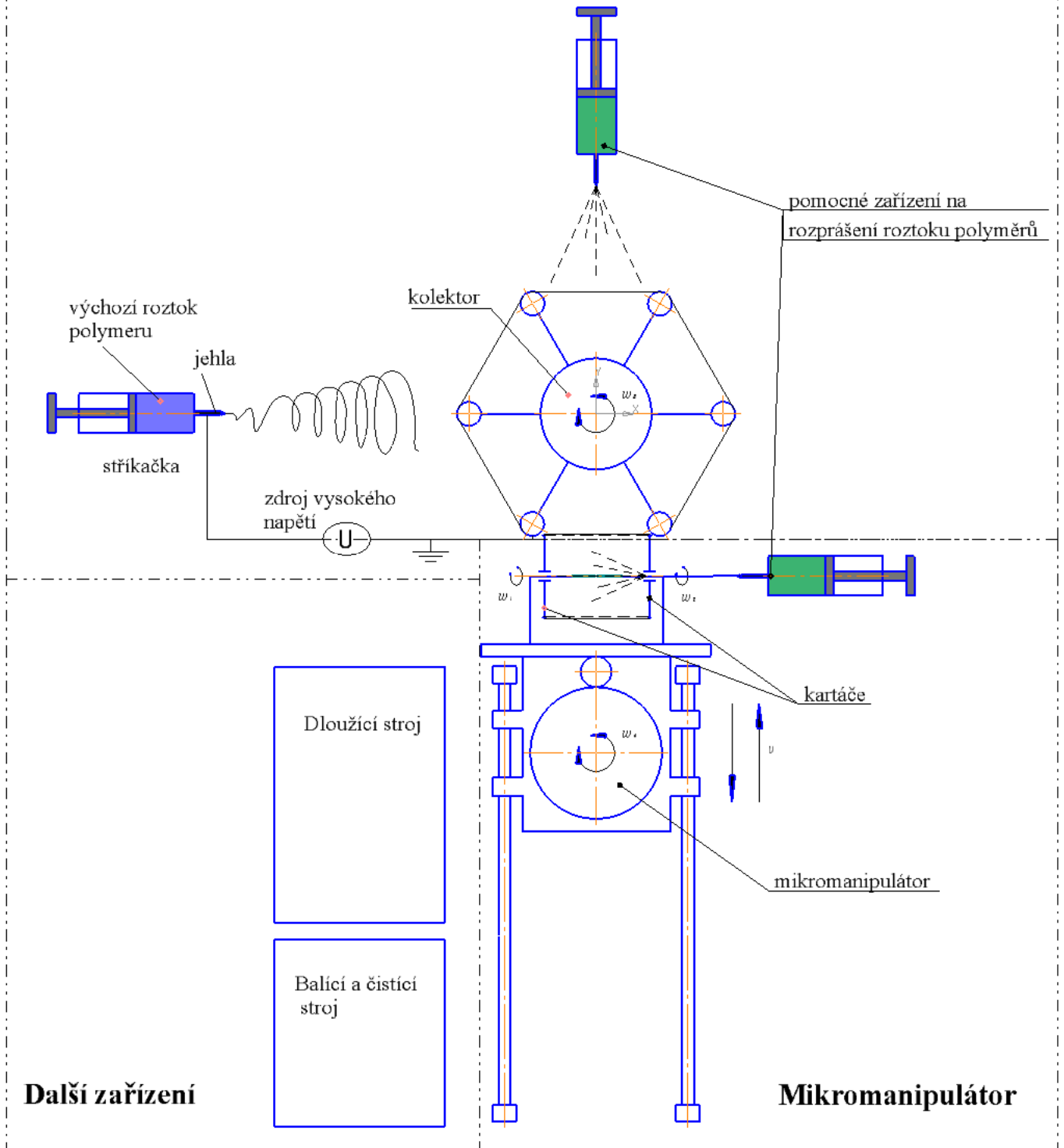
- zařízení na elektrostatické zvlákňování (výroba nanovláken vrstva číslo 2 až  $n$ )
- dloužícího stroje (výroba nanovláken vrstva číslo 1)
- mikromanipulátoru s případným dávkovacím zařízením (sběr nanovlákných přízí a formování nanovlákné trubičky, manipulace a doprava dílu mezi jednotlivými operacemi)
- balícího a čistícího stroje (balení hotového výrobku, čištění kartáčů, kontrola kvality výrobku a jakákoliv možná příprava pracovních prvků na další operaci)
- možného pomocného zařízení na rozprášení roztoku na povrch nanovlákná (vrstva číslo 2 až  $n$ ).

Na obrázku 11 je znázorněno předpokládané schéma uspořádání výrobní linky.

Uspořádání linky se může měnit a modifikovat v průběhu testování a dalšího výzkumu.

Použité techniky nejsou jedinými metodami a byli zvolené jen jako předpoklad a potřebují ověřit pomocí experimentu.

## Zařízení na elektrostatické zvlaknování

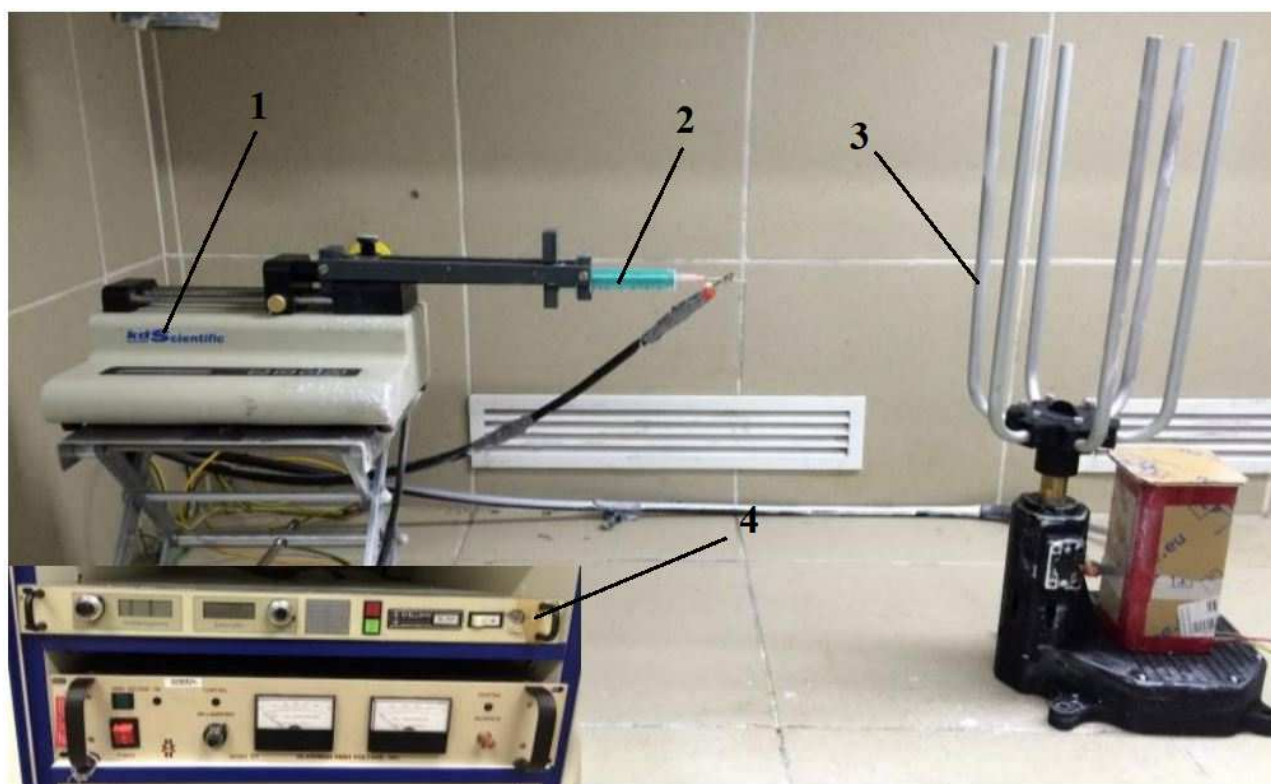


Obrázek 11: Schéma výrobní linky (pohled shora)

### 3.1 Zařízení na elektrostatické zvlákňování

Konstrukce zařízení na elektrostatické zvlákňování realizováno v rámci SGS projektu "Vývoj zařízení pro výrobu nanovláknenných přízí a jejich optimalizace pro oftalmologické implantáty" na základě TUL v Liberci. Cílem projektu bylo vyvinutí technologického zařízení pro výrobu přesných nanovláknenných přízí s důrazem na jejich optimalizaci pro oftalmologické implantáty.

Základní princip výroby nanovláknna je stejný jako v obecném případě elektrospinningu. Stroj pro zvlákňování byl tvořen stejným způsobem, jak je uvedeno v kapitole 2 na obrázku 8, avšak namísto statického kolektoru byl použit rotující kolektor. V dalším textu bude tento typ kolektoru nazýván zkráceně karusel. Bez označení tohoto zařízení (nejdůležitější parametry jsou rozměry kolektoru, forma a velikostí profilů tyče) nelze správně identifikovat práci manipulátoru.<sup>[8,9,10]</sup>



Obrázek 12: Zařízení na elektrostatické zvlákňování

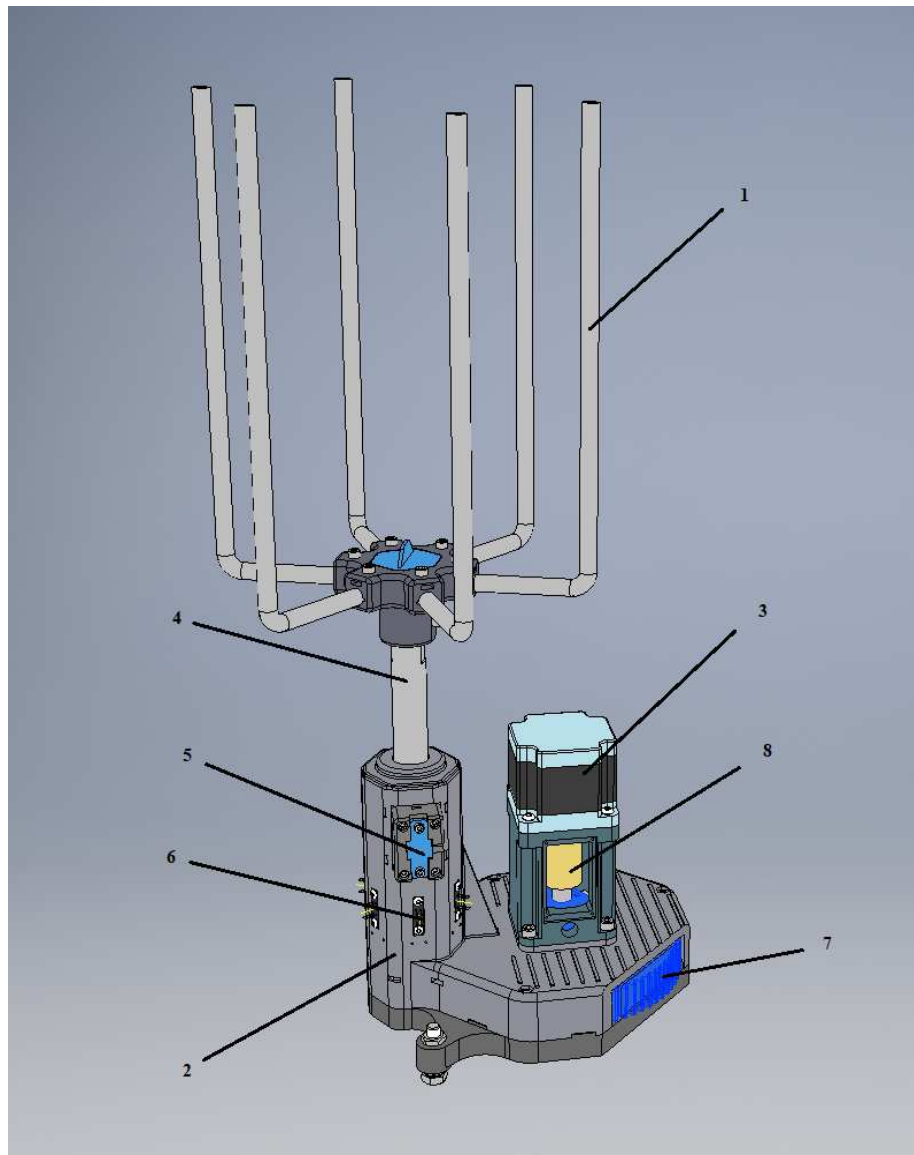
Zařízení na elektrostatické zvlákňování se dle obrázku 12 skládá z následujících základních součástí:

1. Dávkovací zařízení
2. Stříkačka
3. Karusel
4. Zdroj vysokého napětí

K dávkování se používá lineární pumpa KDS 100<sup>[14]</sup>. V konstrukci zařízení na elektrostatické zvlákňování je založena obecná lékařská stříkačka s objemem 3 [ml].



Karusel se skládá z několika ramen (2 až 8, případně 6) které se při zvlákňovacím procesu otáčí kolem své osy konstantní rychlostí (viz obr. 13). Díky tomu vzrostla produktivita výroby jednotlivé plochy nanovlákněné příze. Vlákna jsou při ideálních podmínkách zvlákňování zachytávána rovnoměrně po celém povrchu elektrod.

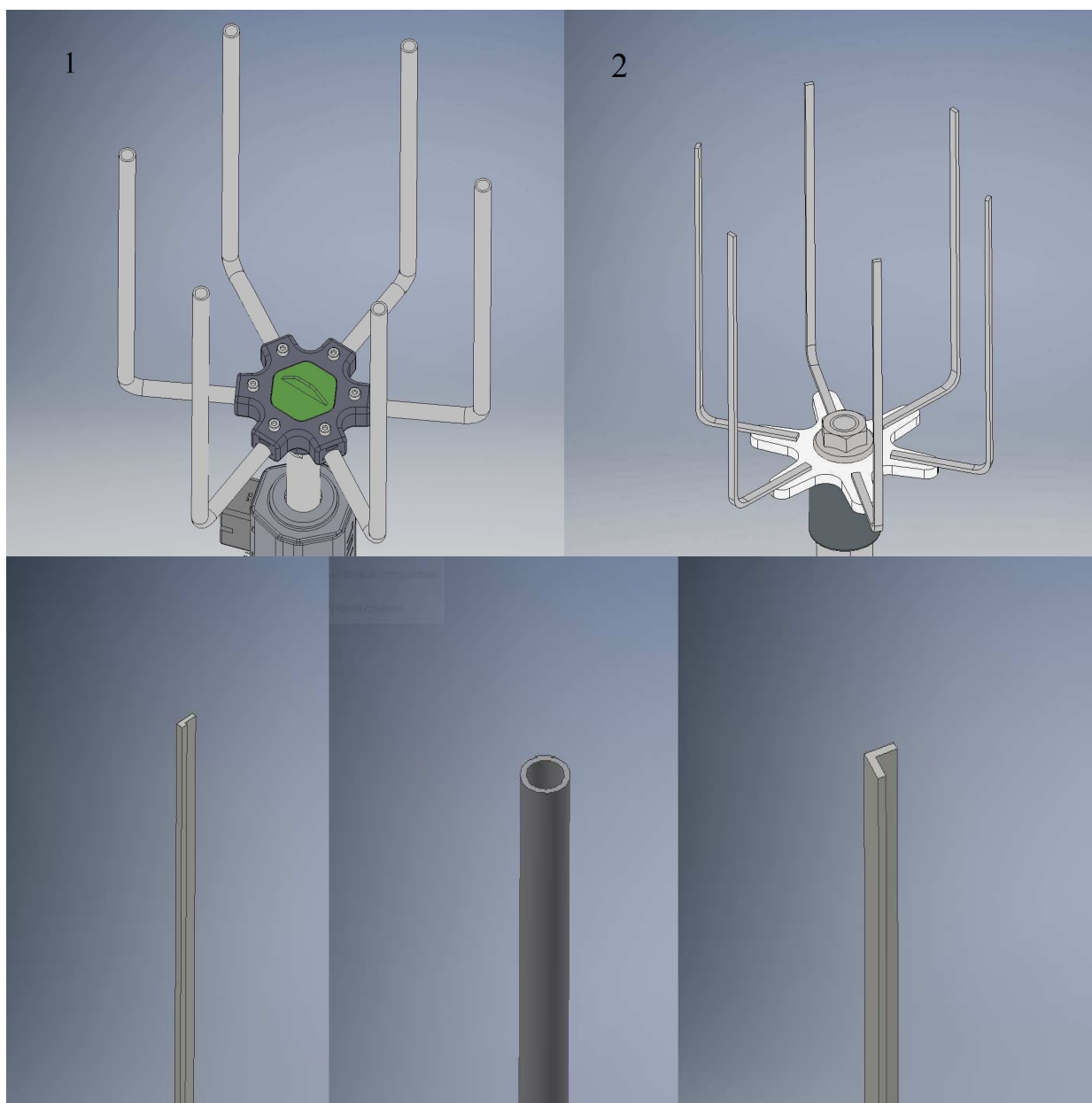


Obrázek 13 - 3D model kolektoru <sup>[9]</sup>

Zařízení se dle obr. 19 skládá z následujících základních součástí:

1. Navíjecí hlava
2. Skříň
3. Krokový motor
4. Hřídel
5. Konektor
6. Snímače polohy
7. Převod
8. Pružná spojka

Existují několik konstrukcí hlav karuselu, forem a velikostí profilů tyče (viz obr. 14).



Obrázek 14: Navíjecí hlavy a profily <sup>[10]</sup>

Technické parametry karuselu jsou uvedeny v tabulce 1.

Na elektrostatické zvlákňování se využívají dva zdroje vysokého napětí Spellman SL130 (viz obr. 12), které se liší pouze svou polaritou. Na kovovou jehlu nasazenou na konec stříkačky je přivedeno kladné napětí 10..25 [kV] (SL130P150). Napětí 0..4[kV] o opačném náboji je přiváděno na karusel (SL130N150). <sup>[15]</sup>

Tabulka 1: Technické parametry karuselu

Parametr		Hodnota	Jednotky
Hlavní rozměry (bez navíjecí hlavy)	šířka:	198	[mm]
	hloubka:	162	[mm]
	výška:	286	[mm]
Hmotnost		cca1,89	[kg]
Pracovní teplota		+10 až +60	[°C]
Zdrojová energie motorů	proud:	až 0,4	[A]
	napětí:	DC24	[V]
Otáčky karuselu		max. 200	[min <sup>-1</sup> ]

## 3 Mikromanipulátor

### 3.2.1 Koncepce

Při řešení problémů automatizace kteréhokoliv výrobního systému je nutné mít na zřeteli obecné cíle automatizace:

1. Zvýšení ekonomické efektivity výroby
  - zvýšení produktivity práce a snížení nákladů
  - snížení věcných nákladů (úspora materiálů, energií apod.)
  - předpoklady tvorby zisku
2. Zvýšení úrovně užité hodnoty výrobku
  - zvýšení kvality výrobku
  - schopnost rychle reagovat na změnu inovačních cyklů (FLEXIBILITA)
  - snížení podílu lidského faktoru v technologickém procesu
3. Humanizace práce
  - snížení intenzity a zvýšení kvality práce
  - zvýšení kultury práce a zlepšení pracovního prostředí

Řešení automatizačních úloh většího rozsahu je vždy složitý problém pro tým odborníků, jako jsou technologové, projektanti, konstruktéři, elektrospecialisti a další. Základem úspěchu je vždy tzv. systémový přístup.

Průmyslové roboty je nutné chápat pouze jako jeden z prostředků automatizace, avšak s výjimečným postavením:

1. Mají vysokou míru flexibility ve výrobním procesu
2. Jsou vysoce perspektivní z hlediska možnosti dalšího rozvoje
3. Mohou se uplatnit jak ve skupinovém nasazení, tak individuálně

Robot je automatický, nebo počítačem řízený integrovaný systém, schopný autonomní, cílově orientované interakce s přirozeným prostředím podle instrukcí člověka.

Tato interakce spočívá:

- ve vnímání a rozpoznávání tohoto prostředí
- v manipulování s předměty, popř. pohybování se v tomto prostředí

Manipulátor (jednoduchý průmyslový robot) je integrovaný systém pro mechanizaci a automatizaci manipulačních operací pracující automatiky podle programu zadaného člověkem, nebo přímo či nepřímým řízením člověkem. Je opatřen vlastními pohony. Má jeden nebo více stupňů volnosti, přičemž počet bodů na jednotlivých pohybových osách je omezen.<sup>[11,12,13]</sup>

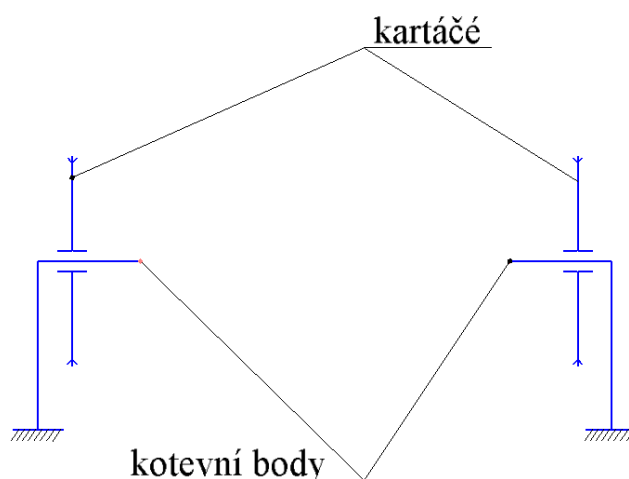
### 3.2.2 Popis jednotlivých technologických operací

Důležitým pojmem procesu výroby a zpracování jedno nebo vícevrstvé nanovlákněné příze, taktéž pracovních činností manipulátoru, je přesně definovat výrobní technologické operace a mezioperační manipulace.

Na základě uspořádání výrobní linky (viz obr.11) a popisu konečného výrobku (viz obr. 9) postup zpracování obsahuje:

- 005 Formování vrstvy číslo 1
- 010 Doprava, polohování a orientace efektoru na úrovni základní výrobní jednotky
- 015 Sběr nanovlákněné vrstvy číslo 2
- 020 Formování vícevrstvého nanovlákněného výrobku (vrstva číslo 2)
- 025 Mezioperační pohyby
- 030 Sběr nanovlákněné vrstvy číslo 3 až  $n$
- 035 Formování vícevrstvého nanovlákněného výrobku (vrstva číslo 3 až  $n$ )
- 040 Mezioperační pohyby
- 045 Doprava, polohování a orientace příze na další zpracování (balení výrobku, čištění kartáčů, kontrola kvality výrobku a jakákoliv možná příprava pracovních prvků)

Část zařízení, která obsahuje sbírací kartáče (výroba a formování vrstvy číslo 2) a pevné podklady pro uložení vrstvy číslo 1 nazývám efektor (viz obr. 15), což označuje koncový člen průmyslových robotů (manipulátorů), který slouží ke komunikaci s okolím. Daný pojem budu popisovat jako jednotlivé místo formování nanovlákněného dílu, taktéž efektor se dá počítat jako objekt manipulace mezioperačních a operačních pohybů.

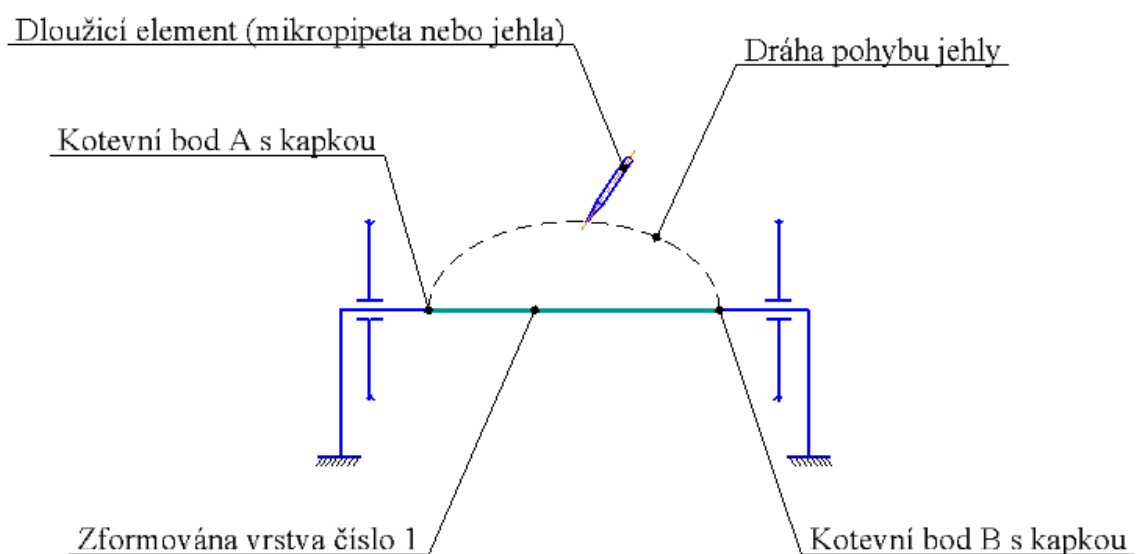


Obrázek 15: Schéma efektoru

Pro řešení naší původní úlohy nejprve rozdělím veškeré operace na jednotlivé pohyby.

## 005 Formování vrstvy číslo 1 <sup>[2]</sup>

Postup dloužení spočívá ve výrobě paralelních polymerních vláken o průměru 100 [nm] až 10 [μm]. Princip spočívá v tom, že na povrchu pevných podkladů (kotevní bod A a kotevní bod B) se vytvoří kapka roztoku nebo taveniny polymeru o objemu 0,001 [μl], přitom během jejího vytváření nebo po něm se do ní ponoří konec dloužícího elementu. Zároveň se na jeho povrchu nebo v jeho dutině zachytí část roztoku. Dál se jehla pohybuje rovnoměrně mezi body A a B, čímž se formuje tvar polymerních vláken vrstvy číslo 1. Roztok v dutině zůstává během tohoto pohybu díky své viskozitě a povrchovému napětí propojení vláken, jejichž průměr se při pohybu zvlákňovacího elementu zmenšuje. Při následném kontaktu konce zvlákňovacího elementu s povrchem podkladu se toto vlákno ukotví. Princip dloužení samostatných nanovláken je zobrazen na obrázku 16.



Obrázek 16: Formování vrstvy číslo 1

Práce se nezabývá detailním rozбором zařízení na zvlákňování metodou drawing, ale popisuje jenom základní principy, protože stroj vhodný pro naše potřeby nebyl v současné době navržen, vyroben ani otestován.

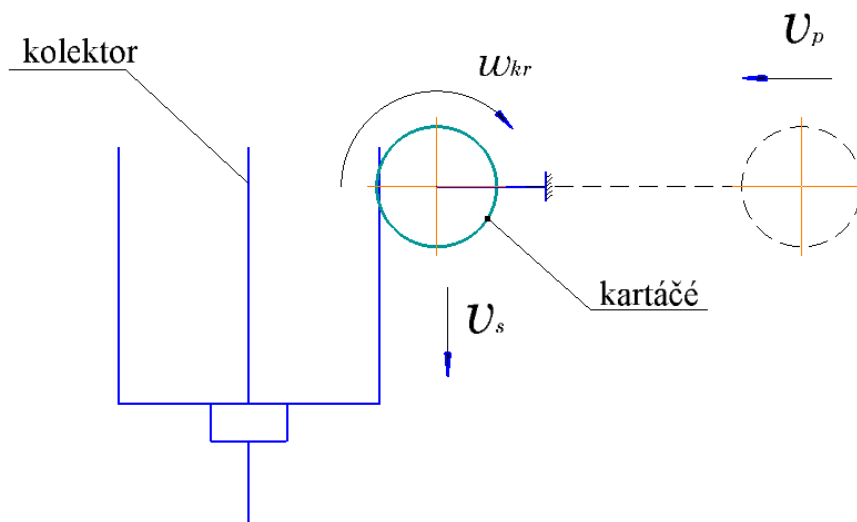
## 010 Doprava, polohování a orientace efektoru na úrovni základní výrobní jednotky

Tento mezioperační pohyb se dá identifikovat jako doprava efektoru mezi strojem na dloužení a strojem na elektrostatické zvlákňování. Podle návrhu výrobní linky je tento pohyb prostorový (viz obr. 11). Základní tři pohyby jsou pohyb rotační, pohyb přímočarý posuvný (translační) a svislý translační pohyb.

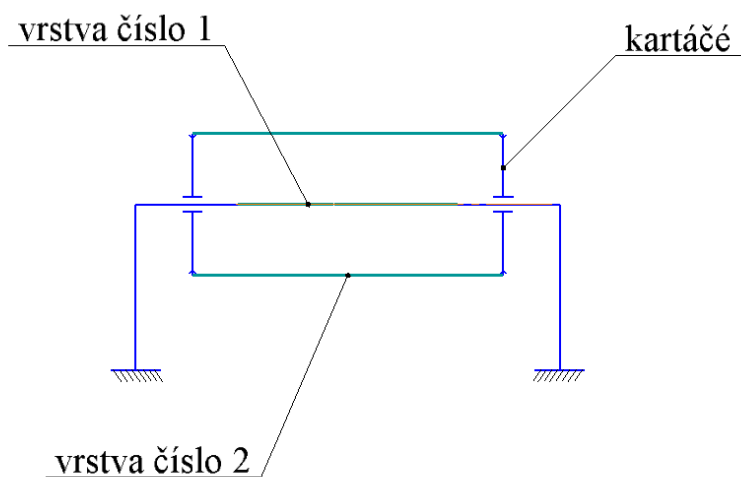
## 015 Sběr nanovláknenné vrstvy číslo 2

Sběr nanovláknna se provádí pomocí dvou kartáčů, zahrnuje nájezd kartáčů, svislý translační pohyb efektoru a současnou rotaci obou kartáčů proti směru translačního pohybu (viz obr. 17).

Výsledek této operace je zobrazen na obrázku 18.



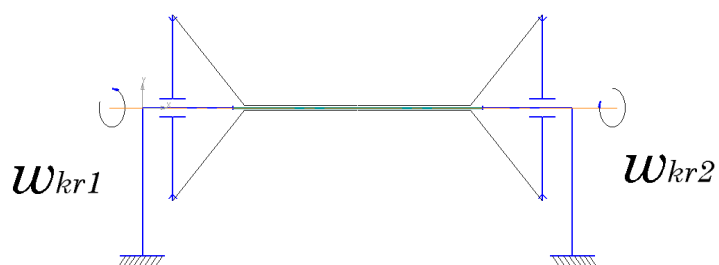
Obrázek 17: Sběr nanovlákněné vrstvy číslo 2



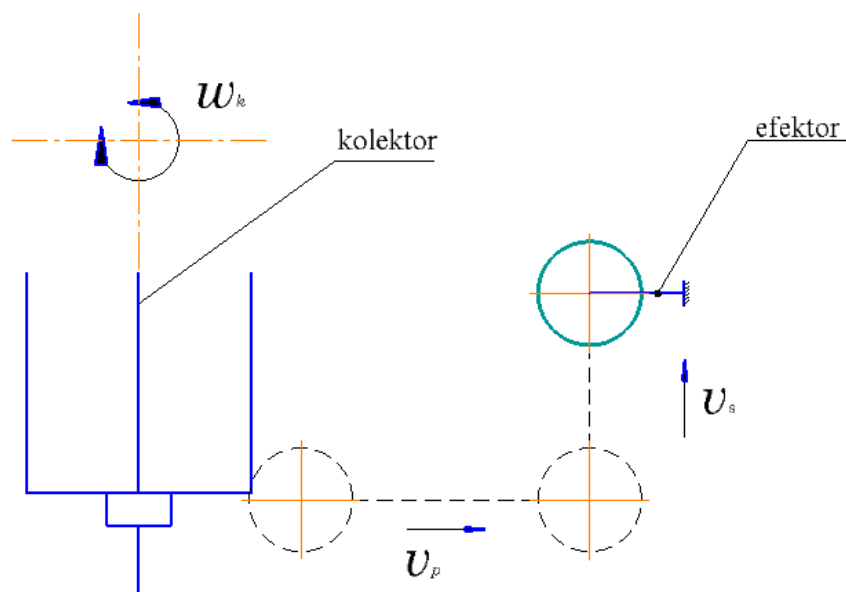
Obrázek 18: Výsledek sběru nanovlákněné vrstvy číslo 2

### 020 Formování vícevrstvého nanovlákněného výrobku (vrstva číslo 2)

Pro formování nanovlákněného výrobku stačí jen stočit kartáče proti sobě o daný počet otáček. Výsledek této operace je znázorněn na obrázku 19.



Obrázek 19: Výsledek formování vícevrstvého nanovlákněného výrobku



Obrázek 20: Mezioperační pohyby

Jako mezioperační pohyby rozumíme návrat efektoru do původního stavu a pootočení kolektoru (viz obr. 20), jedná se tedy o přípravu na pokračování technologického procesu výroby, kontrolu nanovlákněného výrobku, nebo analýzu výsledků experimentů.

Veškeré další operace (030 Sběr nanovlákněné vrstvy číslo 3; 035 Formování vícevrstvého nanovlákněného výrobku; 040 Mezioperační pohyby; 045 Doprava, polohování a orientace příze na další zpracování) jsou jen kombinace předem popsanych pohybů a zahrnují úplně stejný postup dějů.

Druhou metodou výroby vícevrstvého nanovlákněného dílu je rozprašování kapaliny dovnitř nebo na povrch nanovlákněného materiálu. Na základě toho byl výše popsany technologický postup modifikován.

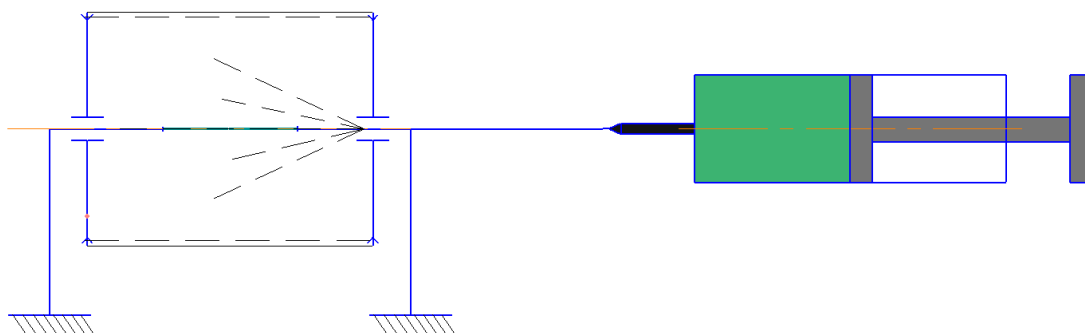
Technologický postup s rozprašením obsahuje:

- 005 Doprava, polohování a orientace efektoru na úrovni základní výrobní jednotky
- 010 Sběr nanovlákněné vrstvy číslo 2
- 015 Rozprašení roztoku na povrch nanovlákněného materiálu (vrstva číslo 2 až  $n$ ).
- 020 Formování vícevrstvého nanovlákněného výrobku (vrstva číslo 2)
- 025 Mezioperační pohyby
- 030 Sběr nanovlákněné vrstvy číslo 3 až  $n$
- 035 Formování vícevrstvého nanovlákněného výrobku (vrstva číslo 3 až  $n$ )
- 040 Mezioperační pohyby



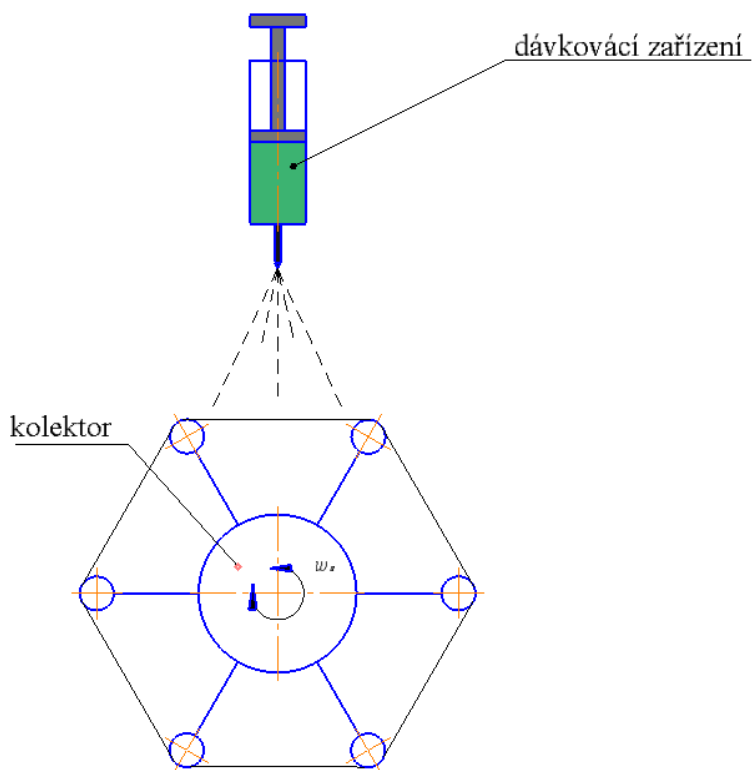
Tato metoda se liší pouze v úseku 015 a neobsahuje výrobu vrstvy číslo 1. Rozprášení umožňuje přidání kapaliny dovnitř nebo na povrch nanovláknenného materiálu, nebo kombinaci těchto operací. Veškeré další operace jsou stejné jako ty výše popsané.

Jestli mluvíme o rozprášení dovnitř nanovláknenného materiálu, vypadá tato technologická operace takto:



Obrázek 21: Rozprášení dovnitř nanovláknenné trubičky

Rozprášení na povrch nanovláknenného materiálu se provádí v zóně zařízení pro elektrostatické zvláknování a provádí se po navíjení nanovláknna (viz. obr. 22). Tento postup ještě nebyl vyzkoušen.

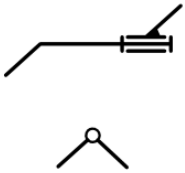
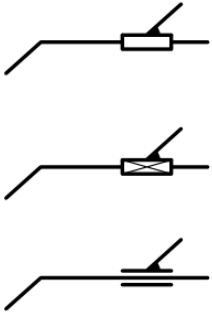


Obrázek 22: Rozprášení na povrch nanovláknenného materiálu

Podle rozsahu pohybů a jejich účelu se realizují jednotlivými skupinami prvků pohyby globální, regionální a lokální. K tomuto účelu rozlišujeme ústrojí robotu (manipulátoru) pro globální pohyb - pojezdová ústrojí (pohyb mezi jednotlivými výrobními zařízeními), regionální pohyby – polohovací ústrojí (polohování efektoru) a lokální pohyby – orientační ústrojí. K lokálním pohybům lze přiřadit pracovní pohyb uvnitř efektoru (formování a sběr vrstvy číslo 2).

V rámci jednotlivých ústrojí jsou u průmyslových robotů (manipulátorů) možné pohyby rotační nebo posuvné, a to vzhledem k různým osám. Taková skupina prvků, která zajišťuje konkrétní pohyb tohoto druhu se označuje jako pohybová jednotka (kinematická dvojice) a podle konkrétního pohybu jde o pohybovou jednotku pojezdovou, polohovací, nebo orientační. Průmyslové roboty (manipulátory) používají ve svých kinematických řetězcích jen dva druhy kinematických dvojic (vazeb) - rotační (R) a posuvné (T) (Tab. 2). Třída dvojice je počet stupňů volnosti, který je konkrétní dvojicí tělesu (z původních 6 stupňů) odebrán. Kinematické řetězce sestávají z jednotlivých členů a vazeb (kinematických dvojic).<sup>[11]</sup>

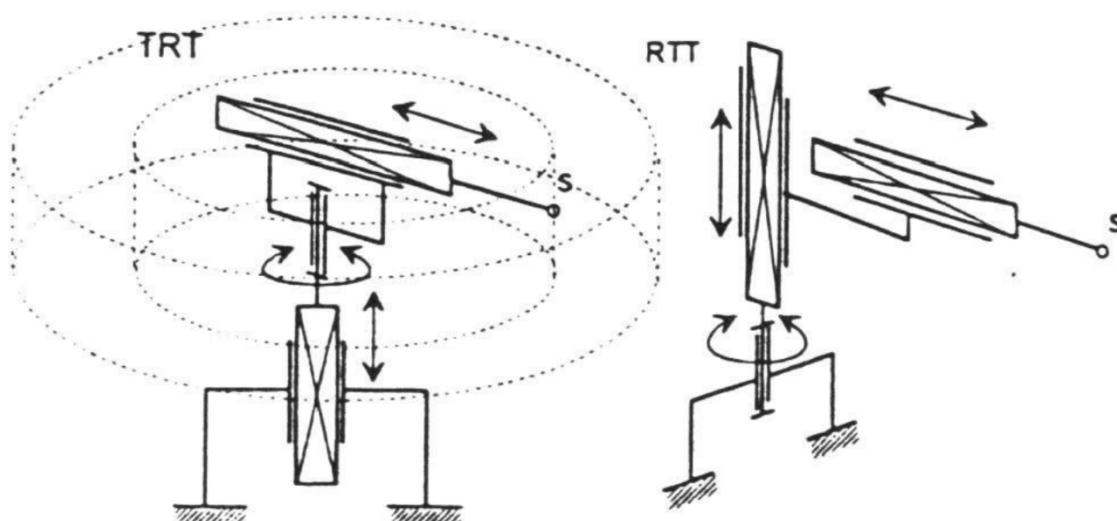
Tabulka 2: Kinematické dvojice<sup>[11]</sup>

Kinematická dvojice	Počet stupňů volnosti	Značení	Třída dvojice	Zobrazení
rotační	1	R	5	
posuvná	1	T	5	

### 3.2.3 Návrh možných řešení manipulace

Z celé obrovské škály kinematických struktur k zajištění veškerých manipulačních pohybů pro zajištění správné funkce naší výrobní linky bylo zvoleno jedno z konstrukčních řešení. Bylo použito robotu (manipulátoru) s třemi stupni volnosti TRT nebo RTT (pracovní pohyby uvnitř efektoru se neurčují).

Bavíme-li se o manipulátoru TRT nebo RTT, můžeme ho zařadit do kategorie univerzální manipulátory. Typ cylindrický (válcový) má polohovací ústrojí tvořené řetězcem TRT, resp. RTT a obsahuje vertikální a horizontální translační jednotku, osa rotace rotační jednotky je svislá. Pracovním prostorem je válcový prstenec, nejčastěji s pneumatickými pohony a se sekvenčním řízením. Řada manipulátorů a jednoduchých robotů je právě této koncepce (viz obr. 23).<sup>[11,12,13]</sup>



Obrázek 23: Kinematická struktura TRT a RTT<sup>[12]</sup>

Na základě těchto kritérií se použití robota ukázalo jako zvláště vhodné, avšak z hlediska ekonomického nikoliv. Pořizovací náklady robotů od světových výrobců jsou velké a také nezahrnují náročný návrh a výrobu vhodného efektoru.

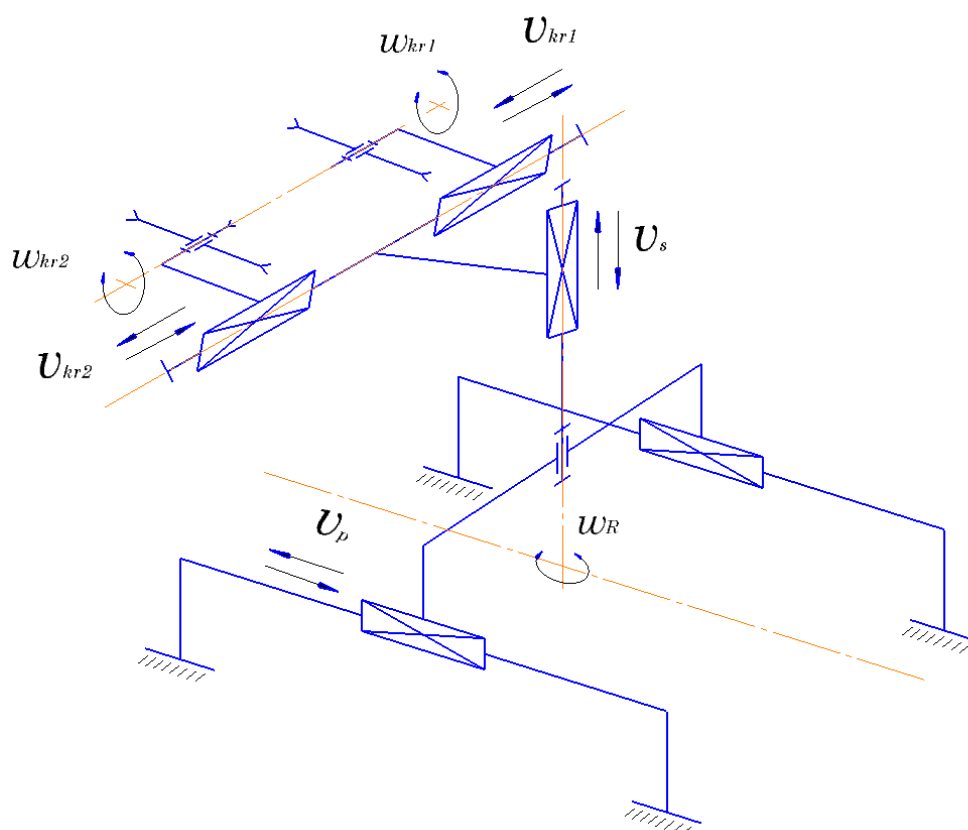
Výzkumný tým Katedry výrobních systémů a automatizace a Katedry netkaných textilií Technické univerzity v Liberci rozhodl, že postavení vlastního manipulačního stroje pro zvláštní potřeby a požadavky je nejlepším možným postupem řešení manipulační úlohy.

### 3.2.4 Popis mikromanipulátoru

Vyvíjený mikromanipulátor poskytuje veškeré manipulační pohyby a zahrnuje v sobě operace spojené s výrobou a formováním vícevrstvého nanovláčkového výrobku.

Mikromanipulátor je označován jako jednocelový manipulátor s třemi stupni volnosti a má co nejuniverzálnější možnou konstrukci, umožňující rozšíření a doplnění o potřebné prvky, čidla, kontrolní zařízení atd.. Stroj je schopný výsledek své práce ukotvit do předem daných míst. Na začátku vývoje nelze počítat se všemi okolnostmi, které mohou nastat a zohlednit všechny požadavky, které mohou být v průběhu uloženy. Dá se však ve finále říct, že stroj splňuje veškeré požadavky na přesnost polohování, tuhost a minimální rozdíl statických a dynamických odporů.

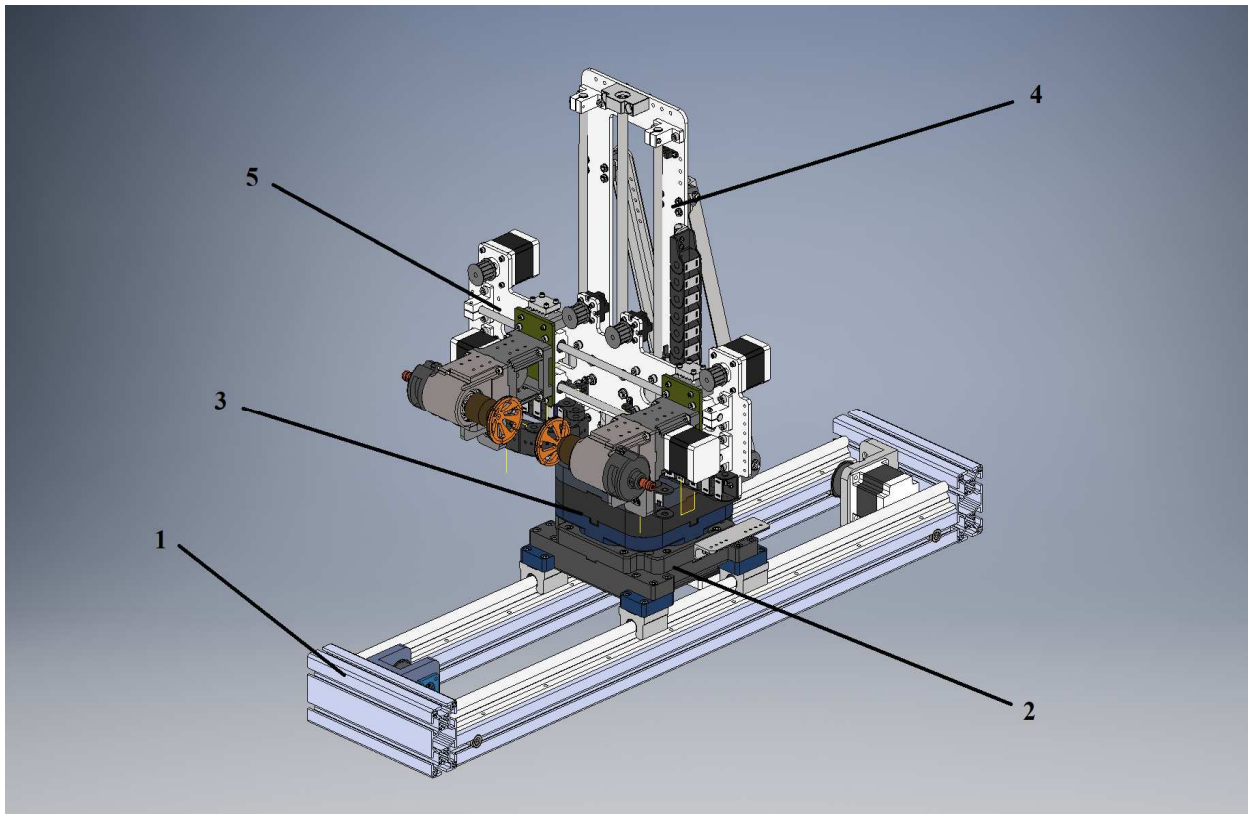
Kinematické řetězce jsou tvořeny otevřenými, prostorovými, vázanými a kinematickými řetězci. Mikromanipulátor je tvořen řetězcem TRT, obsahuje horizontální translační pohybovou jednotku (pojezd), vertikální rotační jednotku (otočný stůl) a vertikální translační jednotku (polohovací ústrojí). K těmto pohybům lze přiřadit pracovní pohyb uvnitř efektoru a rovněž i nesouvislé rotační a translační pohyby kartáčů (viz obr. 24).



Obrázek 24: Kinematická struktura mikromanipulátoru

3D model mikromanipulátoru se dle obrázku 25 skládá z následujících základních součástí:

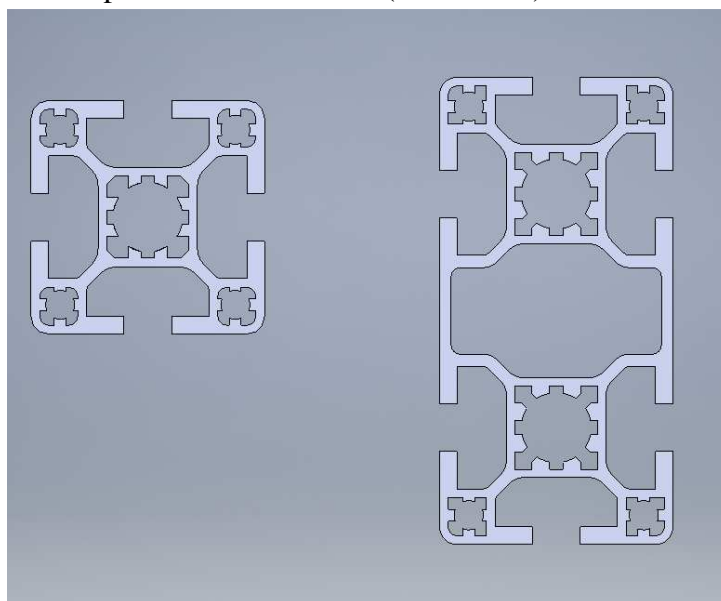
1. Rám
2. Pojezd
3. Otočný stůl
4. Polohovací zařízení
5. Efektor



Obrázek 25: 3D model mikromanipulátoru

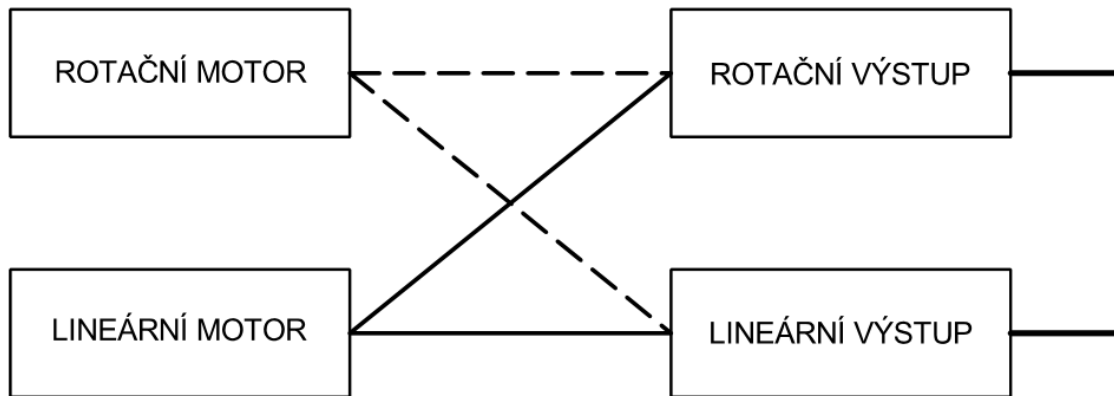
### Rám

Při konstrukci rámu manipulátoru nebo CNC stroje lze využít několik možných řešení. V praxi jsou používány odlévané, svařované nebo montované konstrukce. V případě tohoto mikromanipulátoru nejsou požadavky na extrémní přesnosti, tuhosti a tlumení vibrací. Montovaný rám je tedy pro vyvíjený stroj nejvhodnější. Jeho výhody jsou rychlá a snadná montáž a přestavitelnost, jednoduché dodatečné úpravy a doplnění, dostatečná přesnost a tuhost. Rám je tvořen hliníkovými profily firmy MayTec s jednotným rastrem upínacích drážek a děr (viz obr. 26).<sup>[16]</sup>



Obrázek 26: Tvar hliníkových profilu

Polohovací jednotky jsou řešením za použití kinematických dvojic (rotačních a translačních). Tím rozumíme druh pohybu výstupního členu pohybové jednotky. Protože máme k dispozici motory rotační a lineární, přichází z tohoto hlediska v úvahu čtyři možné koncepce řešení pohybových jednotek (viz obr. 27). Jestli používáme motor a jednotku se stejnými druhy pohybu, jde o tzv. identickou transformaci pohybu, v opačném případě se jedná o transformaci neidentickou. Z hlediska použitelnosti jsou rozhodující především kinematické parametry, rozsahy jednotlivých pohybů, přesnost polohování a maximální zatížení. <sup>[11]</sup>

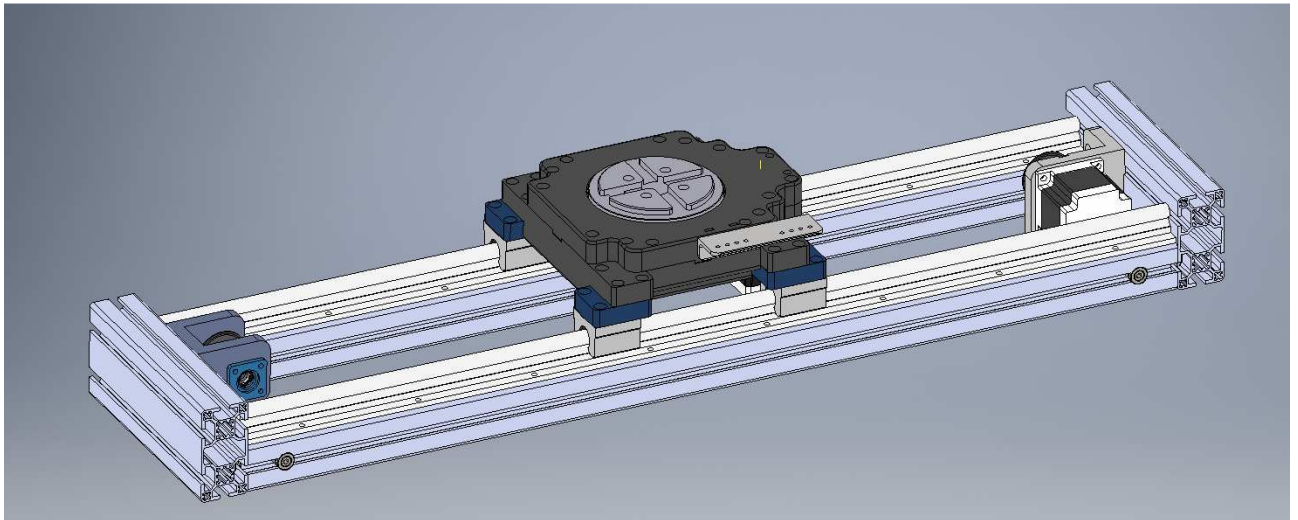


Obrázek 27: Možné transformace pohybu v pohybových jednotkách<sup>[11]</sup>

### Pojezd

Jako pohyblivá část pojezdů (horizontální translační pohyb) (viz obr. 28) byl zvolen řetězový převod. Jedná se o rotační-lineární transformaci. V porovnání s lineárními motory nebo kuličkovým šroubem to byl v dané době způsob ekonomicky přijatelnější. Z hlediska koncepčního řešení je na výběr varianta s nepohyblivými vodícími prvky a s pohyblivými saněmi. Pro realizaci pojezdů byly použity součásti vedení (podepřené tyče a ložiska), řemen, řemenice a krokový 2-fázový motor 57HS09. Volba druhu (typu) motoru byla založena na nutnosti jednoduchého ovládání (řízení, regulace), ceně a taktéž na odmítnutí zbytečně vysokých momentů a výkonů. Zjištění skutečných momentů na začátku návrhu mikromanipulátoru není možné z technologických příčin.

Pohyb rotoru krokového motoru je při nízkých rychlostech nespojitý, rotor se pohybuje mezi stabilními polohami vždy v určitém úhlu. Počet kroků (stabilních klidových poloh) je dán počtem pólových dvojic, rovněž může být ovlivněn způsobem ovládání. Krok je reakce rotoru krokového motoru na řídicí impuls. Rotor se při jednom kroku pootočí z výchozí polohy (klidového stavu) do nejbližší magnetické klidové polohy. Nevýhodou motorů je tzv. ztráta kroku, která nastává při překročení mezního zatížení a sklon k mechanickému zakmitávání, které může vést k nestabilitě při pohybu.



Obr. 28: Pojezd

Podepřené tyče představují optimální střed mezi nepodepřenou verzí, která je sice nejlevnější, ale snese pouze minimální zátěž, a profesionálním prizmatickým vedením. Cena podepřených tyčí je v porovnání s prizmatickou variantou 3x nižší, přesto tato varianta použitá po celé délce poskytuje velmi dobrou přesnost a linearitu vedení, stejně tak i vysokou nosnost.

Sestava vedení je tvořena podepřenou tyčí typu SBR-12 (viz obr. 29), vyráběnou v toleranci H6 (u této verze je tolerance -0.011mm), která je povrchově indukčně kalena na tvrdost HRC 65 do hloubky 1-2 [mm] (dle typu), a kvalitním profilovým podložím z duralu, podepírající tyč po celé délce. Tyč je s podložím spojena pomocí šroubů ze spodní strany. Podloží je dole rozšířeno a vybaveno montážními otvory.<sup>[17]</sup>



Obr. 29: Podepřená tyč SBR-12<sup>[17]</sup>



Obr. 30: Ložisko SME-12<sup>[17]</sup>

Standardní vozík SME 12 (viz obr. 30) je nejpoužívanější variantou při stavbě CNC strojů díky své přijatelné ceně a velmi dobrým provozním parametrům. Obsahuje jedno lineární ložisko odpovídajícího průměru. Při správné instalaci lze dosáhnout přesnosti stroje cca 0.01[mm] (při použití ostatních komponentů s odpovídající přesností). Otevřená konstrukce vozíků, která je u otevřených tyčí samozřejmostí, nedovoluje vysoké zkrtné zatížení vozíku, při kterém by mohlo dojít k rozlomení ložiska i samotného vozíku.

V konstrukci pohonu byl použit neoprenový řemen 5M 15 s půlkulatým profilem zubu zaručující vysoký výkon, tichý chod, přesnější synchronizaci a lepší náběh ozubení (viz obr. 31). Šířka řemene je 15 [mm] a rozteč zubů je 5 [mm]. Ozubený řemen pracuje v souladu s vhodnými

řemenicemi HTD 5M 15 (viz obr. 32). Avšak řemenice potřebují předběžnou úpravu instalačních otvorů. Technické výkresy pro tyto úpravy jsou v příloze číslo 2.



Obrázek 31: Řemen 5M 15<sup>[18]</sup>



Obrázek 32: Řemenice HTD 5M 15<sup>[18]</sup>

Zdrojem točivého momentu je krokový motor 57HS09 (viz obr. 33). Krokový motor 57HS09 má 8 vodičů a umožňuje bipolární (sériové a paralelní) a unipolární zapojení. Kontrola krajních poloh pohybu pojezdu je řízena pomocí optických senzorů. Technické parametry krokového motoru SH57HS09 jsou uvedeny v tabulce 8.

Ke kontrole krajních poloh pohybu využívám optické senzory TCST2202 (viz obr. 34).<sup>[20]</sup> Optické senzory patří mezi nejpoužívanější snímače pro zjištění přítomnosti objektů. Hlavní výhodou těchto senzorů je nízká cena, spolehlivost, jednoduché ovládání a nízké pořizovací náklady související s IPC řízením. Nevýhodou těchto snímačů je typicky horší přesnost, ale v našem případě dodržování vysoké přesnosti polohování není potřeba. Technické parametry senzorů jsou uvedené v tabulce 4.

Tab. 3: Parametry krokového motoru 57HS09<sup>[19]</sup>

Parametr	Hodnota	Jednotky
Instalační příruba	Nema23	[–]
Kroků na otáčku	200 Kroků / 1.8° krok	[–]
Počet vodičů	8	[–]
Provozní proud	0,9	[A]
Max. proud (špičkový)	2,7	[A]
Napájecí napětí	DC 12 až 36	[V]
Max. moment	1,3	[Nm]
Délka motoru	54	[mm]
Šířka/Výška motoru	56,3x56,3	[mm]
Průměr osy	6,35	[mm]
Průměr instalačních otvorů	4	[mm]
Instalační rozteče	47,1x47,1	[mm]
Provozní teplota	-10 až +50	[°C]
Hmotnost	0,6	[kg]

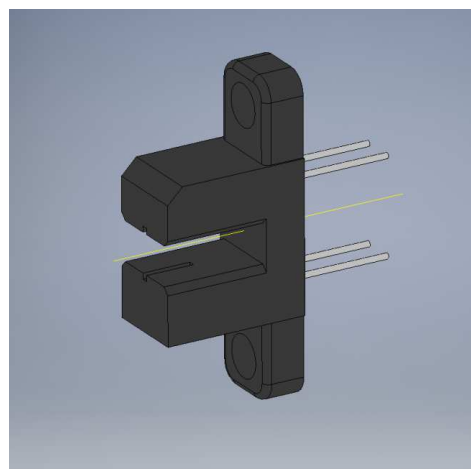


Tabulka 4: Technické parametry optického senzoru TCST2202 <sup>[20]</sup>

Parametr	Hodnota	Jednotky	
Šířka clony	0,5	[mm]	
Pracovní teplota	-55 až +85	[°C]	
Vlnová délka emitoru	950	[nm]	
Maximální výkon	250	[mW]	
Vstup (EMITTER)			
Napájecí napětí	6	[V]	
Proud	60	[mA]	
Výstup (DETECTOR)			
Napětí kolektoru emitoru	70	[V]	
Napětí emitoru kolektoru	7	[V]	
Proud kolektoru emitoru (provozní)	1	[mA]	
Proud emitoru kolektoru (provozní)	10	[μA]	
Hmotnost			
	cca 0,89	[kg]	
Čas zapnutí	$I_C = 2 \text{ mA}, V_S = 5 \text{ V}$ $R_L = 100 \Omega$	10	[μs]
Čas vypnutí	$I_C = 2 \text{ mA}, V_S = 5 \text{ V}$ $R_L = 100 \Omega$	8	[μs]



Obrázek 33: Krokový motor 57HS09 <sup>[19]</sup>



Obrázek 34: Optický senzor TCST2202

Uložení ozubených kol je na valivých ložiskách SKF 61821-2RS a SKF 61802-2RS s kontaktním těsněním z nitrilové pryže (NBR) zesílené ocelovým kroužkem na obou stranách ložiska. <sup>[21]</sup>

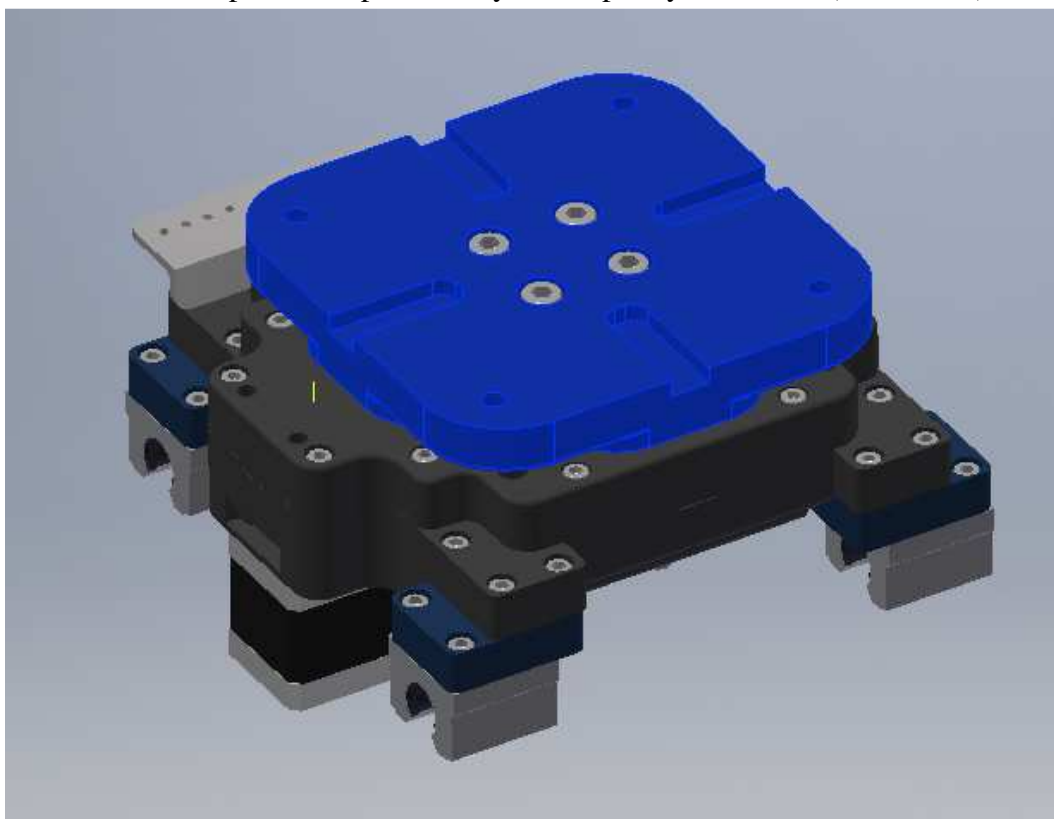
### Otočný stůl

Řešení rotačních jednotek je zpravidla z konstrukčního i technologického hlediska výhodnější. Jednak jde o případ v konstrukci strojů obecně, tak i v konstrukcích robotů převládající, protože výroba rotačních ploch je technologicky jednodušší. Rovněž skutečnost, že v naprosté převaze je dnes u robotů aplikace elektropohonů, tedy motorů s rotačním pohybem a s identickou transformací

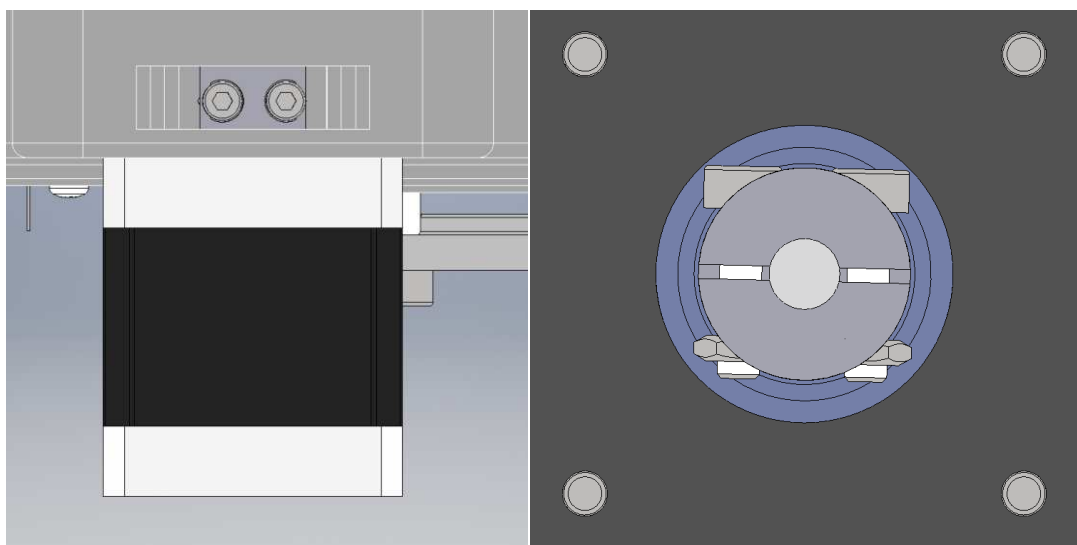
znamená, že tyto konstrukce jsou lépe zvládnuty a k dispozici je řada volitelných prvků a součástí ke kompletaci.<sup>[12]</sup>

K zajištění rotačního pohybu (otočný stůl obr. 35) je použit ozubený pastorek a ozubený věnec (viz obr. 37). Pastorek a věnec umožňuje doladit potřebný převodový poměr  $i = 7 [-]$ . Což dovoluje možnost využití menšího (slabšího) zdroje otáčení. Přímé spojení ozubeného převodu a krokového motoru je zajištěno pomocí tzv. sklíčidla. Uchycení hřídele motoru lze provést pomocí dvou šroubů (viz obr. 36)

K zajištění a kontrole mezioperačních poloh se využívá optických senzorů (viz obr. 34).

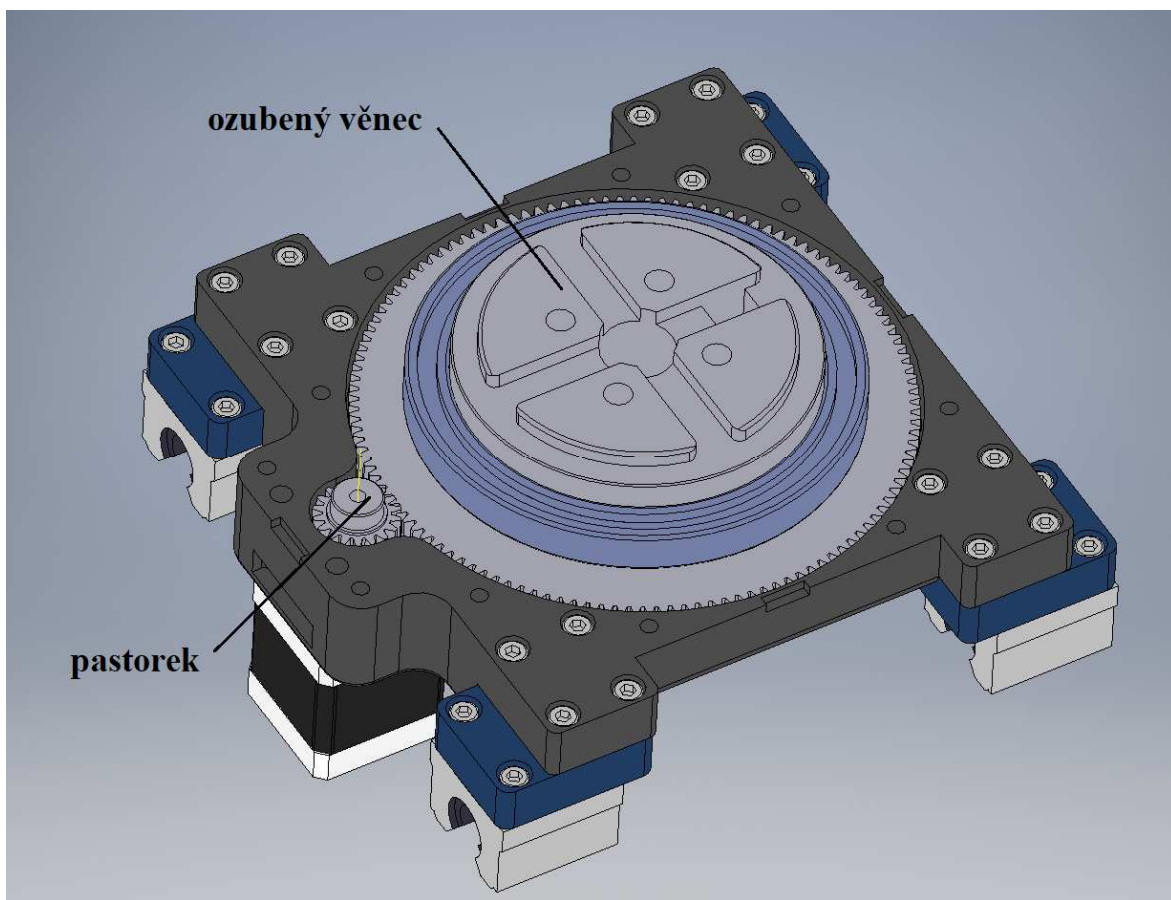


Obrázek 35: Otočný stůl

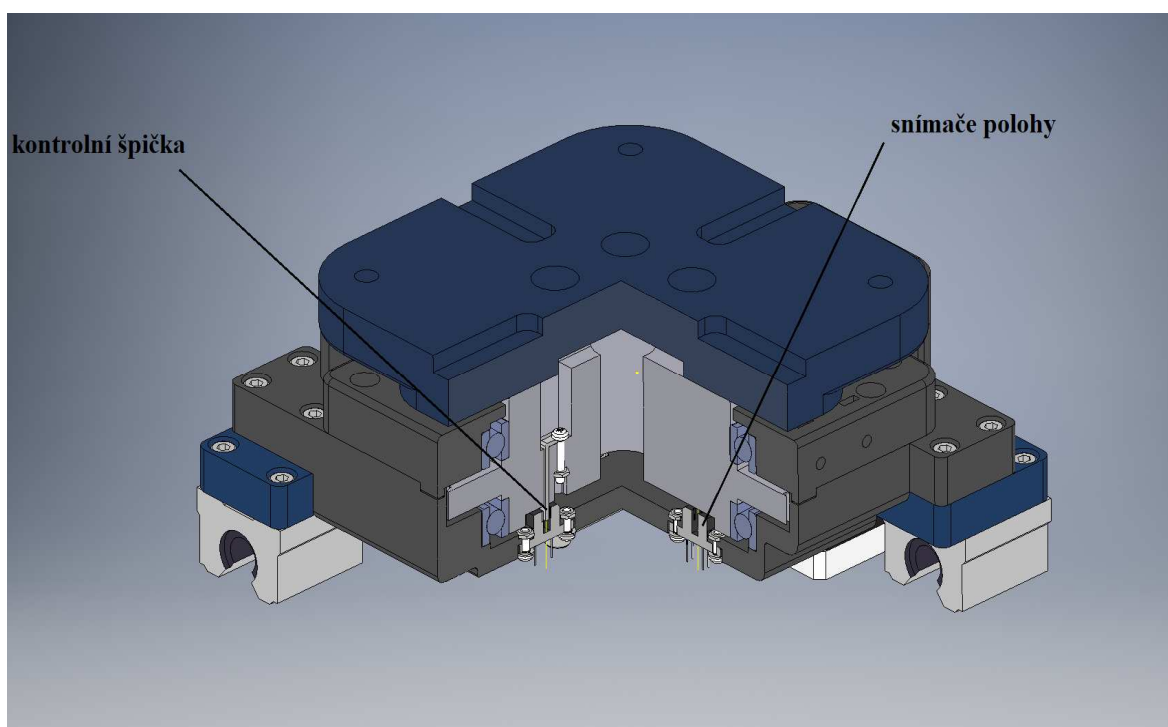


Obrázek 36: Spojení ozubeného převodu a krokového motoru

Umístění snímačů je znázorněné na obrázku 38. Zdrojem točivého momentu je krokový motor 42HS03 s přírubou Nema 17 typ B (Tab. 6).<sup>[22]</sup> Krokový motor 42HS03 má 8 vodičů a umožňuje bipolární (sériové a paralelní) a unipolární zapojení.



Obrázek 37: Princip konstrukce rotační pohybové jednotky



Obrázek 38: Princip polohování otočného stolu

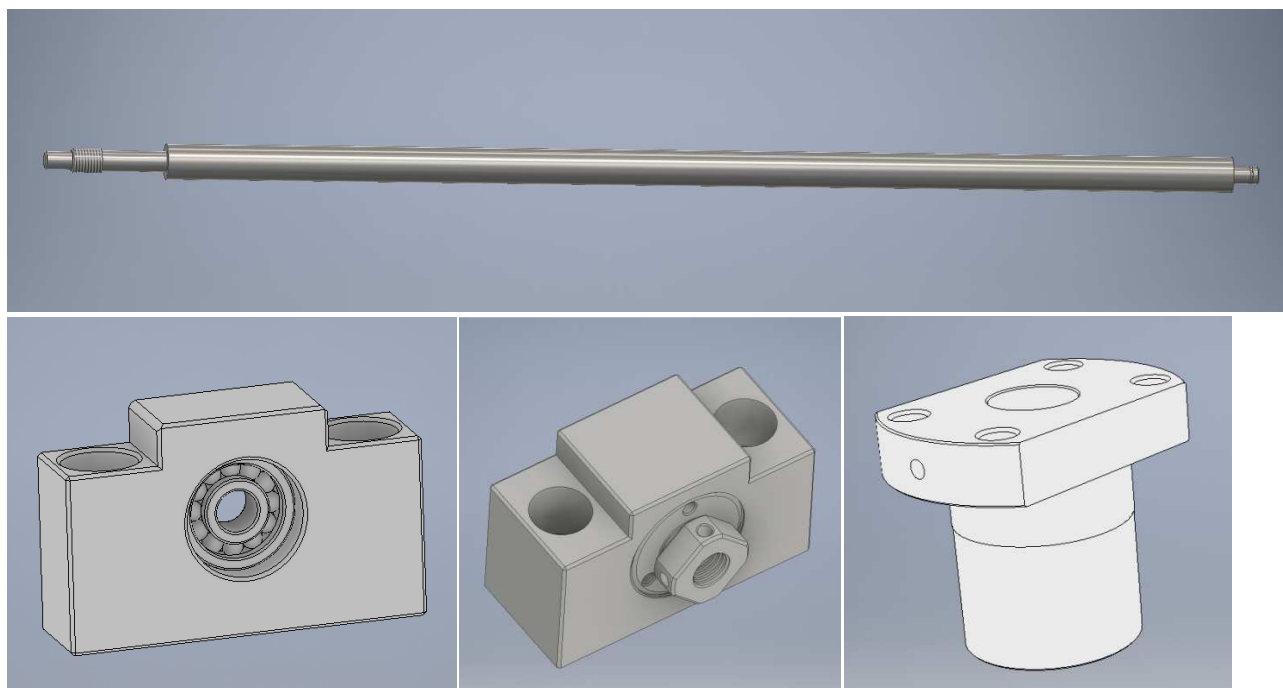
Uložení ozubených kol je na valivých ložiskách SKF 61821-2RS a SKF 61802-2RS s kontaktním těsněním z nitrilové pryže (NBR) zesílené ocelovým kroužkem na obou stranách ložiska. <sup>[21]</sup>

### Polohovací zařízení

Svislý pohyb efektoru zahrnuje dva základní pohyby: polohování efektoru a lokální pohyb (sběr nanovláknenné vrstvy číslo 2). Důležité je zajistit rotaci obou kartáčů proti směru translačního pohybu. To znamená, že nějaký krajní bod na povrchu kartáče musí opisovat stejnou dráhu jako svislý pohyb efektoru. Na základě těchto kritérií byla zvolena přesná polohovací jednotka s kuličkovým šroubem.

Rám polohovacího ústrojí byl výpalen z hliníkového plechu s tloušťkou 5 [mm] pomocí laseru (viz obr. 40).

Kuličkové šrouby jsou stavební prvky strojů, převádějící rotační pohyb na lineární s vysokou přesností a účinností, jíž je dosaženo použitím valivých elementů – kuliček. Podle způsobu výroby kuličkového závitu, a tomu odpovídající výsledné přesnosti, se kuličkové šrouby dělí do tří základních kategorií – válcované, okružované a broušené. Pro naše účely jsem zvolil válcovaný kuličkový šroub R1205-FSC-410-0-T7 (délka pracovní části 360[mm], opracování konců E2E2-08 a E5E-08) od firmy HIWIN (viz obr. 39). Tyto kuličkové šrouby se používají pro aplikace s menšími nároky na přesnost, ale s požadavkem příznivé ceny a rychlého dodání. Společně s nimi se používají standardní matice R12-05K4-FSC s rozměry odpovídajícími normě DIN69051 a ložiskové domečky EF-08 a EK-08 (viz obr. 39).<sup>[23]</sup>

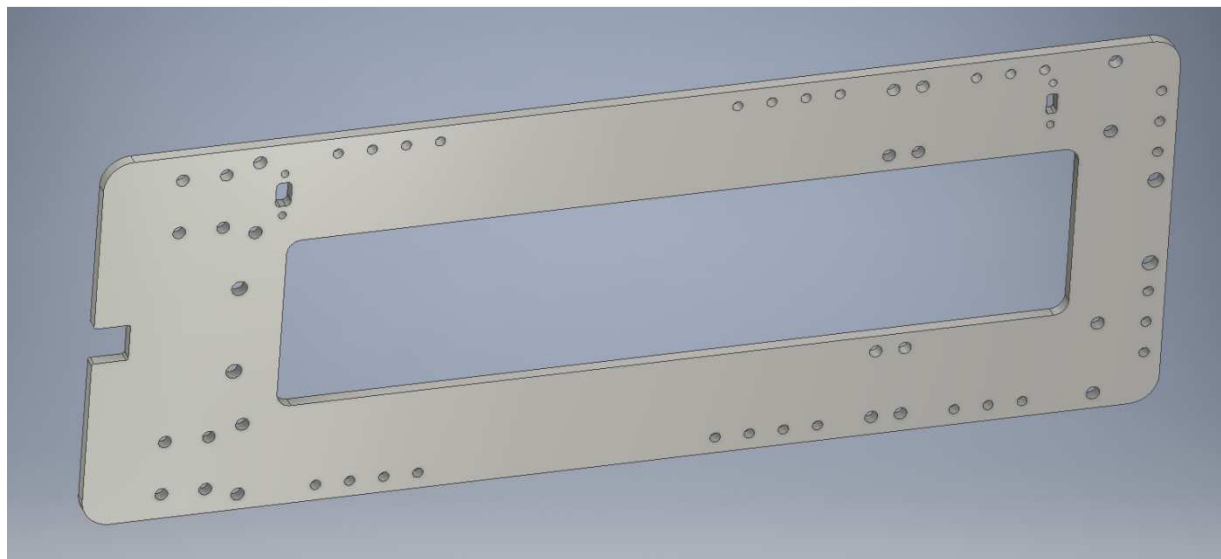


Obrázek 39: Sada výrobků HIWIN

Pro zajištění tlumení vibrací a možných rázů, byl kuličkový šroub spojen pomocí pružné spojky LK20-C25-6-8 (viz obr. 41).<sup>[24]</sup> Krokový motor 57HS09 přenáší mechanickou energii mezi kuličkovým šroubem pomocí ozubeného převodu s poměrem  $i = 1 [-]$  (viz obr. 46).

Vedení bylo realizováno sadou svislých nepodepřených tyčí o průměru 10 [mm], valivých ložisek SMA10L (viz obr. 42) a držáků SK10.<sup>[17]</sup>

Ke kontrole krajních poloh pohybu využívám optické senzory TCST2202 (viz obr. 34).



Obrázek 40: Rám polohovacího ústrojí

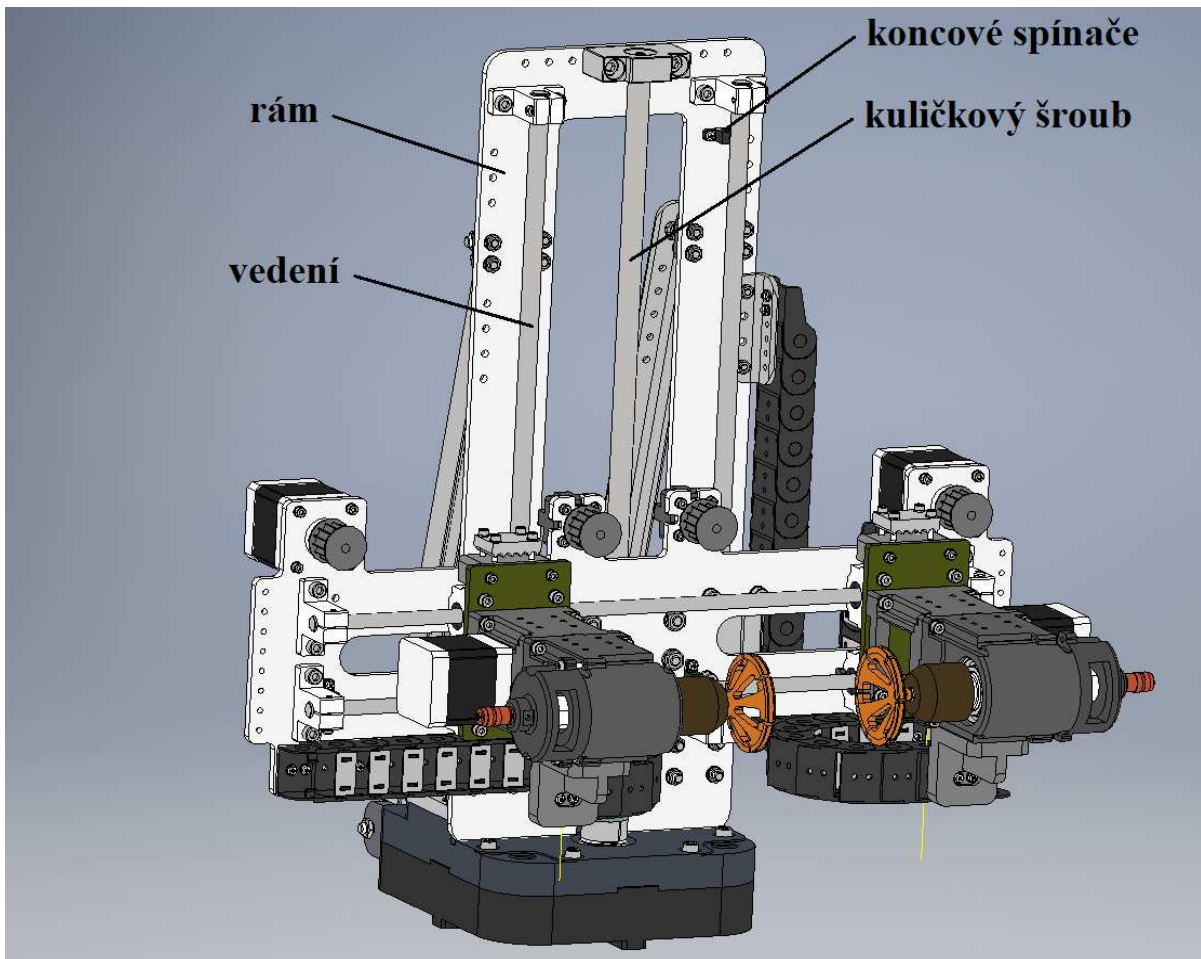


Obrázek 41: Pružná spojka LK20-C25-6-8<sup>[24]</sup>

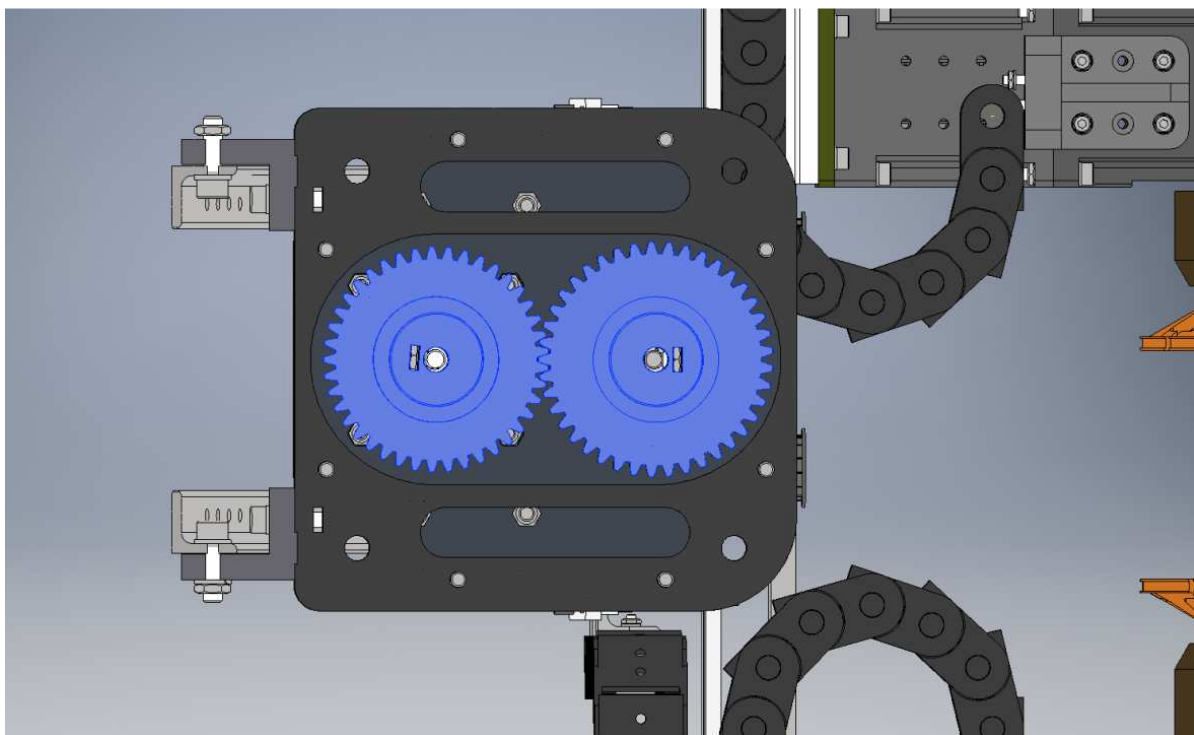


Obrázek 42: Ložisko SMA10L<sup>[17]</sup>

Uložení ozubených kol je na valivých ložiskách SKF 16006-2RS s kontaktním těsněním z nitrilové pryže (NBR) zesílené ocelovým kroužkem na obou stranách ložiska.<sup>[21]</sup>



Obrázek 43: Polohovací jednotka



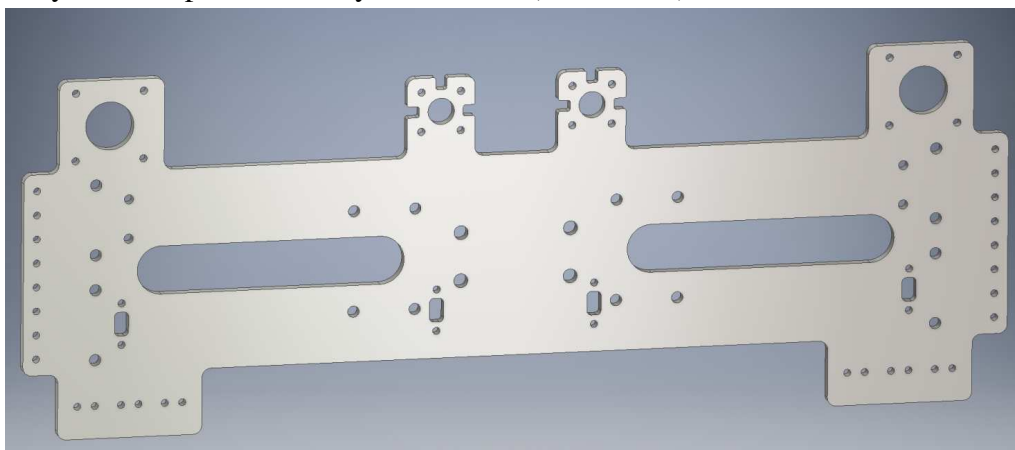
Obrázek 44: Ozubený převod

## Efektor

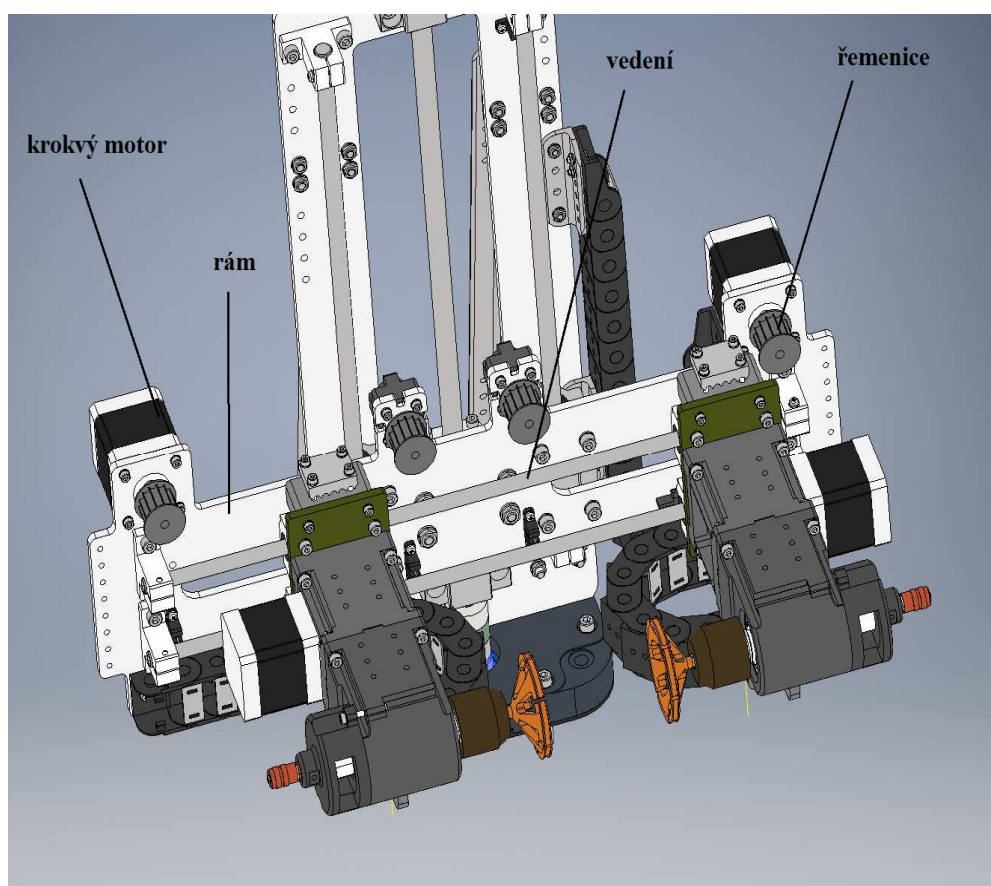
Připomínám, že na základě technického zadání není pevná poloha tyče karuselu zajištěna a musí se měnit podle požadavků. Pracovní pohyb uvnitř efektoru obsahuje rotace kartáčů a translační pohyb pro nastavení vzdálenosti mezi kartáči. Konstrukce a pohon obou kartáčů jsou úplně stejný.

Základní rám efektoru byl výpalen z hliníkového plechu s tloušťkou 5 [mm] pomocí laseru (viz obr. 45).

Vedení pro translační pohyb je cylindrické, nepodepřené a zahrnuje sadu podpěr SK8, tyče W8 a ložiska SMA8L.<sup>[17]</sup> Pohonný aparát byl zajištěn pomocí řemenového převodu a obsahuje krokové motory 42HS03, řemenice 14-5M-15 a řemeny HTD 5M 15 (viz obr. 32).<sup>[18]</sup> Ke kontrole krajních poloh pohybu využívám optické senzory TCST2202 (viz obr. 34).



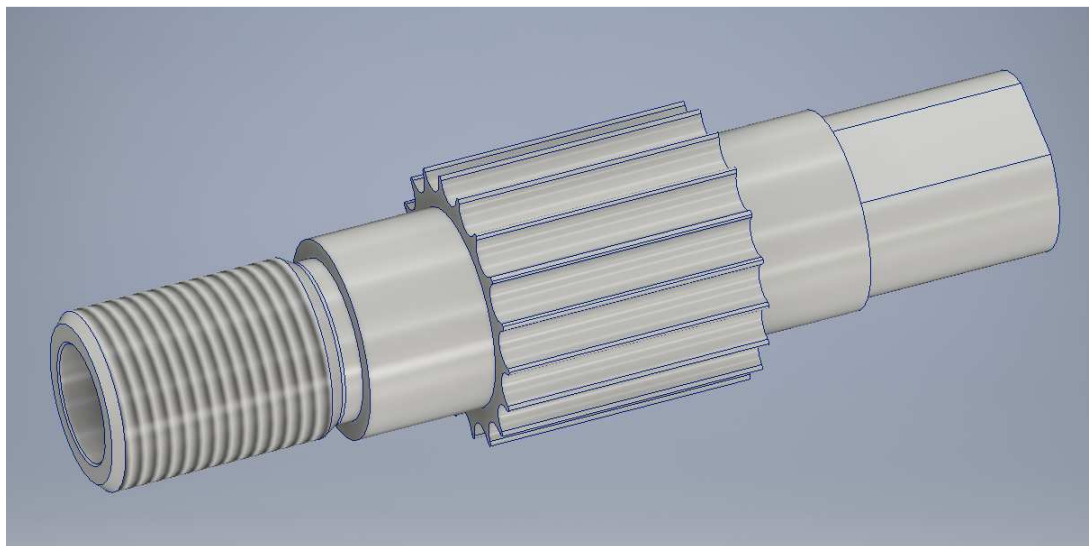
Obrázek 45: Rám efektoru



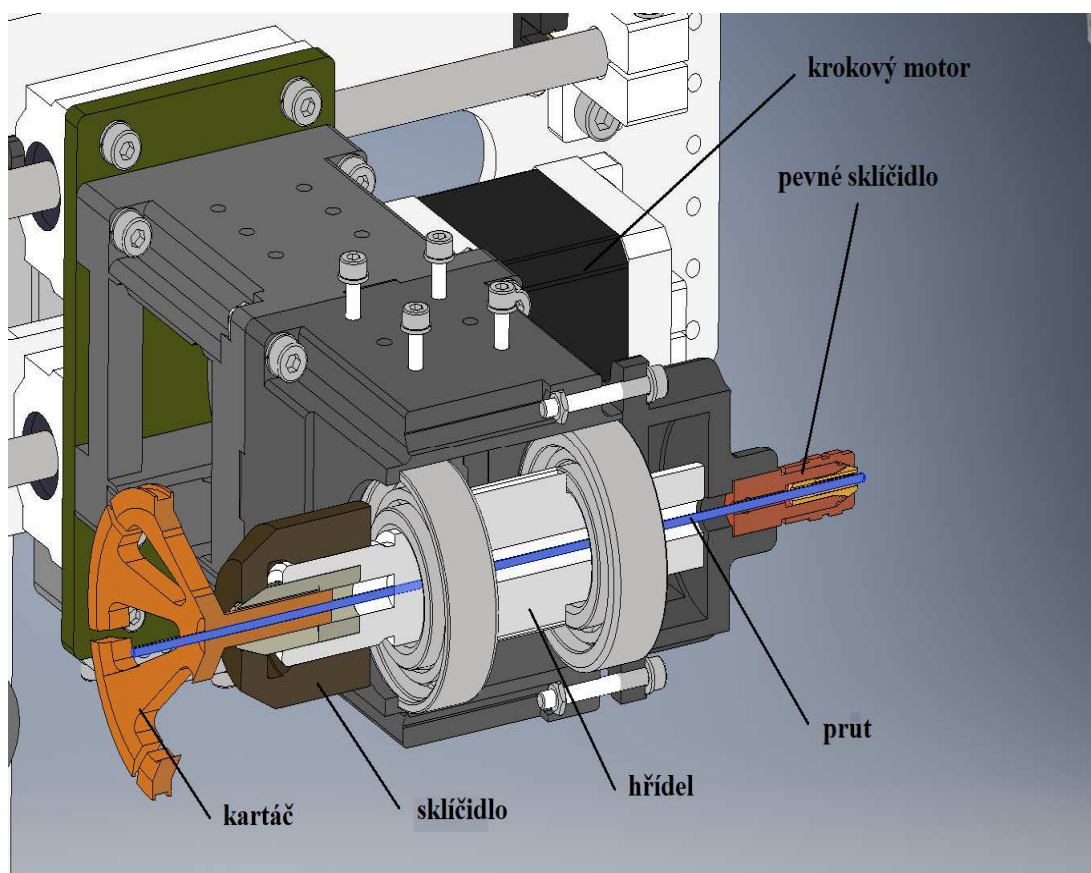
Obrázek 46: Translační pohybová jednotka efektoru

K zajištění rotačního pohybu kartáče byl použit řemenový převod, který obsahuje hřídel vlastního provedení PO002-10 (5M-18) (viz obr. 47), řemenice 18-5M-15, řemen HTD 5M 15 a krokový motor 42HS03.<sup>[22]</sup> Hřídel byl vyroben ze základu hliníkové řemenice na CNC stroji MAZAK Integrex 100-IV.

V jmenovitých místech hřídele jsou umístěna sklíčidla, nepohyblivá a rotující, která slouží k upnutí kartáče a pevných prutů (pevné podklady nebo kotevní body (A a B), obr. 29), (viz obr. 48).

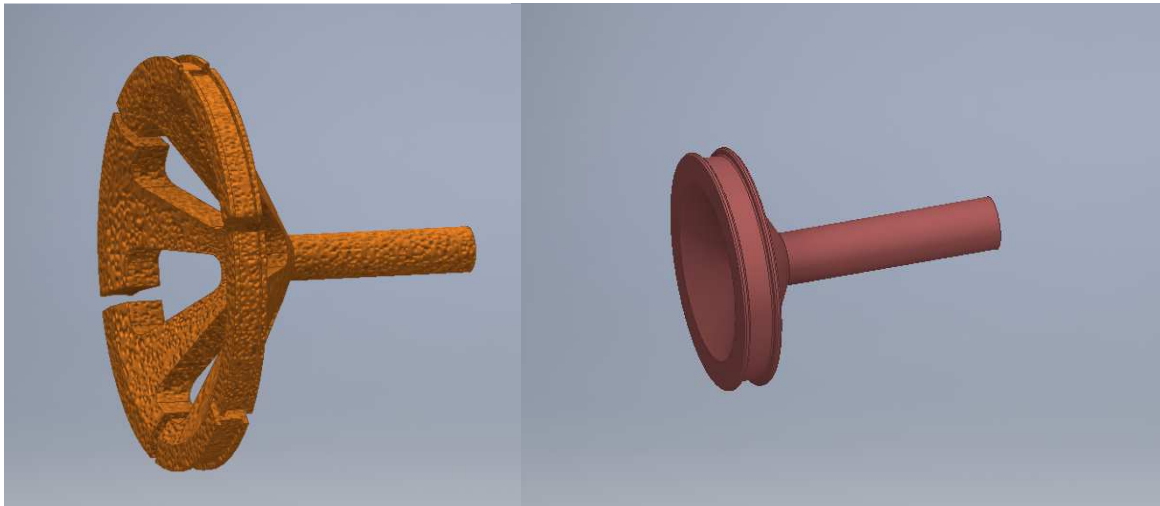


Obrázek 47: Hřídel PO002-10 (5M-18)



Obrázek 48: Konstrukce efektoru





Obrázek 49: Kartáče

Pro experimenty sběru a formování nanovláknenných dílů se dá použít několik druhů kartáčů, různých forem a velikosti profilů (viz obr. 49).

Uložení hřídele PO002-10 (5M-18) je na valivých ložiskách SKF 6000-2RS a SKF 61802-2RS s kontaktním těsněním z nitrilové pryže (NBR) zesílené ocelovým kroužkem na obou stranách ložiska.<sup>[21]</sup>

V konstrukci pohonu byly použity vodící řetězy 15BF02.20 (viz obr. 50).<sup>[25]</sup> Vodící řetězy – plastové články pro uložení kabelů a hadic spojující pevnou a pohyblivou část stroje nebo technologie. Při pohybu se řetěz ohýbá s definovaným poloměrem a chrání mechanicky svou náplň a současně je celá sestava nuceně vedena s povoleným poloměrem ohybu.



Obrázek 50: Vodící řetěz<sup>[25]</sup>

Veškeré díly, jako skříně, ozubené převody, kartáče atd. byly vyrobeny pomocí technologie 3D tisku. 3D tisk neboli aditivní výroba (anglicky 3D printing neboli additive manufacturing (AM)) je proces tvorby třídimenzionálních pevných objektů z digitálního souboru (Additive Manufacturing

File - AMF). V aditivních procesech je objekt vytvořen pokládáním souvislých vrstev materiálu, dokud není celý projekt dokončen. Každá z těchto vrstev může být považována za úzce rozříznutou horizontální sekci daného objektu.<sup>[26]</sup>

Velkou část těchto dílů by bylo možné vyrobit z hliníku pomocí klasických metod třískového obrábění. Ale finanční a časové náklady spojené s návrhem a zakázkovou výrobou hliníkových dílů by byly vyšší.

Technické parametry mikromanipulátoru jsou uvedeny v tabulce 5.

K návrhu 3D modelu a vizualizaci byl použit software Autodesk Inventor 2016, Autodesk®.

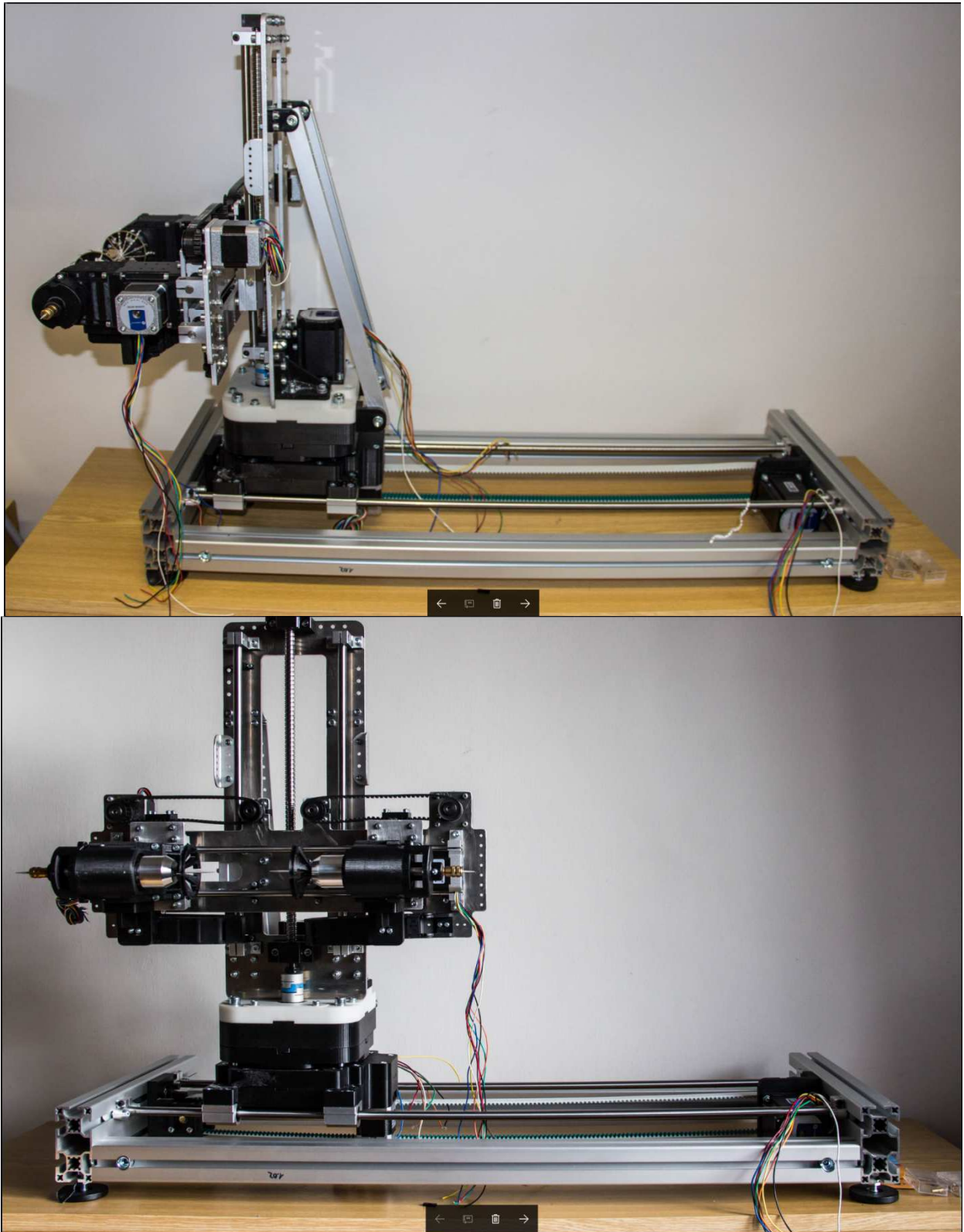
Tabulka 5: Technické parametry mikromanipulátoru

Parametr		Hodnota	Jednotky
Hlavní rozměry	šířka:	880	[mm]
	hloubka maximální:	468	[mm]
	hloubka rámu	200	[mm]
	výška:	638 max 660	[mm]
Translační pohyb pojezdu		502	[mm]
Natočení stolu		270°	[–]
Svislý translační pohyb		260	[mm]
Nastavitelná vzdálenost mezi kartáče		0...180	[mm]
Hmotnost		cca 14,4	[kg]
Provozní teplota		+10 až +60	[°C]
Zdrojová energie motorů	proud:	až 0,4	[A]
	napětí:	DC36	[V]

Vzhledem k malému zatížení mikromanipulátoru (malé hmotnosti, žádné namáhání,) nebyly provedeny pevnostní a kontrolní výpočty řetězů, vedení, ložisek, kuličkového šroubu atd.. Velikosti motorů byly volené na základě rozměrové analýzy, hmotnosti a finančních možností. Potřebné rychlosti, momentové a silové namáhání pohybu pojezdu, rotace stolu a pohybu polohovací jednotky jsou mnohem menší než možnosti zvolených pohonů.

Konstrukční dokumentace a technické výkresy k tomuto stroji jsou v příloze číslo 2.

Mikromanipulátor byl vyroben a postaven (viz obr. 51), v průběhu výroby, stavby a testování docházelo k určitým vadám. Na začátku bylo vyvinuto a postaveno nepodepřené cylindrické vedení (pojezd), které odpovídalo pevnostním požadavkům, ale ve finále lehce kmitalo. Došlo tedy k modifikaci a nepodepřené cylindrické vedení bylo nahrazeno cylindrickým podepřeným vedením, čímž došlo k zvýšení stability konstrukce.

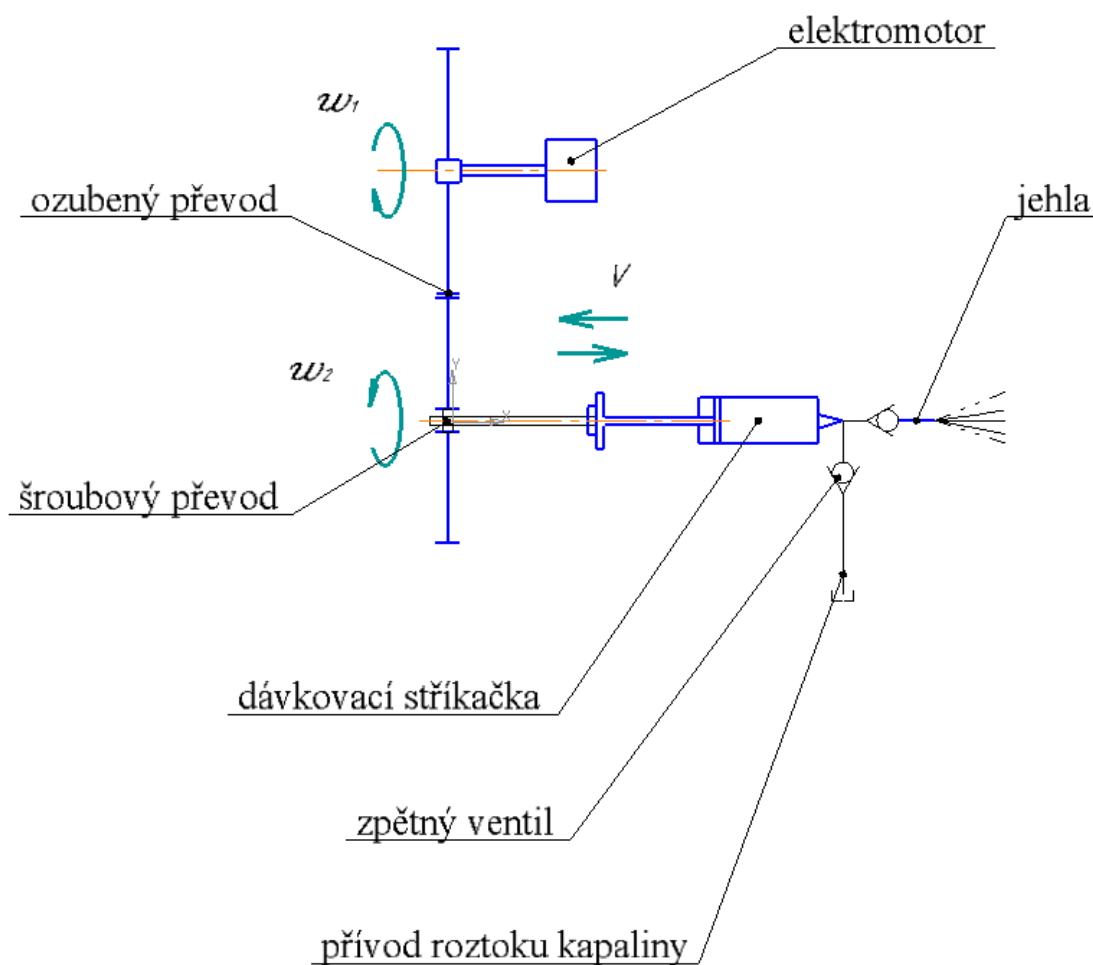


Obrázek 51: Mikromanipulátor

### 3.1.1 Návrh dávkovacího zařízení

Navržené dávkovací zařízení je univerzální a může být použito k rozprašování roztoku dovnitř nebo na povrch nanovláknenného materiálu. Lze ho použít i jako dávkovací zařízení na elektrostatické zvlákňování.

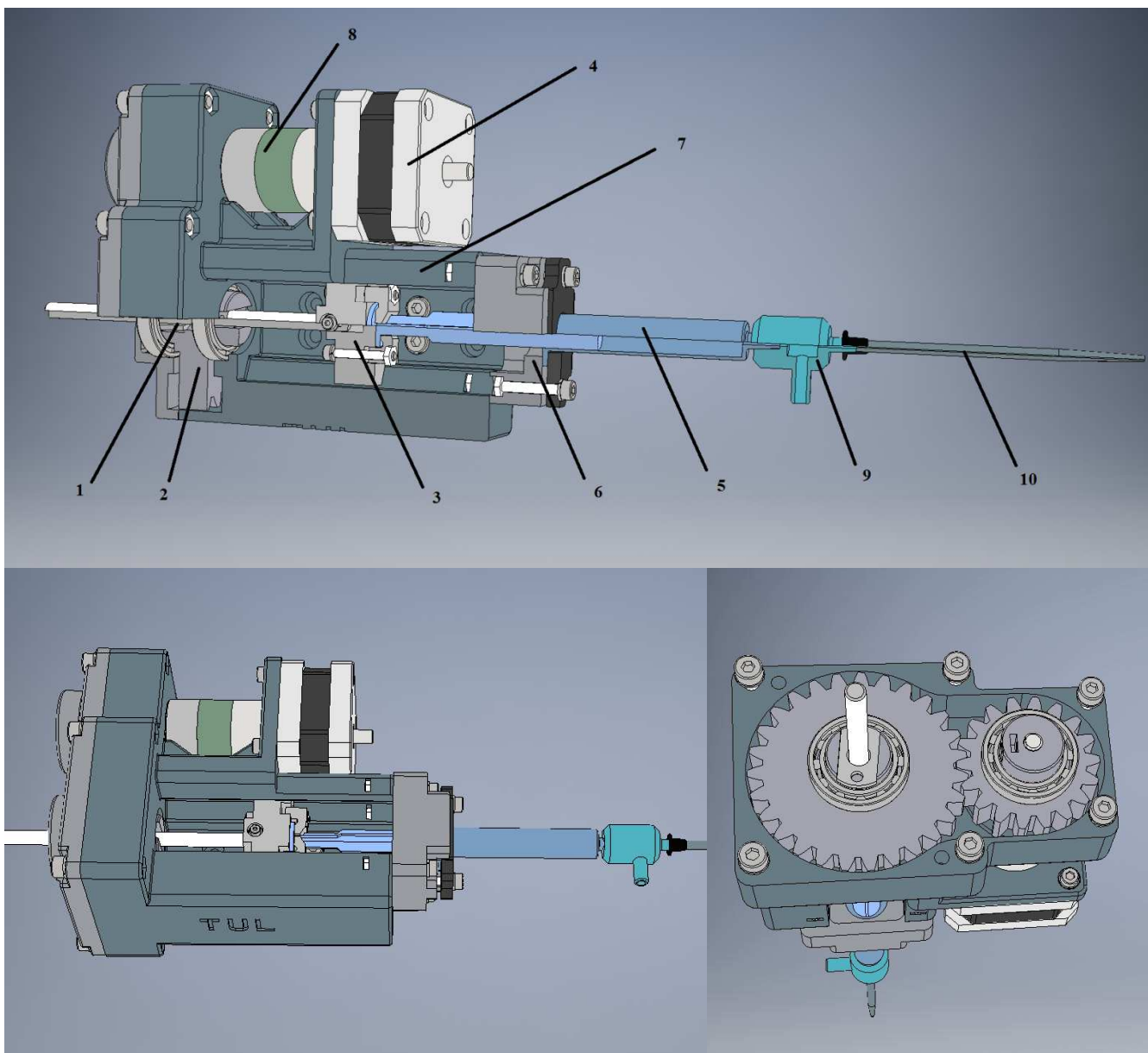
Dávkovací zařízení nebo dávkovací hlava slouží k stálému dávkování roztoku. Stroj a jeho správná funkčnost je podmíněna řadou parametrů, které jsou dány kinematickým řetězcem (viz obr. 52), který ale není ohraničen pouze mechanikou. Fyzikální princip řízeného pohonu je založen na ovládní polohy a pohybu pístu stříkačky. Tím je dosaženo přesného dávkování roztoku kapaliny v závislosti na čase.



Obrázek 52: Základní schéma mechanismu dávkování

3D model dávkovacího zařízení je znázorněn na obr. 53. Hadice přívodu pracovní kapaliny, nádrž, na obrázku není znázorněno. Zařízení dle obr. 53 se skládá z následujících základních součástí:

1. Šroubový převod
2. Ozubený převod
3. Vedení
4. Krokový motor
5. Stříkačka
6. Nástavec
7. Skříň
8. Pružná spojka
9. Zpětný ventil
10. Jehla



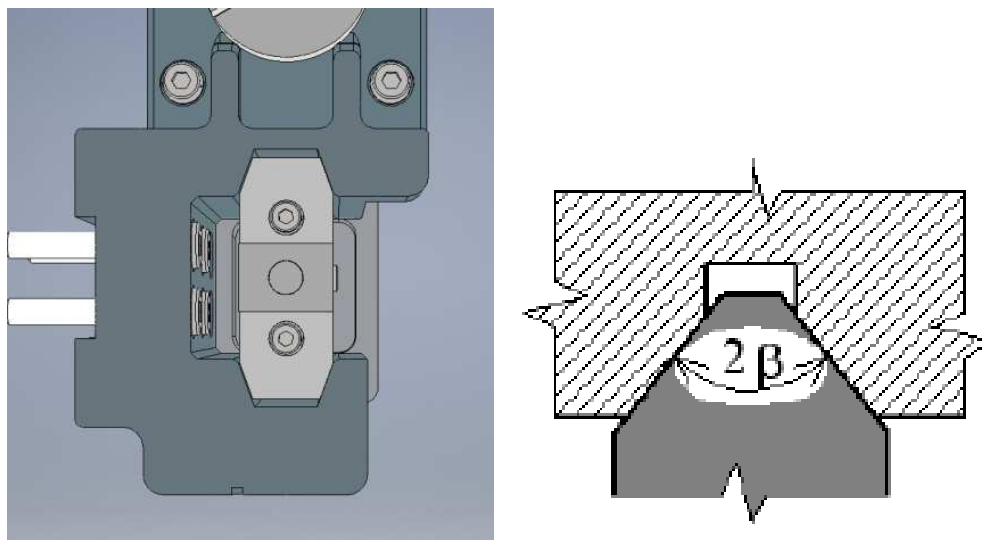
Obrázek 53: 3D model dávkovacího zařízení

Šroubový převod je konstrukční prvek pohybového ústrojí, který převádí rotační pohyb na přímočarý pohyb. Kvůli snížení ceny experimentálního zařízení a malé zátěži převodu se používá standardní matice a šroub M5x0,8 stoupání šroubu  $h=0,8$  [mm/ot].

V běžných šroubových převodech se používá lichoběžníkový závit, matice se vyrábí zvlášť z bronzu a šroub z tvrzené oceli. Nebo v případě stálého využití dávkovacího zařízení a velkého počtu pracovních cyklů, by bylo nejlepší cestou nahradit šroubový převod kuličkovým šroubem s malým průměrem. Kuličkový šroub má v porovnání s běžnými kluznými posuvnými šrouby výrazně vyšší účinnost a nižší potřebný točivý moment, což šetří energii hnacího motoru.

Ozubený převod se skládá z dvojice čelních kol s přímými zuby. Převod je málo zatížen a kvůli tomu je vyroben z plastu pomocí 3D tisku. <sup>[26]</sup> Převodový poměr je  $i = 1,5[-]$  kvůli zesílení točivého momentu na hnaném kole.

Vedení je tvořeno tělesem skříně s prismatickými drážkami, v níž klouže odpovídající hranol (viz obr.54). Úhel uložení  $\beta = 20^\circ$ , maximální rychlost posuvu je 9,4 [mm/s]. Součásti vedení jsou vyrobeny pomocí 3D tisku z plastu.



Obrázek 54 - Prismatické vedení

### Elektromotor

Zdrojem točivého momentu stroje je krokový motor 42HS03 (Tab. 6) s přírubou Nema 17 typ B. Krokový motor 42HS03 má 8 vodičů a umožňuje bipolární (sériové a paralelní) a unipolární zapojení. <sup>[22]</sup> Podle potřeby se dá motor zapojit různými způsoby, záleží na tom, co je potřeba získat ve výsledku. V stavěném zařízení bylo použito bipolární sériové zapojení pro získání většího momentu. Kontrola krajních poloh pohybu pístu je založeno na přetížení motoru a je řízeno pomocí softwaru.

Kvůli snížení možných rázů a vibrací jsou hřídele motoru a dalšího převodu spojeny prostřednictvím pružné spojky LK20-C25-5-5. <sup>[24]</sup>

Tabulka 6: Parametry krokového elektromotoru 42HS03 <sup>[22]</sup>

Parametr	Hodnota	Jednotky
Instalační příruba	Nema17 typ B	[–]
Kroků na otáčku	200 Kroků / 1.8° krok	[–]
Počet vodičů	8	[–]
Provozní proud	1,0	[A]
Max. proud (špičkový)	2,0	[A]
Napájecí napětí	DC 12 až 36	[V]
Max. moment	0,44	[Nm]
Délka motoru	48	[mm]
Šířka/Výška motoru	42x42	[mm]
Průměr osy	5	[mm]
Průměr instalačních otvorů	3	[mm]
Instalační rozteče	31x31	[mm]
Provozní teplota	-10 až +50	[°C]
Hmotnost	0,34	[kg]

Sada zpětných ventilů zajišťuje průtok média jedním směrem, respektive nedovolí průtok směrem opačným. V našem případě to zajišťuje možnost stálého nabíjení dávkovací stříkačky kapalinou z nádrže bez nutnosti úplného zastavení stroje. Skládá se ze dvou zpětných ventilů. První je umístěn na výstupu z nádrže, druhý mezi stříkačkou a jehlou (viz obr.13).

V současné době není konstrukce ani druh zpětných ventilů navržen, stejně tak ani konstrukce a umístění nádrže s kapalinou.

#### Dávkovací stříkačka

V konstrukci dávkovací hlavy je založena obecná lékařská stříkačka s objemem 3 [ml]. Pomocí výměny nástavce existuje možnost použít stříkačku s objemem 1 až 20 [ml].

Základní parametry dávkovacího zařízení jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Základní parametry dávkovacího zařízení

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotky
Maximální průtok kapaliny	$Q_V$	0,6	[ml/s]
Objem dávkované kapaliny na jednu otáčku elektromotoru	$V_l$	0,034	[ml/ot]
Maximální rychlost posuvu pístu stříkačky	$v$	9,4	[mm/s]
Běžná rychlost posuvu pístu stříkačky	$v_B$	1,77	[mm/s]
Objem stříkačky	$V$	3	[ml]
Celkový zdvih stříkačky	$c$	47	[mm]
Převod	$i$	1,5	[–]
Stoupání šroubu	$h$	0,8	[mm/ot]
Maximální otáčky elektromotoru	$n_{max}$	1057,5	[ot/min]
Běžné otáčky elektromotoru	$n_B$	200	[ot/min]
Maximální moment motoru	$M_{max}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$	[N · m]
Maximální moment na šroubu	$M_S$	$0,81 \cdot 10^{-3}$	[N · m]
Maximální výkon elektro motoru	$P_{max}$	0,25	[W]

Tabulka 8: Technické parametry dávkovací hlavy

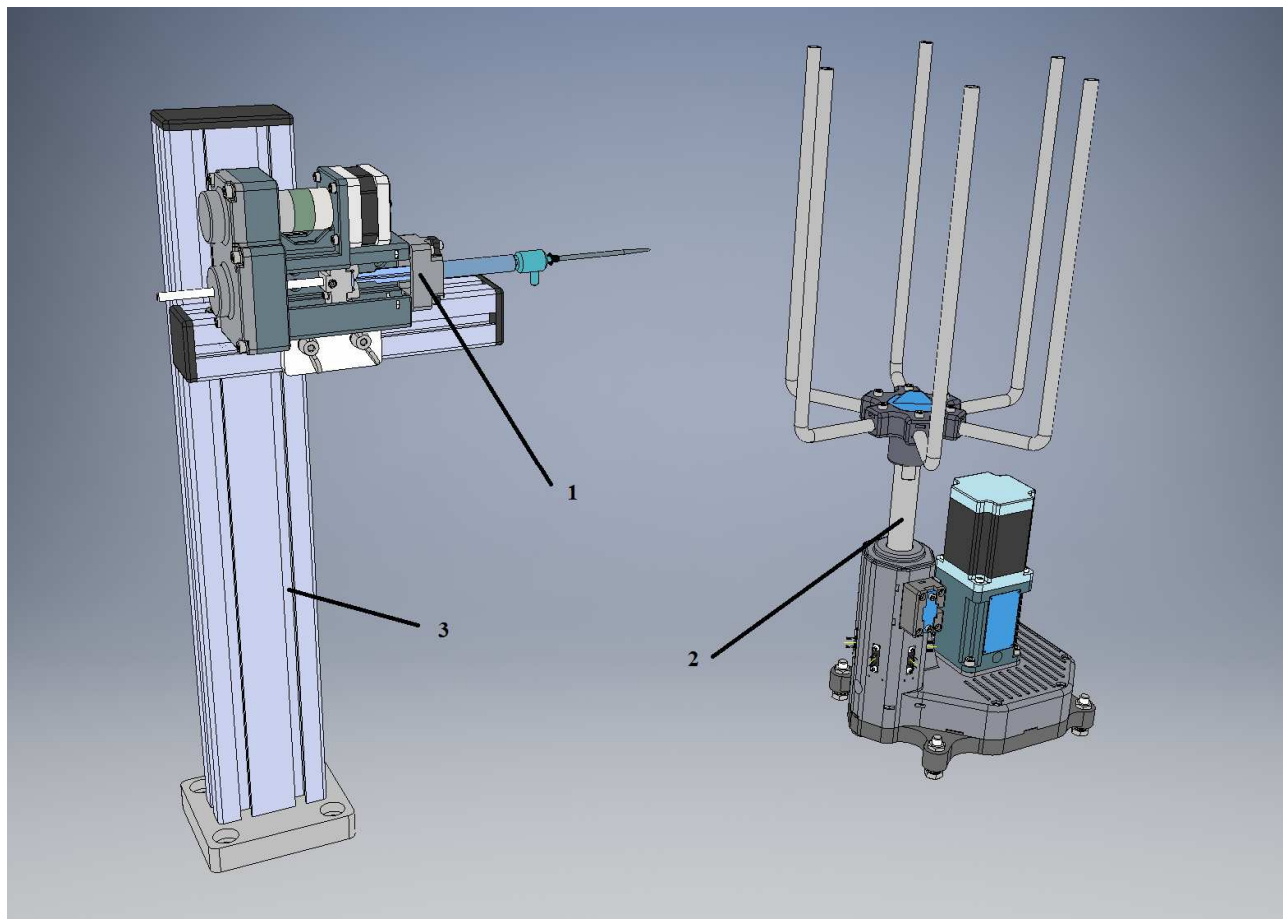
Parametr	Hodnota	Jednotky
Hlavní rozměry	šířka:	100
	hloubka:	32
	výška:	197 max 242
Hmotnost	cca 0,89	[kg]
Provozní teplota	+10 až +60	[°C]
Zdrojová energie motorů	proud:	až 0,4
	napětí:	DC36

K návrhu 3D modelu a vizualizaci byl použit software Autodesk Inventor 2016, Autodesk®.

Výpočet základních parametrů dávkovacího zařízení je uveden v příloze 1.

Potřebujeme-li použít metodu výroby a formování vícevrstvého nanovlákného dílu, musíme vybavit výrobní linku dávkovacím zařízením na rozprašování kapaliny.





Obrázek 55: Zařízení pro rozprašování kapaliny na vnější povrch nanovláčného materiálu

Schématický 3D model experimentálního zařízení í se dle obrázku 55 skládá z následujících základních součástí:

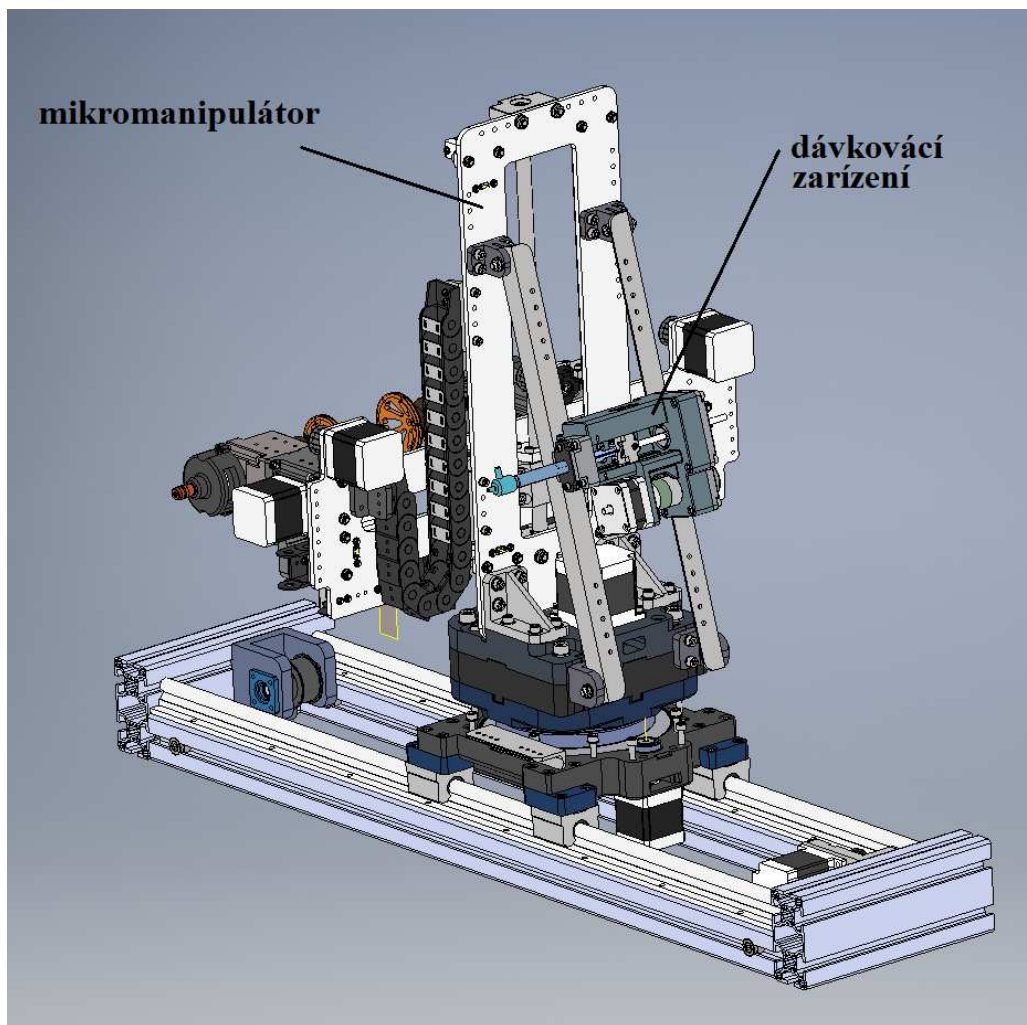
1. Dávkaovací zařízení
2. Karusel
3. Stojan

Elektrické zařízení (zdroj vysokého napětí, napájecí a zemnicí elektroda, kabely atd.), není na obrázku znázorněno.

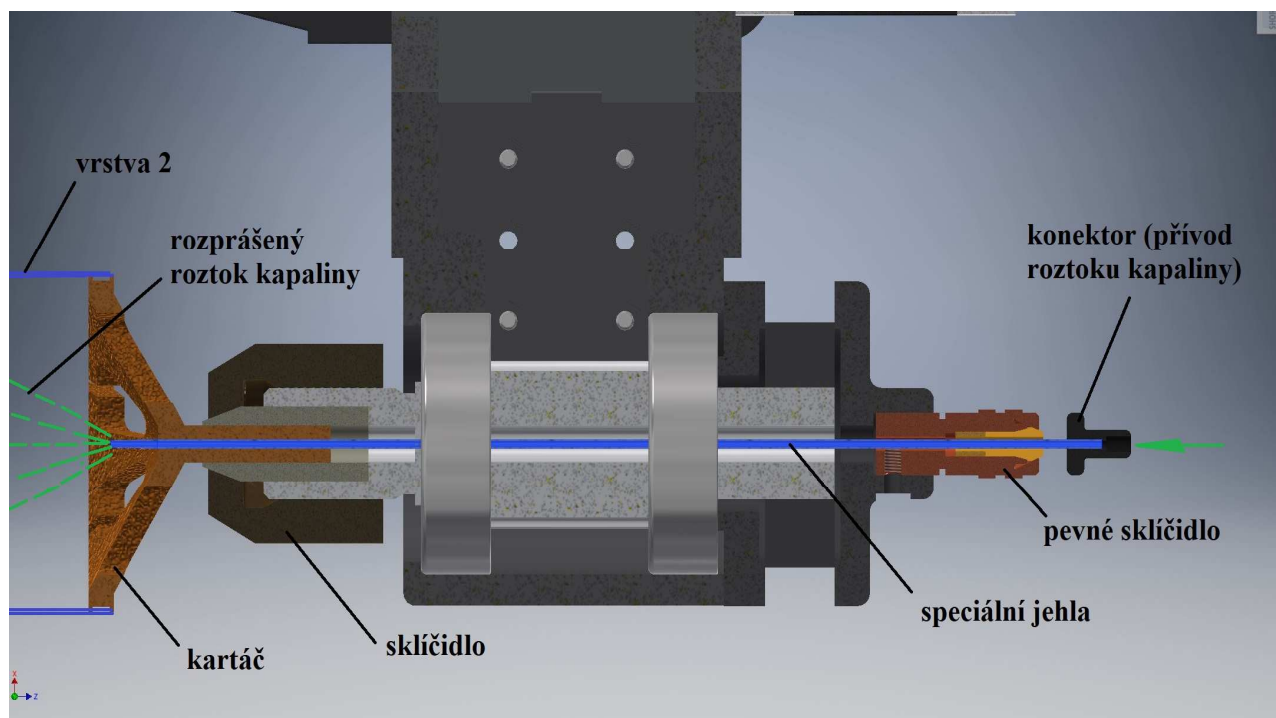
Stojan je tvořen hliníkovými profily od firmy MayTec s jednotným rastrem upínacích drážek a děr. Výhodou je variabilita konstrukce, rychlá a snadná montáž, možnost dodatečné úpravy a doplnění, dostatečná pevnost a tuhost. <sup>[16]</sup>

Hliníkové díly jsou zhotovené z materiálu Al Mg Si 0,5 F 25 dle DIN 3.3206.72 a opatřené eloxem o minimální tloušťce 10 [μm] a tvrdosti 250 – 350 HV. Povrch je anodizován a je tak permanentně odolný proti poškrábání a další oxidaci.

V případě rozprašování dovnitř nanomateriálu (viz. obr. 11) se dá dávkaovací stroj umístit na tělo mikromanipulátoru (viz. obr. 56). Zařízení se liší tím, že místo pevných prutů (viz. obr. 48) přes hřídel je použita speciální jehla (viz. obr. 57). Skutečný tvar této jehly ještě nebyl navržen.



Obrázek 56: Zařízení pro rozprašování kapaliny dovnitř nanomateriálu



Obrázek 57: Princip rozprašování dovnitř nanomateriálu

Zařízení umožňující rozprašování kapaliny dovnitř nebo na vnější povrch nanovláknenného materiálu dosud nebylo vyrobeno ani testováno. Myslím, že nejdůležitější parametry k zajištění správné funkce rozprašování je tvar jehly a druh kapaliny. Návrh těchto parametrů je téma mnohem širší než tato diplomová práce. Tato koncepce potřebuje, další vývoj a experimenty. Lze v této oblasti na tuto práci navázat. Jako základní metodu pro tuto diplomovou práci uvažuji metodu s využitím principu drawing.

## 4 Ověření funkčnosti a testování zařízení

Funkčnost zařízení byla odzkoušena na Katedře netkaných textilií a nanovlákných materiálů. Výsledky prokázaly, že zařízení je způsobilé tvorby nanovlákné příze. Detaily testování jsou uvedeny dále v této části.

Výrobou roztoku se zabývala Ing. Andrea Klapšťová, proces ovládní manipulátoru a procesu elektrostatického zvlákňování měl na starosti Ing. Andrii Shynkarenko.

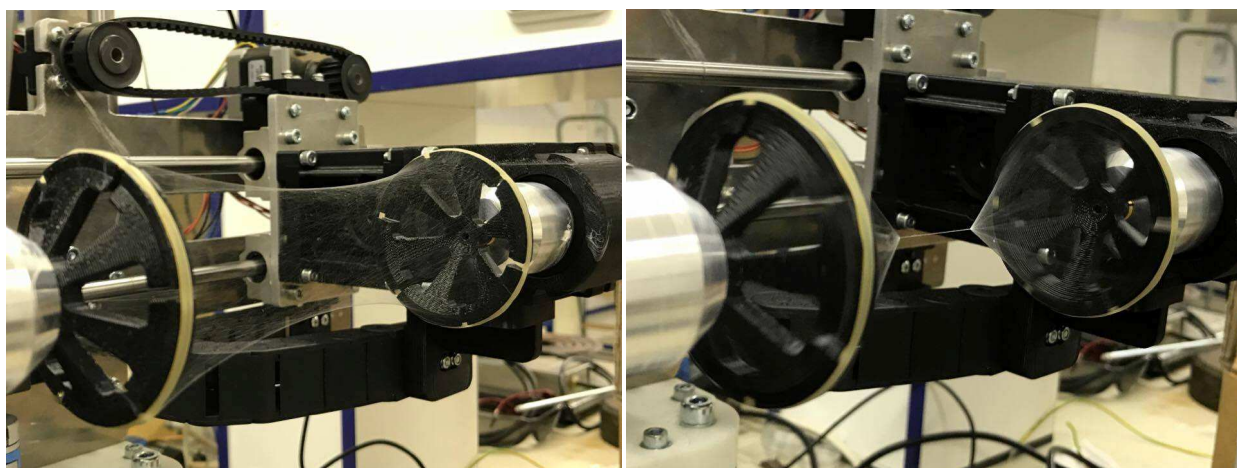
Funkční prototyp zařízení byl testován v laboratoři s použitím následujících materiálů:

- polyvinylidenfluorid (PVDF; Mw: 180 000 g/mol) od výrobce Sigma Aldrich,
- polyethyleneoxide (PEO; Mw: 900 000 g/mol) od výrobce Sigma Aldrich,
- dimethylacetamide (DMAC; purity  $\geq 99\%$ ) od výrobce Penta Chemicals.

Roztok byl připraven s využitím PEO 1 [hm. %] a PVDF 16,7 [hm. %] s využitím rozpouštědla DMAC při teplotě 60 °C. Tento materiál byl vybrán, protože má velmi dobré elastické mechanické vlastnosti. Roztok polymeru byl magneticky míchán po dobu 4 hodin při 60[° C], aby se umožnilo úplné rozpuštění před elektrospinningem. Elektrostatické zvlákňování probíhalo také při teplotě 60 [° C]. Polymerní roztok byl zahříván za použití speciálního zařízení pro zahřívání roztoku v injekční stříkačce. Roztok byl tlačěn ze stříkačky ve směru kolektoru s opačným nábojem cca. 20 [min]. Napětí na špičce jehly bylo nastaveno na 15[kV] (kladné) a na kolektoru bylo nastaveno na 4 [kV] (záporné). Vzdálenost mezi jehlou a kolektorem byla 15 [cm] a vzdálenost mezi rameny kolektoru byla 10 cm. Rychlost otáčení kolektoru byla 50 [ot/min]. Sběrač byl napájen regulovaným DC napájením od napájecího zdroje RXN-302D-3. Všechny experimenty byly prováděny při teplotě 21 [° C] a relativní vlhkosti 60 %.

Sběr nanovláken z rotujícího sběrače může probíhat dvěma způsoby. Rozdíl je v dopadu sběracích disků na kolektor a jejich rychlost otáčení. V prvním případě se sběrací kartáče lehce dotýkají plátna s nanovláknem a pohybují se směrem dolů. Rychlost otáčení kartáče odpovídá rychlosti sestupu směrem dolů. Obvod kotouče tak prochází přes povrch nanovlákného plátna. Ve druhém případě se kartáče pohybují co nejvíce u kolektoru. Směr otáčení kartáčů zůstává stejný (ve směru hodinových ručiček), avšak rychlost rotace klesá.

Obrázek 58 zobrazuje výsledky provozu zařízení.

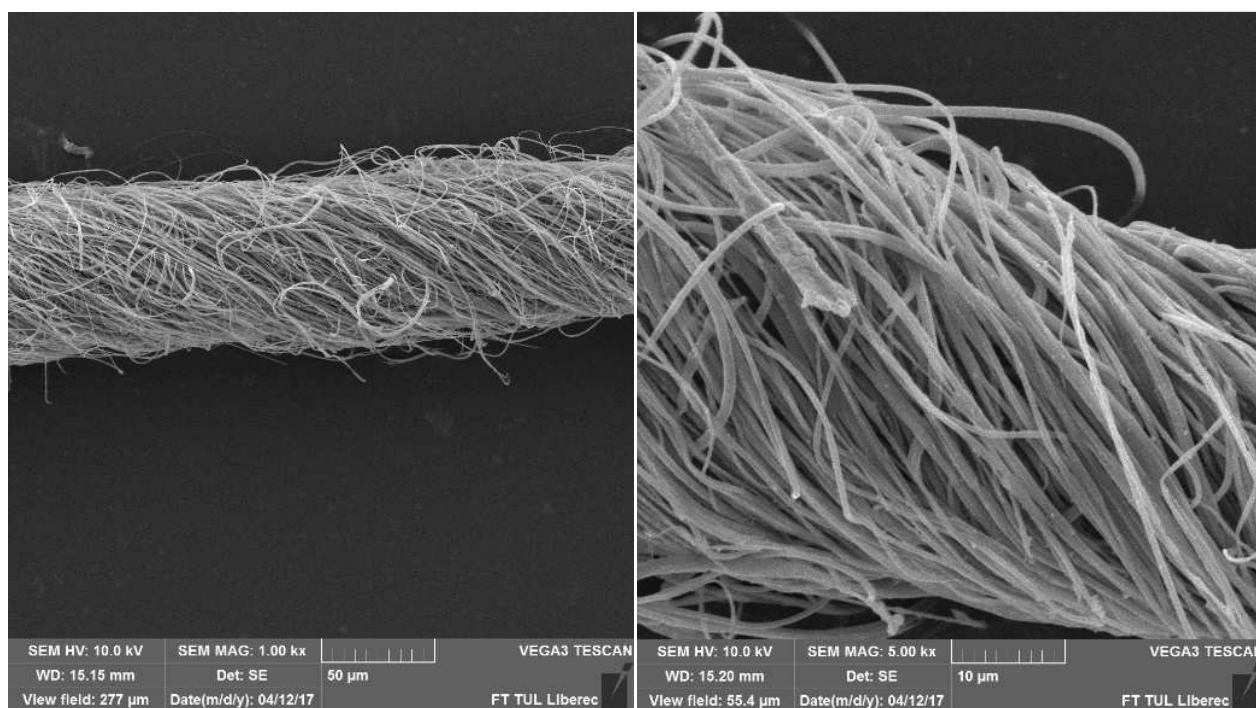


(a)

(b)

Obrázek 58: Výsledky provozu zařízení: a) sebraná nanovlákná z rotačního kolektoru; b) zkroucená nanovláknenná vlákna

Topologie vytvořených nanovláknenných přízí byla studována pomocí elektronového mikroskopu (SEM, Tescan Vega 3SB Easy Probe). Vlákna byla pokryta povlakem 7 [nm] zlata. Hodnocení morfologie vláken bylo provedeno softwarovým programem NIS Elements AR 3.2. Obrázky nanovláknenných vrstev jsou zobrazeny na obrázku 59. Průměr vlákna vyrobené příže byl  $980 \pm 120$  [nm].



(a)

(b)

Obrázek 59: SEM mikroskopie vyrobené nanovláknenné příže vyrobené z PEO / PVDF: (a) zvětšení 1.000x (b) zvětšení 5.000x

## **Závěr**

Hlavní funkcí mikromanipulátoru je automatizace procesu výroby nanovláknenné příze a také zlepšení přesnosti výroby tím, že se vyhneme operaci, která byla dříve prováděna ručně.

Funkční prototyp vyrobeného zařízení ukázal velmi slibné výsledky pro budoucí výzkum nanovláknenné příze z paralelizovaných struktur nanovláken. Jednou z hlavních výhod konstrukce je možnost změnit parametry sběru a zkroucení vláken. Tato možnost bude užitečná pro další experimenty. V budoucnu bude také testováno mnoho různých polymerních řešení.

V konstrukčním návrhu byly použité podobné nebo stejné elektromotory a čidla pro zjednodušení následujícího oživení stroje, zejména při návrhu řídicího systému a programování řídicí jednotky.

Velkou částí diplomové práce byla výroba a sestavení jednotlivých částí stroje. Návrh obsahoval hodně nestandardních součástí, které musely být vyrobeny na míru. Při výrobě se používaly různorodé technologie, mezi něž patří zejména soustružení, frézování, řezání laserovým paprskem a 3D tisk. Pro použití těchto technologií bylo zapotřebí prozkoumat jejich možnosti a omezení, naučit se vytvářet vhodné modely (zejména pro 3D tisk). Také pro realizaci návrhu bylo nutné spolupracovat s dodavateli a výrobcem součástek.

Výroba dílčích částí stroje, sestavení výsledného prototypu a následné seřízení bylo nezbytné pro testování zvolené metody výroby nanovláken.

## Seznam použité literatury

1. Nanotechnologie. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Nanotechnologie>
2. Ph.D Stanislav, Lukáš. Produkce nanovláken metodou tažení: Disertační práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2015. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Miroslav Olehla, CSc.
3. Xiaobo Xing, Huaqing Yu, Debin Zhu, Jiapeng Zheng, Huang Chen, Wei Chen, Ruibin Xie and Jiye Cai, et al. Subwavelength and Nanometer Diameter Optical Polymer Fibers as Building Blocks for Miniaturized Photonics Integration. 2012 DOI: 10.5772/47822 Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/optical-communication/subwavelength-and-nanometer-diameter-optical-polymer-fibers-as-building-blocks-for-miniaturized-phot>.
4. By Yun Wu, Anthony Duong, L. James Lee and Barbara E. Wyslouzil, et al. Electrospray Production of Nanoparticles for Drug/Nucleic Acid Delivery. 2012. DOI: 10.5772/36672. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/the-delivery-of-nanoparticles/electrospray-production-of-nanoparticles-for-drug-nucleic-acids-delivery>.
5. Lukáš, D., A. Sarkar, L. Martinová, K. Vodsed'álková, D. Lubasová, J. Chaloupek, P. Pokorný, P. Mikeš, J. Chvojka, et al. Physical principles of electrospinning (Electrospinning as a nano-scale technology of the twenty-first century), 2009. ISBN 10.1080/00405160902904641.
6. Electrospinning. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrospinning>
7. TSAI, Chen-Chih. Electrospun Nanofiber Yarns for Nanofluidic Applications. Clemson, South Carolina, United States, 2013. Disertační práce. Clemson University. Dostupné z: [http://tigerprints.clemson.edu/all\\_dissertations](http://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations)
8. SHYNKARENKO, A., KLÁPŠŤOVÁ, A. a KROTOV, A. Development Of Device For Parallel Structured Nanofibers Yarns Production. In NANOCON 2015 – 7th International Conference on Nanomaterials – Research & Application. 1. vyd. Ostrava, Czech Republic, EU: TANGER spol. s r.o., 2015. S. S. \ nestránkovan\ . ISBN 978-80-87294-59-8.
9. SHYNKARENKO, A., KLÁPŠŤOVÁ, KROTOV, A., VRŠÍNSKÁ, K., A., MOUČKA M., LUKÁŠ, D. Production and evaluation of the quality of nanofibers oriented structures for ophthalmological implants. In AUTEX 2016 - 16th World Textile Conference. Ljubljana, Slovenia, EU: University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Department of Textiles, Graphic and Design, 2016. S.S. 169-172. ISBN: 978-961-6900-17-1.
10. SHYNKARENKO, A. Hardware implementation of the production process of the parallel yarns. In Workshop for Ph.D Students of Faculty of Textile Engineering and Faculty of Mechanical Engineering TUL. 1. vyd. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 2015. S. S. 239 – 242. ISBN 978-80-7494-229-7.

11. Skařupa, Jiří. Průmyslové roboty a manipulátory. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 1 ISBN 978-80-248-1522-0.
12. Talácko, J. - Matička, R.: Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů. Skriptum ČVUT, Praha 1995, 273 s.
13. Hlavřila M.: Robotechnologia, teoria, aplikácie, trndy. Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach, Presov 1999 ISBN 80-7099-4414-2.
14. Stříkačkové pumpy [online]. In: . New Era Pump Systems [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <https://www.labicom.cz/produkty/laboratorni-vybaveni/davkovani-kapalin-titrace/strikackove-pumpy>
15. Zdroje vysokého napětí. In: High Voltage Power Supplies & HV Products [online]. Spellman [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <http://www.spellmanhv.com/>
16. Profile System. In: MayTec [online]. Dachau Germany: MayTec [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <http://www.maytec.de/index.php?id=14&L=1>
17. Komponenty pro automatizaci a stavbu CNC strojů: Lineární technika. In: CNCshop.cz [online]. [cit. 2017-09-09]. Dostupné z: [http://www.cncshop.cz/linearni-technika\\_c](http://www.cncshop.cz/linearni-technika_c)
18. Komponenty pro automatizaci a stavbu CNC strojů: Ozubené řemeny. In: CNCshop.cz [online]. [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: [http://www.cncshop.cz/remeny-remenice\\_c](http://www.cncshop.cz/remeny-remenice_c)
19. Komponenty pro automatizaci a stavbu CNC strojů: Krokové motory. In: CNCshop.cz [online]. [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/57hs09-krokovy-2-fazovy-motor-1-3nm>
20. Elektronické komponenty: optické senzory. In: Cz.rs-online.com [online]. RS Components a Allied Electronics [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <http://cz.rs-online.com/web/p/trmenove-opticke-snimace/8187528/>
21. SKF: Valivá ložiska. In: [Http://www.skf.com/cz/products/index.html](http://www.skf.com/cz/products/index.html) [online]. U Měšřanského pivovaru 7, 170 04, Praha 7 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/index.html>
22. Komponenty pro automatizaci a stavbu CNC strojů: Krokové motory. In: CNCshop.cz [online]. [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/42hs03-krokovy-2-fazovy-motor-0-47nm-ii>
23. Hiwin: Kuličkové šrouby. In: HIWIN [online]. HIWIN s.r.o. Medkova 888/11 627 00 Brno Česká Republika [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby>
24. Komponenty pro automatizaci a stavbu CNC strojů: Pružné spojky. In: CNCshop.cz [online]. [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: [http://www.cncshop.cz/pruzne-spojky\\_c](http://www.cncshop.cz/pruzne-spojky_c)
25. Komponenty pro automatizaci a stavbu CNC strojů: Energetické řetězy. In: CNCshop.cz [online]. [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: [http://www.cncshop.cz/energeticke-retezy\\_c](http://www.cncshop.cz/energeticke-retezy_c)



26. 3D tisk. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/3D\\_tisk](https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk)

## **Seznam příloh**

Příloha 1 - Informativní a kontrolní výpočty

Příloha 2 - Konstrukční dokumentace a technické výkresy

# **PŘÍLOHA 1**

Informativní a kontrolní výpočty

## Dávkovací zařízení

Zjednodušený výpočet (nezahrnuje dynamické a hydraulické účinky)

Průtok kapaliny [ml/s]:

$$Q = v \cdot A;$$

kde

$v$  - rychlost zdvihu pístu stříkačky [mm/s];

$A$  - plocha pístu stříkačky [mm<sup>2</sup>].

$$v = h \cdot n_2,$$

kde

$h$  - stoupaní šroubu [mm/ot];

$n_2$  - číslo otáček ozubeného kola 2 [min<sup>-1</sup>];

$$n_2 = \frac{n_1}{i}; \quad i = \frac{n_1}{n_2}; \quad n_1 = n_M,$$

kde

$n_M$  - otáčky elektromotoru [min<sup>-1</sup>];

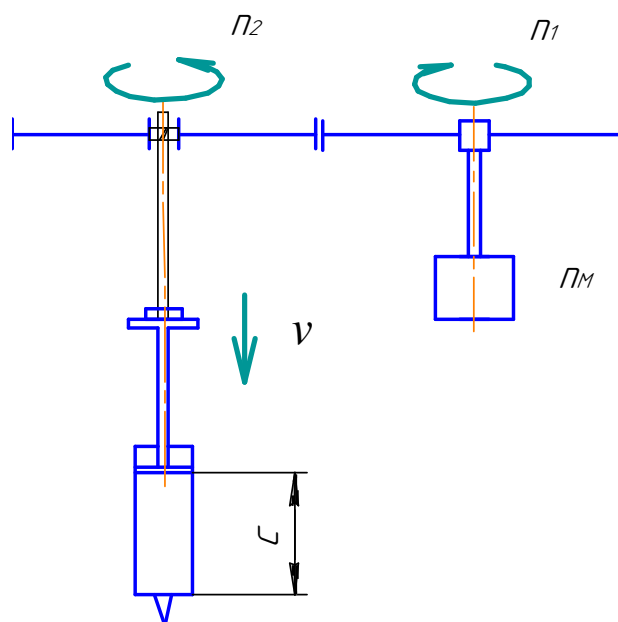
$n_1$  - číslo otáček ozubeného kola 1 [min<sup>-1</sup>];

$i$  - převod [-].

Číslo otáček šroubu [min<sup>-1</sup>]:

$$n_S = \frac{v}{h};$$

$$n_S = n_2.$$

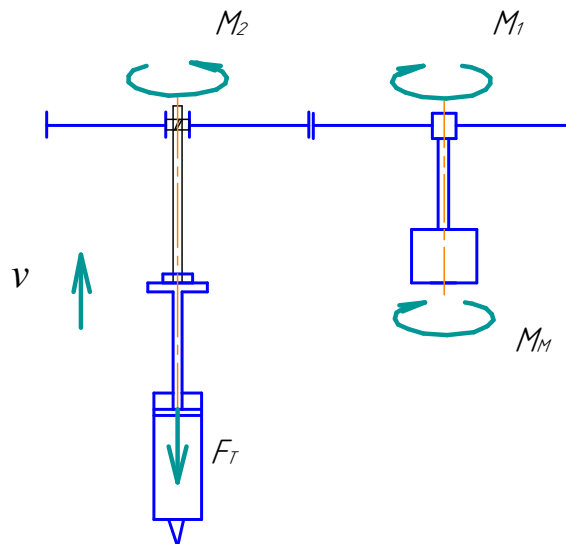


Kinematické schéma mechanismu

$$Q = A \cdot h \cdot \frac{n_M}{i}$$

Objem dávkované kapaliny na jednu otáčku elektromotoru [ml/ot]:

$$V_1 = A \cdot h \cdot i^{-1};$$



Silové schéma mechanismu.

$$P_M \cdot \eta_z = P_Z; \quad P_Z \cdot \eta_S = P_S; \quad P_S \cdot \eta_T = P_T;$$

$$P_T = \eta_z \cdot \eta_S \cdot \eta_T \cdot P_M,$$

kde

$P_M$  - výkon předávaný elektromotorem [kW];

$P_Z$  - výkon předávaný ozubeným převodem [kW];

$P_S$  - výkon předávaný šroubovým převodem [kW];

$P_T$  - příkon stříkačky [kW];

$\eta_z$  - účinnost ozubeného převodu [-];

$\eta_S$  - účinnost šroubového převodu [-];

$\eta_T$  - účinnost ve vedení a na stříkačce [-].

$$P_o = k \cdot P_M;$$

$P_o$  - výkon elektromotoru [kW];

$k$  - koeficient bezpečnosti [-];

$$P_M = \omega_1 \cdot M_M = 2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot M_M; \quad P_Z = \omega_2 \cdot M_2 = 2 \cdot \pi \cdot n_2 \cdot M_2;$$

$$P_S = \omega_2 \cdot M_S = 2 \cdot \pi \cdot n_2 \cdot M_S = n_2 \cdot h \cdot F_S; \quad P_T = V \cdot F_T,$$

kde

$F_T$  - síla způsobená tlakem na stříkačce [N];

$F_S$  - síla působící na šroub [N].

$$M_M = \frac{M_0}{k};$$

$$M_M = M_1;$$

$$M_2 = M_1 \cdot \eta_z \cdot i = M_M \cdot \eta_z \cdot i;$$

$$M_S = M_2 \cdot \eta_S = M_M \cdot \eta_S \cdot \eta_z \cdot i;$$

$$P_S \cdot \eta_T = P_T; \gg \quad n_2 \cdot h \cdot F_S \cdot \eta_T = V \cdot F_T; \gg \quad F_S \cdot \eta_T = F_T,$$

kde

$M_0$  - moment motoru [N · m];

$M_1$  - moment přenašený ozubeným kolem 1 [N · m];

$M_2$  - moment přenašený ozubeným kolem 2 [N · m];

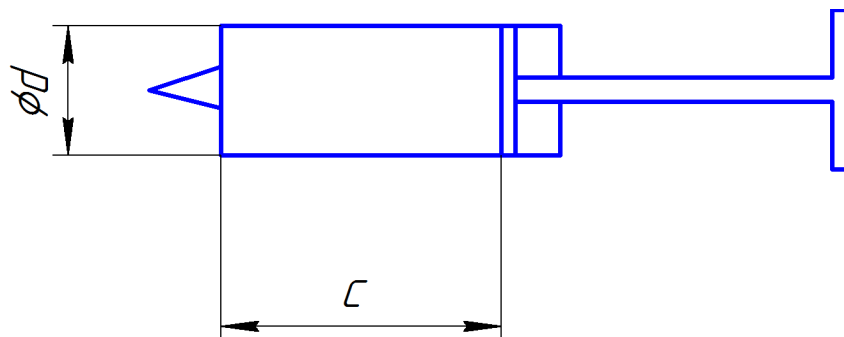
$M_M$  - moment předaný motorem [N · m];

$M_S$  - moment na šroubu [N · m].

Nakonec moment předaný motorem:

$$v \cdot F_T = \eta_z \cdot \eta_T \cdot \eta_S \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot M_M;$$

$$M_M = \frac{v \cdot F_T}{\eta_z \cdot \eta_T \cdot \eta_S \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_1}.$$



Stříkačka

Plocha pístu stříkačky:

$$V_S = A \cdot c = 3 \text{ [ml]}; \gg \quad A = \frac{V_S}{c} = \frac{3 \cdot 10^3 \text{ [mm}^3\text{]}}{47 \text{ [mm]}} = 63,83 \text{ [mm}^2\text{]},$$

kde

$c$  - celkový zdvih stříkačky stanoven 47 [mm];

$V_S$  - objem stříkačky stanoven 3 [ml].

Sílu pasivních odporů  $F_T$  zjistím experimentálně:

$$F_T = 1,3 \cdot m_z \cdot g = 1,3 \cdot 0,4 \cdot 9,8 = 5,1 \text{ [N]},$$

kde

$m_z$  - hmotnost zatěže stanovena 0,4 [kg];

$g$  - gravitační konstanta 9,8 [m/s<sup>2</sup>].

Rychlost posuvu stříkačky bude největší při dobíjení stříkačky kapalinou.

Volím čas dobíjení  $t = 5$  [s];

Rychlost posuvu:

$$Q = \frac{V_S}{t} = A \cdot v; \quad \gg \quad v = \frac{V_S}{t \cdot A} = \frac{3 \cdot 10^3 [\text{mm}^3]}{5 [\text{s}] \cdot 63,83 [\text{mm}^2]} = 9,4 [\text{mm/s}];$$

Převod  $i = 1,5[-]$  a stoupaní šroubu  $h = 0,8$  [mm/ot].

Maximální otáčky motoru:

$$A \cdot v = A \cdot h \cdot \frac{n_{max}}{i} \gg n_{max} = \frac{v}{h} \cdot i = \frac{9,4 [\text{mm/s}]}{0,8 [\text{mm/ot}]} \cdot 1,5 = 1057,5 [\text{ot/min}].$$

Volím hodnoty:

$$\eta_z = 0,9 [-];$$

$$\eta_T = 0,8 [-];$$

$$\eta_S = 0,4 [-];$$

$$k = 1,5 [-].$$

Pro běžné dávkování volím  $n_B = 200$  [ot/min].

Běžná rychlost posuvu pístu stříkačky:

$$v_B = h \cdot \frac{n_B}{i} = 1,77 [\text{mm/s}].$$

Maximální moment motoru:

$$M_M = \frac{v \cdot F_T}{\eta_z \cdot \eta_T \cdot \eta_S \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_1} = \frac{h \cdot F_T}{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \eta_z \cdot \eta_T \cdot \eta_S} = \frac{0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 5,1 [\text{N}]}{1,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,4} = 0,0015 [\text{N} \cdot \text{m}];$$

$$M_{max} = k \cdot M_M = 1,5 \cdot 0,0012 = 0,00225 [\text{N} \cdot \text{m}].$$

Maximální výkon elektro motoru:

$$P_{max} = k \cdot P_M = 1,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 17,625 \cdot 0,0015 = 0,25 [\text{W}].$$

Pro přesné dávkování a jednoduché ovládání procesu můžeme použít libovolný krokový motor s momentem  $M_{max} \geq 2,25 \cdot 10^{-3}$  [N · m]. Volím krokový motor s přírubou Nema 17 0,17 [N · m] typ B. Na základě seznamu krokových motorů firmy Nema vidím, že použití motoru s menším momentem (0,17 [N · m]  $\gg$   $2,25 \cdot 10^{-3}$  [N · m]) nemá smysl, protože jeho cena bude mnohem větší.

## Návrh a kontrola ozubených kol

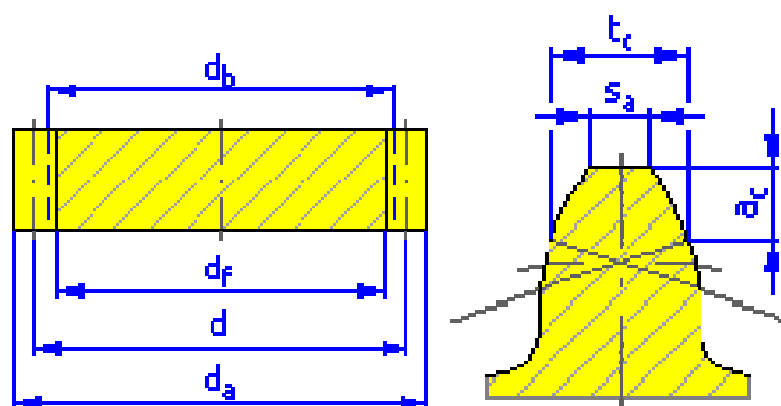
Ozubená kola se vyrábí pomocí 3D tisku z ABS plastu. Kontrolní výpočet byl prováděn pomocí softwaru Autodesk Inventor 2016.

### Scénář

- Scénář návrhu - Vzdálenost os
- Scénář jednotkového posunutí - Vlastní
- Typ výpočtu zatížení - Výpočet točivého momentu pro daný příkon a otáčky
- Pevnostní výpočty - Kontrolní výpočet
- Metoda výpočtu - jednoduchý výpočet

### Společné parametry

Převodový poměr	$i$	1,5 ul
Požadovaný převodový poměr	$i_{in}$	1,5 ul
Modul	$m$	2,0 mm
Úhel sklonu	$\beta_s$	0,0°
Úhel profilu	$\alpha$	20,0°
Vzdálenost os	$a_w$	45,0 mm
Roztečná vzdálenost os	$a$	45,0 mm
Celková jednotková korekce	$\Sigma x$	0,00 ul
Rozteč zubů	$p$	6,283 mm
Základní rozteč	$p_{tb}$	5,904 mm
Provozní úhel záběru	$\alpha_w$	20,0 °
Součinitel trvání záběru	$\varepsilon$	1,3061 ul
Mezní úchylka rovnoběžnosti os	$f_x$	0,01 mm
Mezní úchylka rovnoběžnosti os	$f_y$	0,005 mm



Profil zubu



## Kola

Typ modelu		Kolo 1	Kolo 2
		Komponenta	Komponenta
Počet zubů	$z$	18 ul	27 ul
Jednotkové posunutí	$x$	0,0 ul	0,0 ul
Průměr roztečné kružnice	$d$	36,0 mm	54,0 mm
Průměr hlavové kružnice	$d_a$	39,20 mm	57,20 mm
Průměr patní kružnice	$d_f$	31,60 mm	49,60 mm
Průměr základní kružnice	$d_b$	33,829 mm	50,743 mm
Pracovní roztečný průměr	$d_w$	36,0 mm	54,0 mm
Šířka ozubení	$b$	12,0 mm	10,0 mm
Šířkový poměr	$b_r$	0,2778 ul	0,1852 ul
Výška hlavy zubu	$a^*$	0,80 ul	0,80 ul
Hlavová vůle	$c^*$	0,30 ul	0,30 ul
Zaoblení paty	$r_f^*$	0,3500 ul	0,35 ul
Tloušťka zubu	$s$	3,142 mm	3,142 mm
Čelní tloušťka zubu	$s_t$	3,142 mm	3,142 mm
Tloušťka zubu na těživě	$t_c$	2,774 mm	2,774 mm
Výška hlavy zubu nad těživou	$a_c$	1,095 mm	1,095 mm
Rozměr přes zuby	$Bm$	15,265 mm	21,421 mm
Rozměr přes zuby	$z_w$	3,000 ul	4,0 ul
Rozměr přes válečky (kuličky)	$M$	40,916 mm	58,964 mm
Průměr válečku (kuličky)	$d_M$	3,500 mm	3,50 mm
Mezní úchylka sklonu zubu	$F_\beta$	0,0100 mm	0,0095 mm
Mezní obvodové házení ozubení	$F_r$	0,0160 mm	0,0210 mm
Mezní úchylka čelní rozteče	$f_{pt}$	0,0070 mm	0,0075 mm
Mezní úchylka základní rozteče	$f_{pb}$	0,0066 mm	0,0070 mm
Náhradní počet zubů	$z_v$	18,000 ul	27,0 ul
Virtuální roztečný průměr	$d_n$	36,000 mm	54,0 mm
Virtuální hlavový průměr	$d_{an}$	39,200 mm	57,20 mm
Virtuální průměr základní kružnice	$d_{bn}$	33,829 mm	50,743 mm
Jednotková korekce bez zúžení	$x_z$	0,3713 ul	0,0895 ul
Jednotková korekce bez podříznutí	$x_p$	-0,1831 ul	-0,7095 ul
Jednotkové posunutí s dovol. podříznutím	$x_d$	-0,3280 ul	-0,8544 ul
Snížení hlavy zubu	$k_z$	0,0 ul	0,0 ul
Jednotková šířka hlavy zubu	$s_a$	0,9089 ul	0,9308 ul
Hlavový úhel profilu	$\alpha_a$	30,3468 °	27,4862 °

### Zatížení

	Kolo 1	Kolo 2
Výkon	0, 25 W	0, 225 W
Otáčky	1057,50 ot/min	705,00 ot/min
Kroutící moment	0,002 N m	0,003 N m
Účinnost	0,90 ul	
Radiální síla	0,046 N	
Obvodová síla	0,125 N	
Axiální síla	0,0 N	
Normální síla	0,133 N	
Obvodová rychlost	1,993 m/s	
Rezonanční otáčky	39281,299 <b>ot/min</b>	-

### Materiál

	Kolo 1	Kolo 2
Materiál	Plast	Plast
Mez pevnosti v tahu	75 MPa	75 MPa
Mez kluzu v tahu	60 MPa	60 MPa
Mez pevnosti v ohybu	130,0 MPa	130,0 MPa

### Výsledky

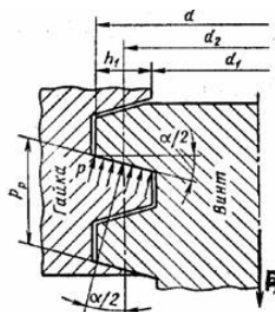
Přípustné zatížení	245,044 N	204,204 N
Součinitel bezpečnosti	1953,826 ul	1628,188 ul
Kontrolní výpočet	<b>Kladný</b>	

### Kontrola šroubového převodu

Pro snížení ceny výrobku a kvůli malé zátěži v převodu používám standartní matice a šroub M5x0,8 (v reálných šroubových převodech se používá lichoběžníkový závit, matice se vyrábí zvlášť z bronzu a šroub z tvrzené oceli).

Axiální síla ve převodu  $F_a = F_T = 5.1$  [N].

Délka šroubu  $l_0 = 105$  [mm].



Šroubový převod

## Materiál šroubu a matice

Pro kombinaci šroubů a matic platí, že matice musí mít stejnou nebo menší třídu pevnosti než šroub.

Značky a mechanické vlastnosti pro materiál ocelových šroubů a matic										
Značka (doplňková číslice)	4A (.0)	4D, 4P (.0)	4S (.0)	5D, (.1)	5S (.2)	6D	6S (.3)	8E (.4)	8G (.5)	10K (.7)
DIN pro šrouby	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	6.8	—	8.8	10.9
Mez pevnosti [MPa]	340	400	400	500	500	500	600	800	800	1000
Mez kluzu [MPa]	200	240	320	300	400	360	480	650	640	900
Výchozí materiál (ČSN)	11343	11343	11343	11500	11343	—	—	14240	12040	14240
DIN pro matice	4	4	4	5	5	6	6	—	8	10
Zkušební napětí [MPa]	400	400	400	500	500	600	600	800	800	1000
Výchozí materiál (ČSN)	4A (.0)	4D, 4P (.0)	4S (.0)	5D, (.1)	5S (.2)	6D	6S (.3)	8E (.4)	8G (.5)	10K (.7)

## Kontrola převodu na opotřebení

Materiál	[p <sub>o</sub> ], MPa
Kalená ocel — bronz	10-12
Nekalená ocel — bronz	8-10
Kalená ocel — antifrikční litina	7-9
Nekalená ocel — antifrikční litina	6-7
Nekalená ocel — litina	5
Kalená ocel — nekalená ocel	3 - 6

$$p_o = \frac{F_a}{S_z \cdot z_m} = \frac{F_a}{\pi \cdot d_2 \cdot H \cdot z_m} \leq [p_o];$$

kde

$p_o$  - napětí opotřebení [MPa];

$S_z$  - plocha profilu závitu [mm<sup>2</sup>];

$H$  - výška profilu závitu stanovena 0,868 [mm];

$z_m$  - číslo závitu matice [-];

$h_m$  - výška matice stanovena 4,7 [mm];

$p_z$  - stoupání závitu stanoveno 0,8 [mm];

$d_2$  - střední průměr závitu stanoven 4,48 [mm].

$$z_m = \frac{h_m}{p_z} = 5,875 \cong 5 [-];$$

$$p_o = \frac{F_a}{\pi \cdot d_2 \cdot H \cdot z_m} = \frac{5,1}{3,14 \cdot 4,48 \cdot 0,868 \cdot 5} = 0,0835 \text{ [MPa]} \leq [3].$$

**vyhovuje!**

Kontrola pevnosti tělesa matice

$$\sigma_m = \frac{4 \cdot F_a}{\pi \cdot (D^2 - d^2)} \leq [\sigma];$$

kde

$\sigma$  - dovolené napětí [MPa];

$\sigma_K$  - mez kluzu, stanoveno pro matice 200 [MPa];

$\sigma_m$  - napětí na tělese matice [MPa];

$D$  - vnější průměr tělesa matice [mm];

$d_z$  - průměr závitu [mm].

$$[\sigma] = 0,3 \cdot \sigma_K = 0,3 \cdot 200 = 60 \text{ [MPa]};$$

$$D \cong 1,5 \cdot d_z = 1,5 \cdot 5 = 7,5 \text{ [mm]};$$

$$\sigma_m = \frac{4 \cdot F_a}{\pi \cdot (D^2 - d_z^2)} = \frac{4 \cdot 5,1}{3,14 \cdot (7,5^2 - 5^2)} = 0,2 \text{ [MPa]} \leq [60].$$

**vyhovuje!**

Kontrola pevnosti šroubu

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_o^2 + 3\tau_k^2} = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot N_r}{\pi \cdot d_3^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{M_s}{0,2 \cdot d_3^3}\right)^2} \leq [\sigma];$$

kde

$\sigma$  - dovolené napětí [MPa];

$\sigma_K$  - mez kluzu, pro šroub stanovena 300 [MPa];

$\sigma_s$  - napětí v šroubu [MPa];

$\sigma_o$  - namáhání ohybem [MPa];

$\tau_k$  - namáhání krutem [MPa];

$d_3$  - průměr tělesa šroubu stanoven 4,019 [mm];

$N_r$  - radiální síla stanovena 0 [N];

$M_s$  - moment na šroubu stanoven  $0,81 \cdot 10^{-3}$  [N · m].

$$[\sigma] = 0,3 \cdot \sigma_K = 0,3 \cdot 300 = 90 \text{ [MPa]};$$

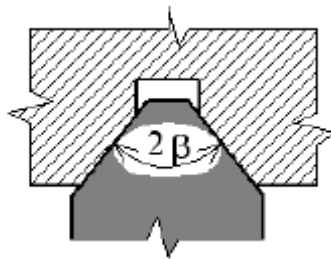
$$\sigma_s = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau_k^2} = \sqrt{3} \cdot \left( \frac{0,81}{0,2 \cdot 4,019^3} \right) = 0,11 \text{ [MPa]} \leq [90].$$

**vyhovuje!**

V silně zatěžovaných šroubových převodech se obvykle dělá kontrola stability, ale pro takové malé zatížení (5,1 N) a velký průměr šroubu (4,019 mm) kontrola nemá smysl.

#### Návrh a kontrola vedení

Volím přímočará kluzná prismatická vedení. Pro snížení opotřebení a vůle v uložení volím  $\beta = 20^\circ$ . Materiál součásti je plast.



Prismatické symetrické uložení

#### Kontrola vedení

$$\sigma_U = \frac{N}{2 \cdot S} \leq [\sigma];$$

kde

$\sigma_U$  - styčné povrchové napětí [MPa];

$\sigma$  - dovolené napětí, pro plasty stanoveno 0,35..0,8 [MPa];

$N$  - síla reakce [N];

$S$  - plocha styčného povrchu [mm<sup>2</sup>];

$M_S$  - moment na šroubu [N · m];

$h_s$  - výška styčného povrchu stanovena 13 [mm];

$d_s$  - střední průměr [mm];

$l$  - délka styčného povrchu [mm].

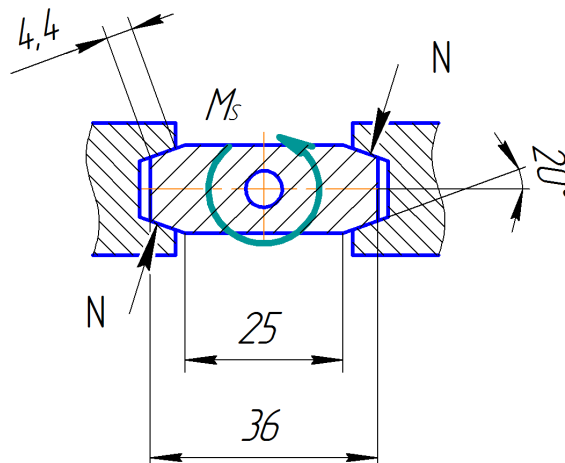


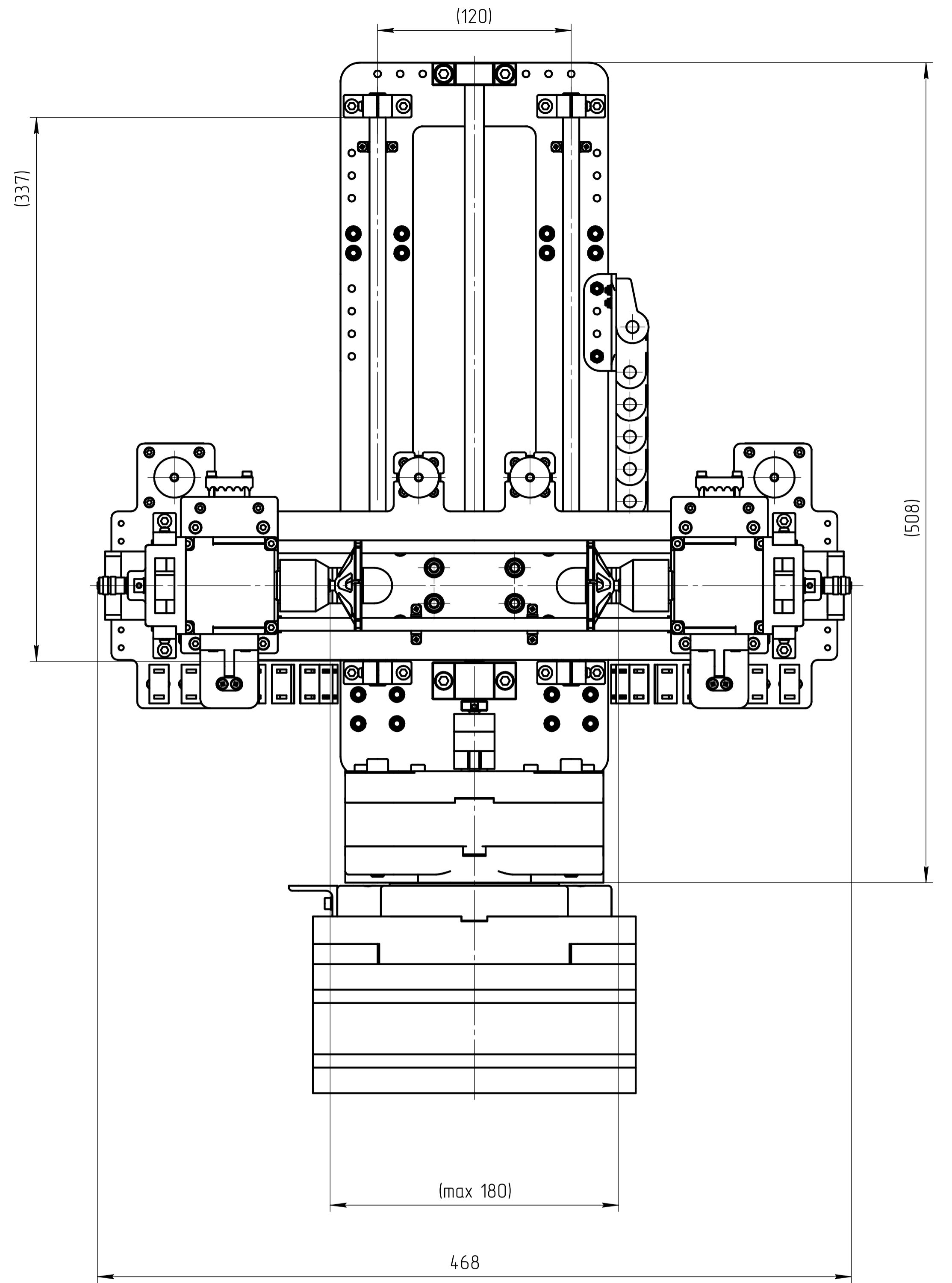
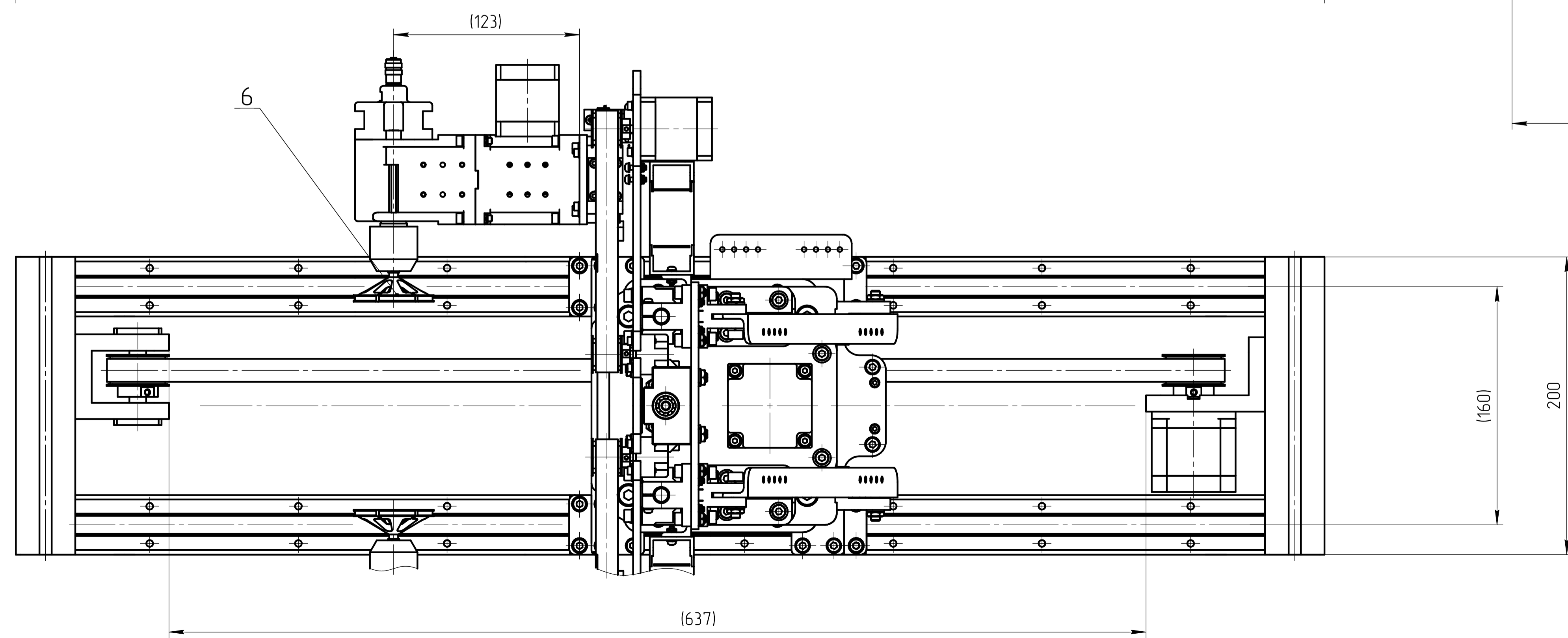
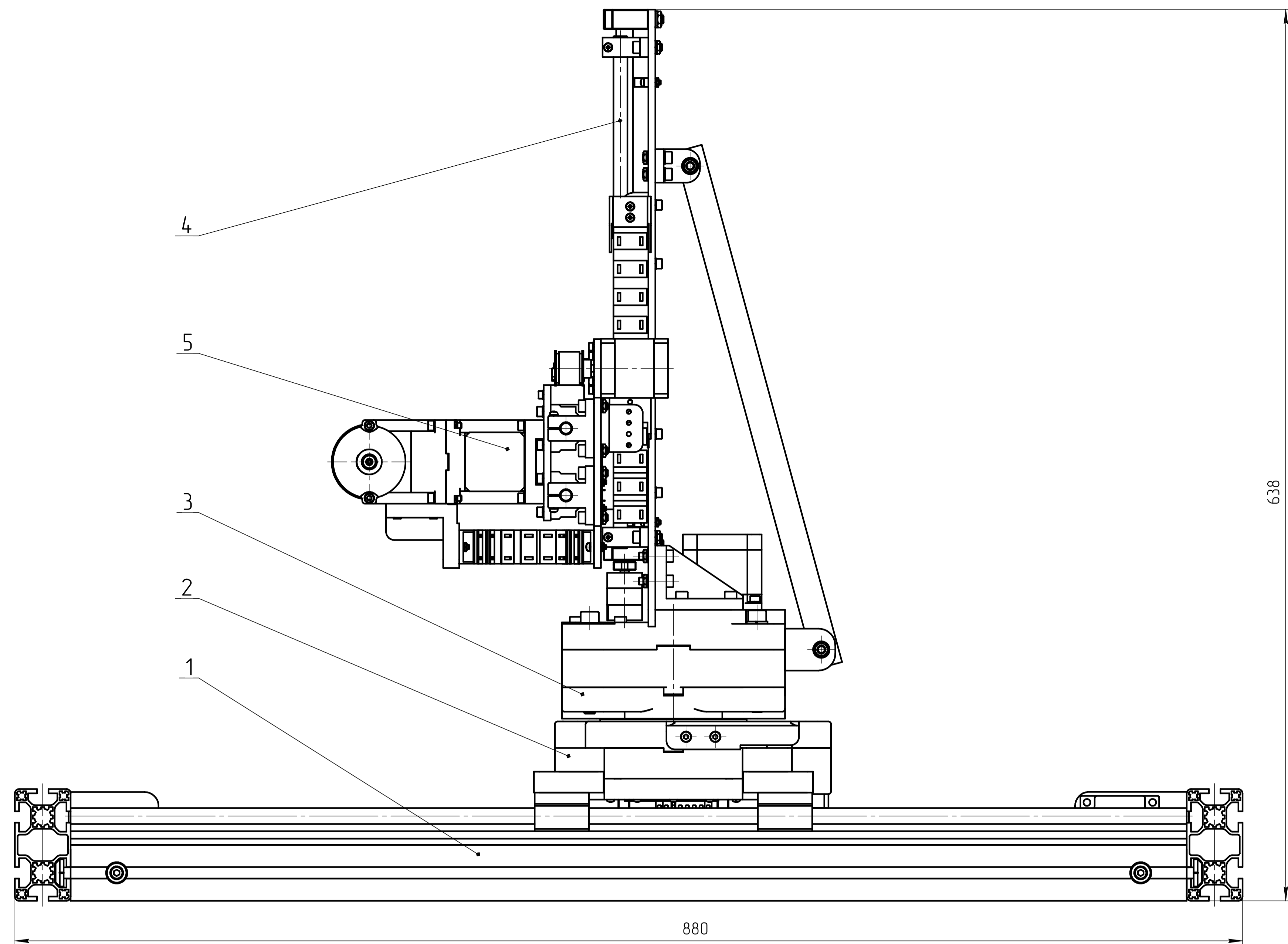
Schéma uložení

$$\sigma_U = \frac{N}{2 \cdot S} = \frac{M_S \cdot d_S}{l \cdot h_S} = \frac{0,81 \cdot (36 - 25)}{4,4 \cdot 13} = 0,038 \leq [0,35].$$

**vyhovuje!**

# **PŘÍLOHA 2**

Konstrukční dokumentace a technické výkresy



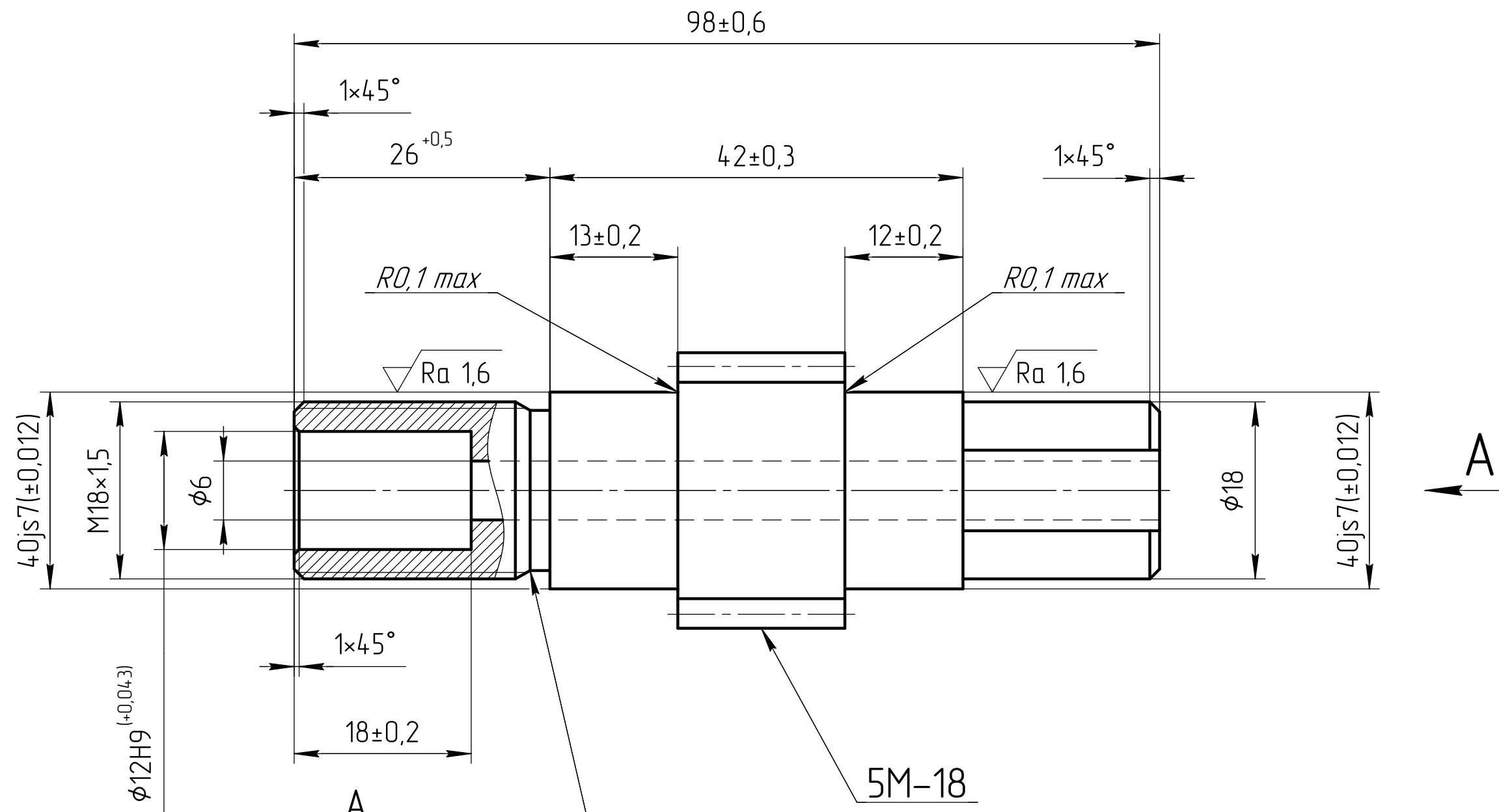
6	KARTAC				2
5	EFEKTOR				1
4	POLOHOVACÍ ZŘÍZENÍ				1
3	OTŮPENÝ STĚL				1
2	POJEZD				1
1	RAM				1

ODK	OZNAČENÍ VÝKRES	POLYMER MATERIÁL	ČÍSLO ZÁSOBNÍKŮ POZNAČENÍ	MN ED
-----	--------------------	---------------------	------------------------------	----------

Měřítko 1:2		Číslo 1	Stupeň Kresla	Projedl KROTOV	WIDUCKA	Mater. Název	Pr. ústí 17.05g	PRESNOST ISO 2768-mk TOLEROVÁNÍ ISO 8015 PROMITÁNÍ
Číslo sestavy	Technolog	Normaliz.	Schválil	Typ	Pr. výkresu	TU v Liberci MIKROMANIPULÁTOR		
Stary vpr.	Schválil	Typ				PZ001		



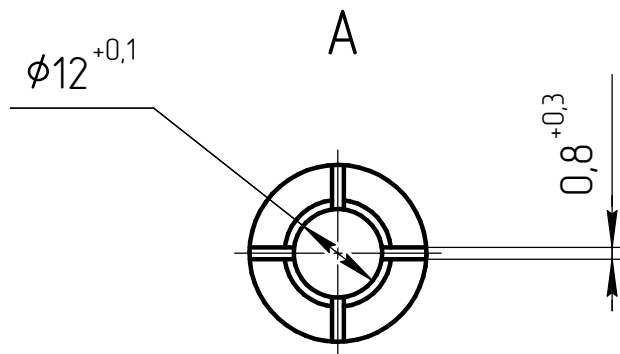
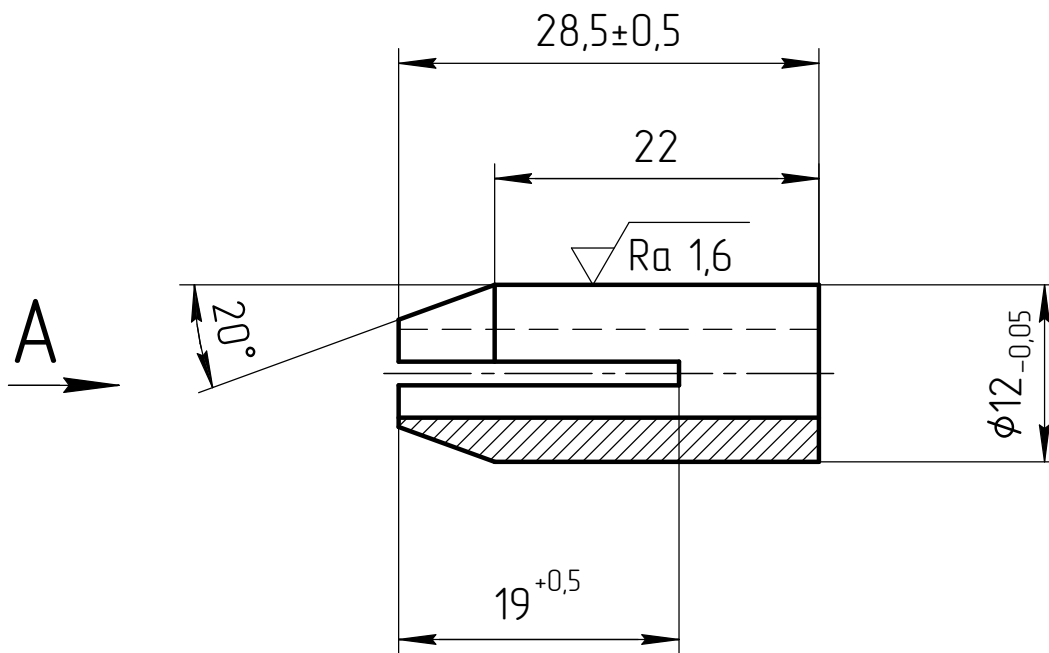
$\sqrt{Ra\ 6,3}$  (✓)



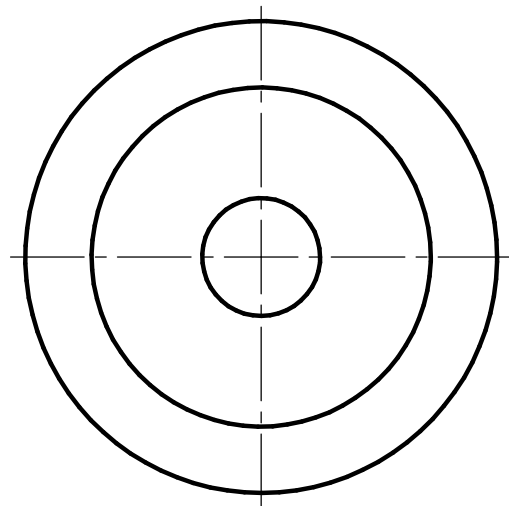
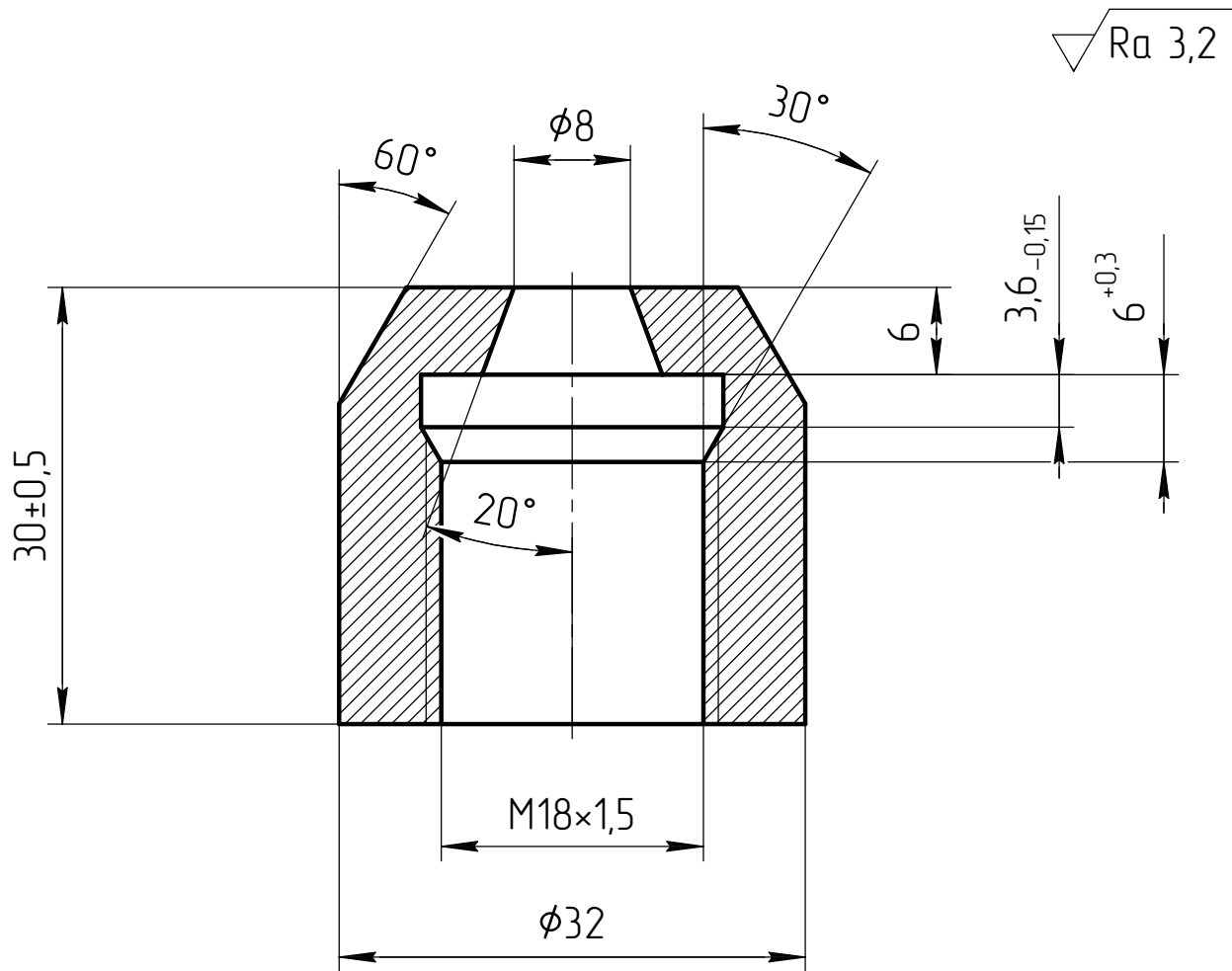
Rozm.-Polot.		ŘEMENICE 5M-18		PŘESNOST ISO 2768-mK	
		c)		Mater. ČSN 424005 Tr. odp.	
		b)		Č. hm. kg Hr. hm. kg	
		a)		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
				PROMÍTÁNÍ	
Změna		Datum	Index	Podpisy	
Měřítko	Pozn.	Navrhl	KROTŮV	Název	
1:2		Kreslil	KROTŮV	HŘÍDEL	
Č.seznamu		Přezkoušel	MOUČKA	Typ	
Č.sestavy		Technolog		Čís.výkresu	
Starý výkr.		Normaliz.		P0002-9	
Nový výkr.		Schválil		List	
		Datum			

**TU v Liberci**  
**HŘÍDEL**  
**P0002-9**

√ Ra 6,3 (√)

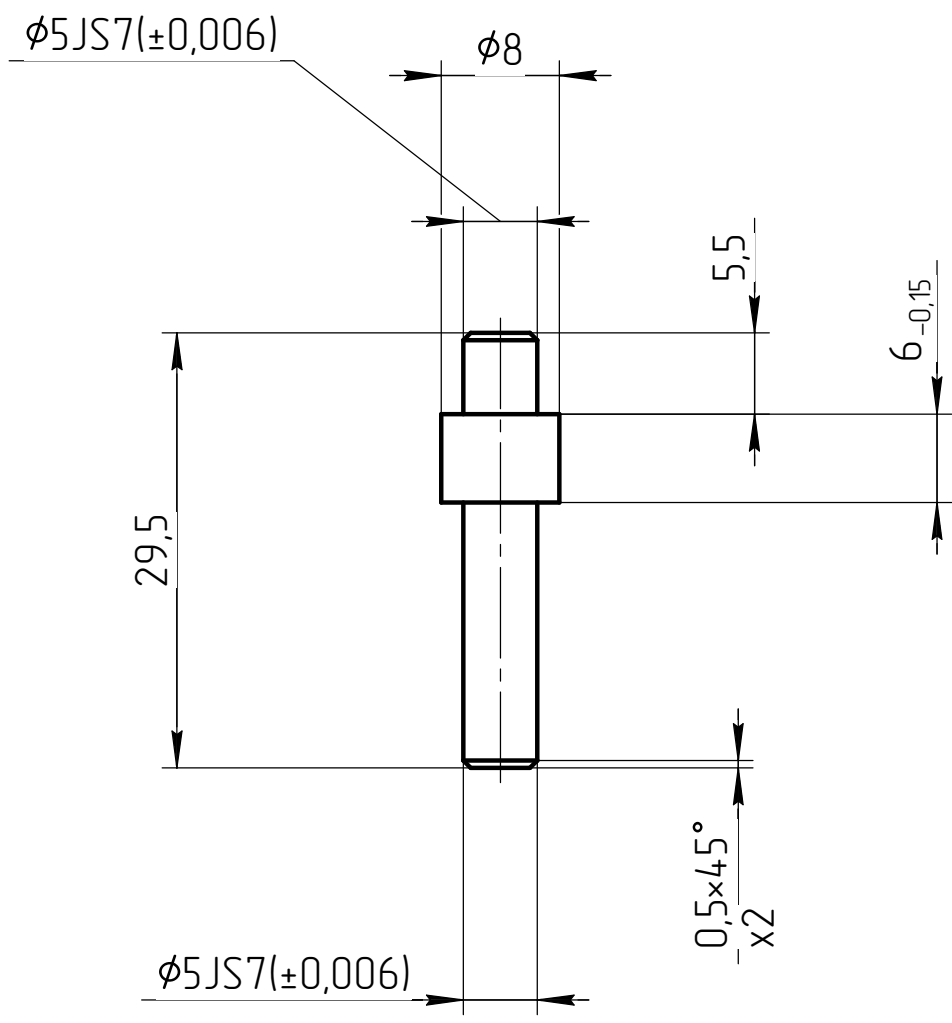


Rozm.-Polot.						PŘESNOST ISO 2768-mK	
		c)		Mater.	ČSN 424005	Tř. odp.	TOLEROVÁNÍ ISO 8015
		b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg
		a)		PROMÍTÁNÍ			
Změna		Datum	Index	Podpisy			
Měřítko	Pozn.	Navrhl	KROTOV		 TU v Liberci		
2:1		Kreslil	KROTOV				
		Přezkoušel	MOUČKA				
Č.seznamu		Technolog			Název	VÁLEC	
Č.sestavy		Normaliz.			Typ		
Starý výkr.		Schválil			Čís.výkresu	P0002-10	
Nový výkr.		Datum					



Rozm.-Polot.						PŘESNOST ISO 2768-mK	
		c)		Mater.	ČSN 424005	Tř. odp.	TOLEROVÁNÍ ISO 8015
		b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg
		a)		PROMÍTÁNÍ			
Změna		Datum	Index	Podpisy			
Měřítko	Pozn.	Navrhl	KROTOV				
2:1		Kreslil	KROTOV				
Č.seznamu		Přezkoušel	MOUČKA				
Č.sestavy		Technolog					
Starý výkr.		Normaliz.					
Nový výkr.		Schválil					
		Datum					
				Název HLAVA			
				Typ Čís.výkresu P0002-11			
				List			

√ Ra 6,3

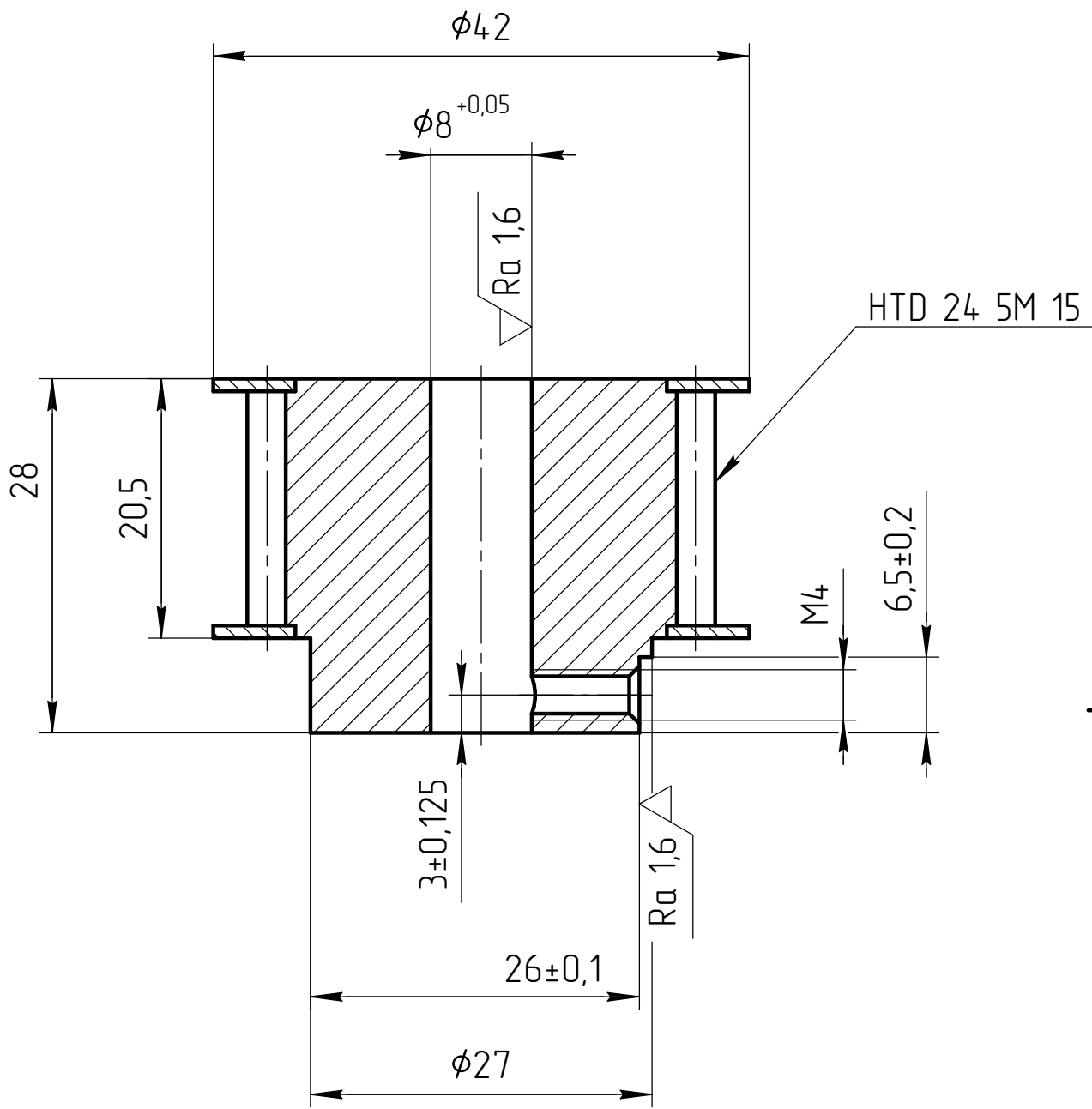


Rozm. - Polot.				PŘESNOST ISO 2768-mK	
				TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
				PROMÍTÁNÍ	
Změna		Datum	Index	Podpisy	 <b>TU v Liberci</b> Název: <b>HŘÍDEL</b> Typ: Čís. výkresu: <b>P0002-10</b>
Měřítko	Pozn.	Navrhl	KROTOV		
2:1		Kreslil	KROTOV		
		Přezkoušel	MOUČKA		
		Technolog			
Č. seznamu		Normaliz.			
Č. sestavy		Schválil			
Starý výkr.		Datum			
Nový výkr.					

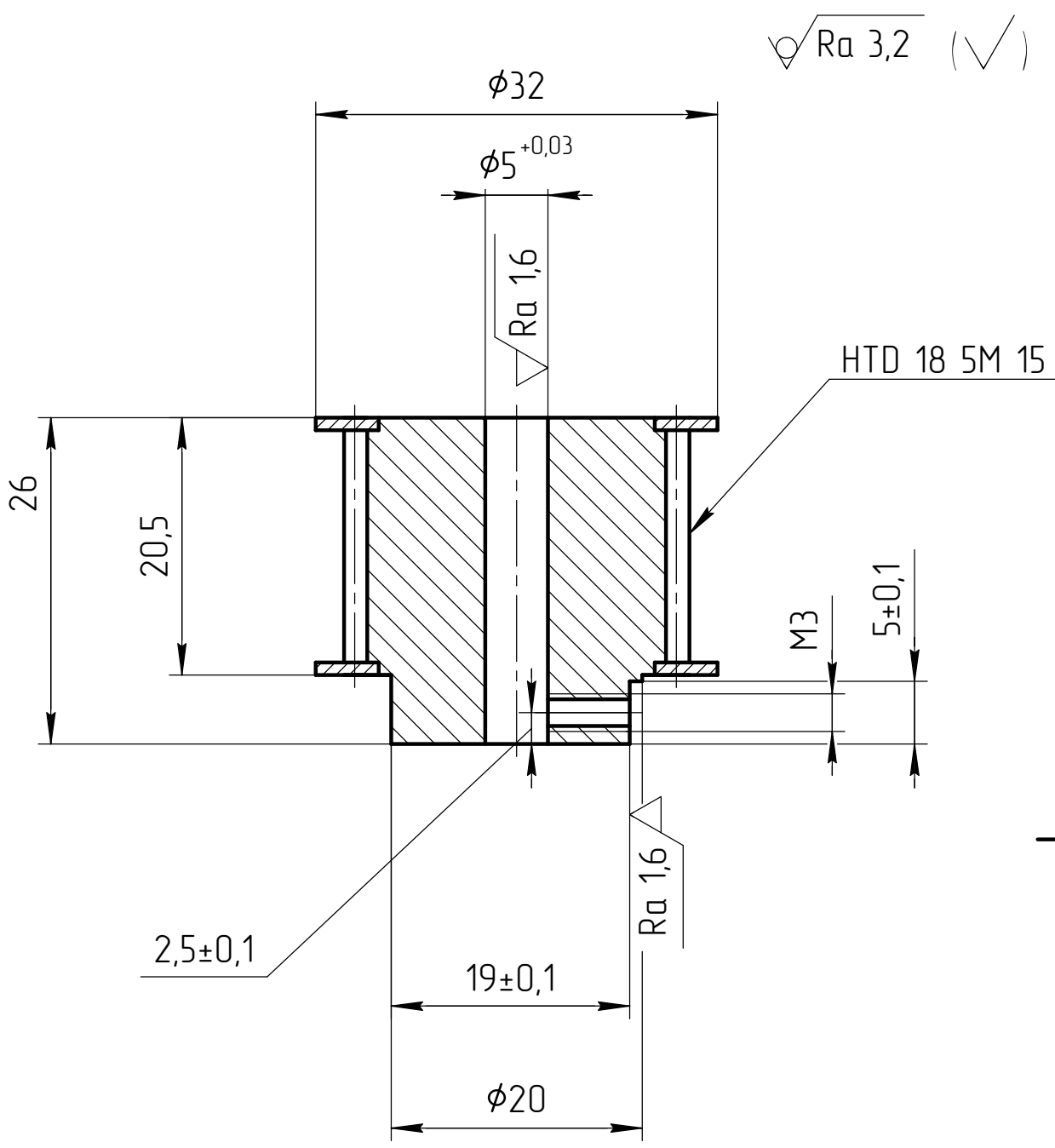
List

1 2 3 4

$\sqrt{Ra\ 3,2}$  (✓)



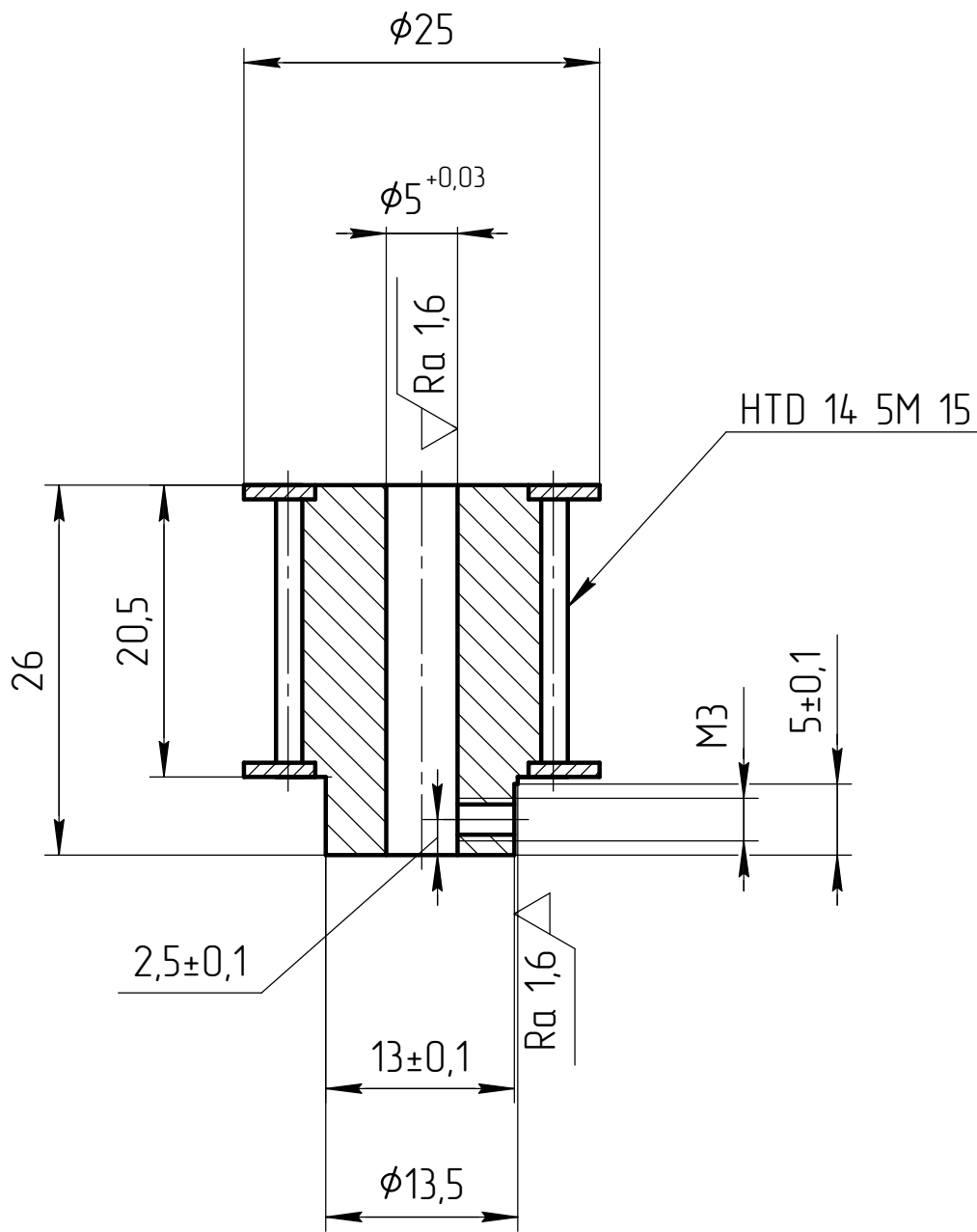
Rozm.-Polot.		HTD 24 5M 15		PŘESNOST ISO 2768-mK		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
		c)		Mater.		Tř. odp.	
		b)		Č. hm.		kg Hr. hm. kg	
		a)				PROMÍTÁNÍ	
Změna		Datum	Index	Podpisy			
Měřítka	Pozn.	Navrhl	KROTOV				
2:1		Kreslil	KROTOV	Název	ŘEMENICE		
Č.seznamu		Přezkoušel	MOUČKA				
Č.sestavy		Technolog		Typ	24 5M 15		
Starý výkr.		Normaliz.		Čís.výkresu			
Nový výkr.		Schválil			List		
		Datum					



Rozm.-Polot.		HTD 18 5M 15				PŘESNOST ISO 2768-mK	
		c)		Mater.	Tř. odp.		TOLEROVÁNÍ ISO 8015
		b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg
		a)		PROMÍTÁNÍ			
Změna		Datum	Index	Podpisy			
Měřítko	Pozn.	Navrhl	KROTOV	 <b>TU v Liberci</b> ŘEMENICE 18 5M 15			
2:1		Kreslil	KROTOV				
		Přezkoušel	MOUČKA				
Č.seznamu		Technolog		Název			
Č.sestavy		Normaliz.		Typ			
Starý výkr.		Schválil		Čís.výkresu			
Nový výkr.		Datum		18 5M 15			

1 2 3 4

$\sqrt{Ra\ 3,2}$  (✓)



Rozm.-Polot.		HTD 14 5M 15		PŘESNOST ISO 2768-mK		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
		c)		Mater.		Tř. odp.	
		b)		Č. hm.		kg Hr. hm. kg	
		a)				PROMÍTÁNÍ	
Změna		Datum	Index	Podpisy		 <b>TU v Liberci</b> <b>ŘEMENICE</b> <b>14 5M 15</b>	
Měřítko	Pozn.	Navrh	KROTOV	Název			
2:1		Kreslil	KROTOV	Typ			
Č.seznamu		Přezkoušel	MOUČKA	Čís.výkresu			
Č.sestavy		Technolog					
Starý výkr.		Normaliz.					
Nový výkr.		Schválil					
		Datum					

C-C  
(2:1)

$\phi 4 \text{ H9/h7}$

$\phi 4 \text{ K9/h7}$

28

B

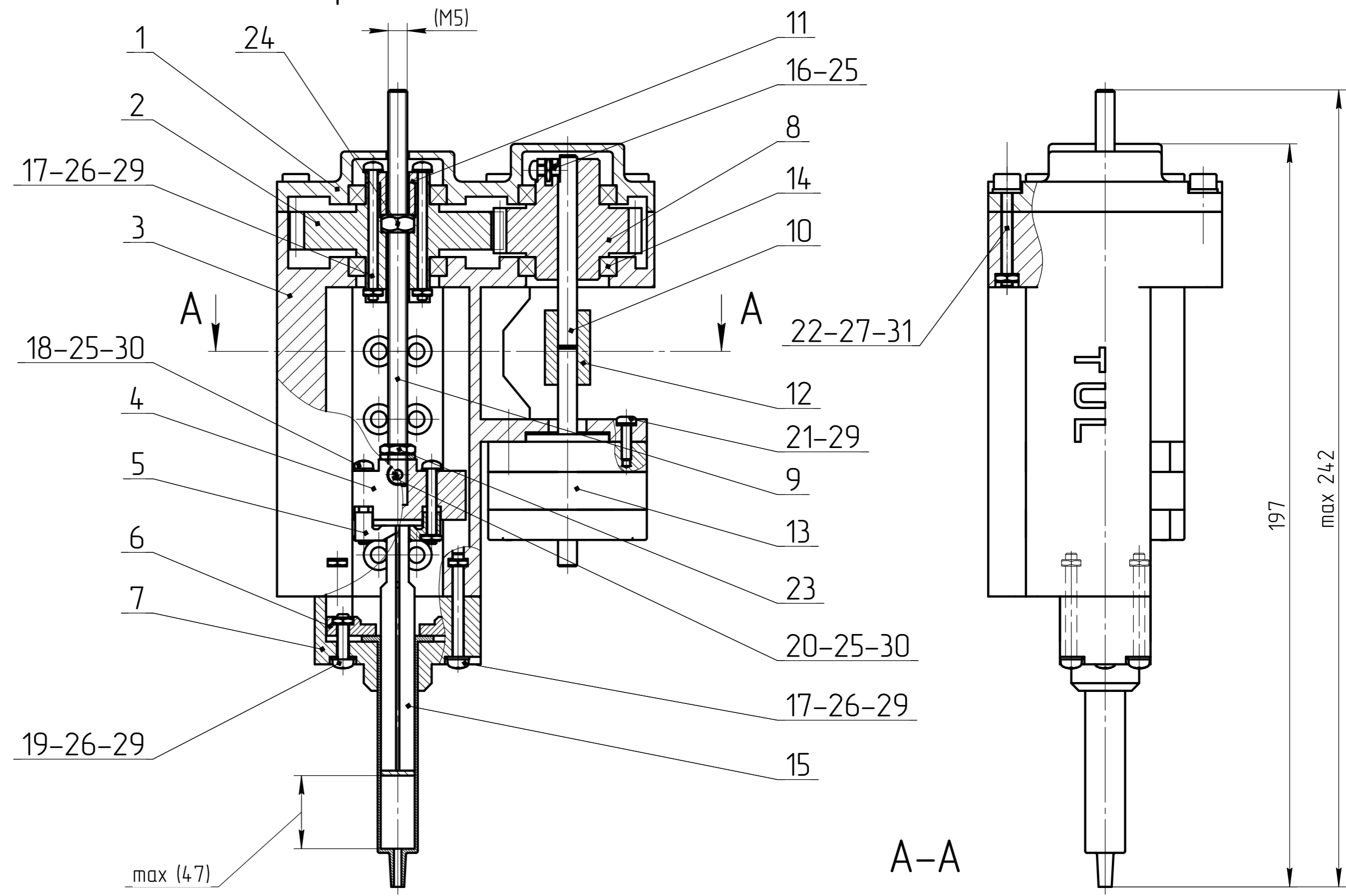
10

18

18

18

$\phi 4,2 \times 8$

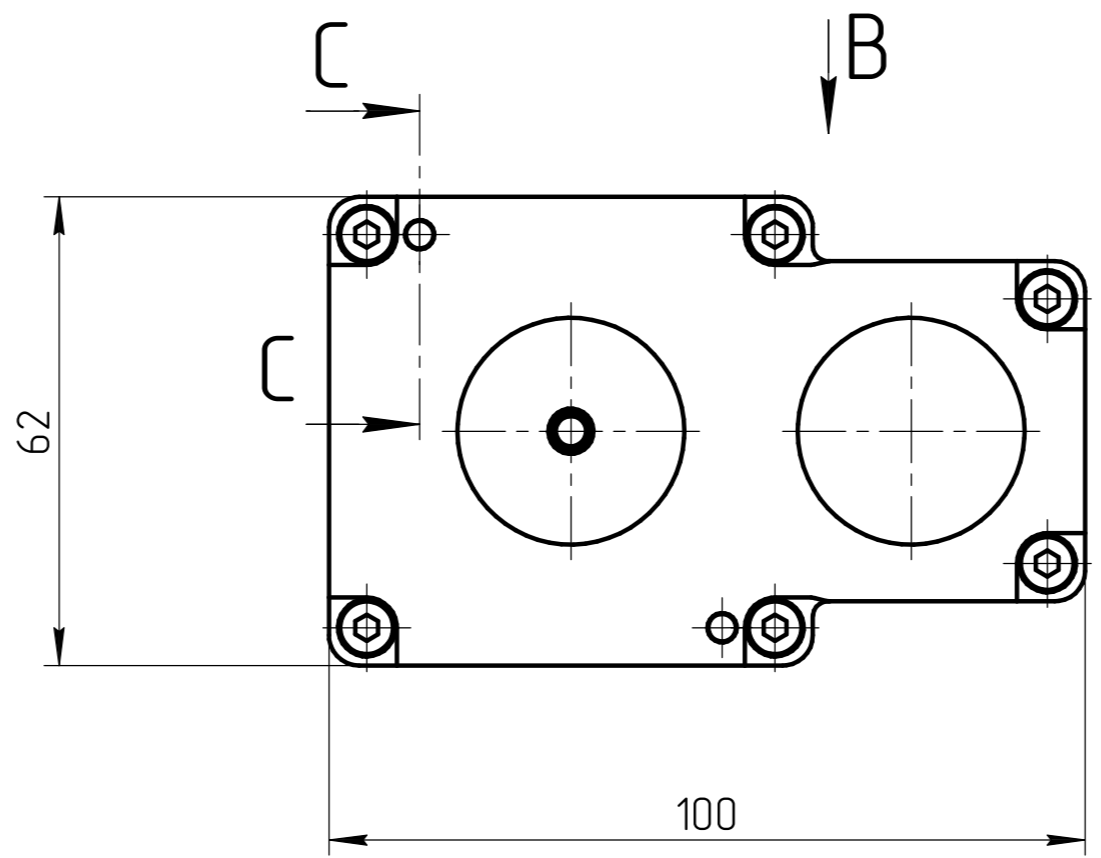
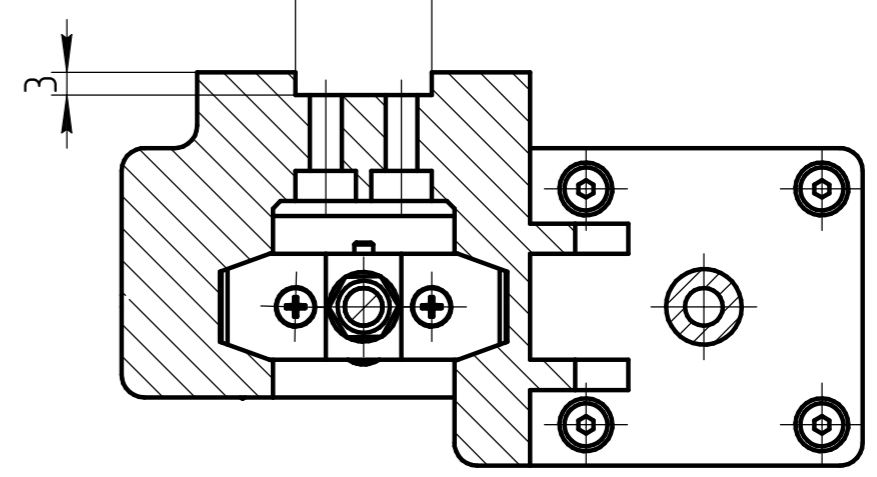


197  
max 24.2

max (47)

A-A


18



Rozm.-Počet		c)		Mater.		Tr. odp.		PŘESNOST ISO 2768-mK	
		b)		Č. hm		kg Hr. hm		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
		a)						PROMÍTÁNÍ	
Změna		Datum		Index		Podpis		 <b>TU v Liberci</b> DÁVKOVAČÍ HLAVA	
Měřitko	Pozn.	Navrh	KROTOV	Název					
		Kreslil	KROTOV	Typ					
		Přezkoušel	MOUČKA	Čís.výkresu		1-0-0			
Č.seznamu		Technolog							
Č.sestavy		Normaliz.							
Starý výkr.		Schválil							
Nový výkr.		Datum							



	OZNAČNÍ	POLOTVAR	ČÍS. ZÁSOBNÍKU	MN.
	VÝKRES	MATERIÁL	POZNAÁMKA	JED.
1	VÍKO 1-0-1			1
2	OZIIBENÉ KOLO 1-0-2			1
3	SKŘÍŇ 1-0-3			1
4	JEZDEC 1-0-4			1
5	SVORKA 1-0-5			2
6	SVORKA 1-0-6			2
7	NÁSTAVEC 1-0-7			1
8	OZIIBENÉ KOLO 1-0-8			1
9	ZÁVITOVÁ TÝČ 1-0-9	M5-105mm		1
10	TÝČ 1-0-10	5mm		1
11	VÍČKO 1-0-11			
12	SPOJKA	5x5mm		1
13	ELEKTRO MOTOR	NEMA 17 0,17Nm	42STH25-0404B	1
14	LOŽISKO DIN 625	SKF 61803-2RZ		4
15	STRÍKAČKA	3ml		1
16	ŠROUB ISO 7045	M2,5x6		1
17	ŠROUB ISO 7045	M3x30		6
18	ŠROUB ISO 7045	M2,5x20		2
19	ŠROUB ISO 7045	M3x12		2
20	ŠROUB ISO 7045	M2,5x14		1
21	ŠROUB ISO 7380	M3x10		4
22	ŠROUB ISO 4762	M4x25		6

Změna		Datum	Index	Podpisy	 <b>TU v Liberci</b> DÁVKOVACÍ HLAVA Název Typ Čís. výkresu 1-0-0
Měřítka	Pozn.	Navrhl	KROTOV		
		Kreslil	KROTOV		
		Přezkoušel	MOUČKA		
Č. seznamu		Technolog			
Č. sestavy		Normaliz.			
Starý výkr.		Schválil			
Nový výkr.		Datum			

