



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ PRO NANÁŠENÍ POLYMERNÍCH POVLAKŮ

DESIGN OF POLYMER COATING SPRAYER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Meluzín

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Ondřej Meluzín
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Petr Šperka, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Konstrukce zařízení pro nanášení polymerních povlaků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro další snižování tření a zvyšování životnosti kluzných ložisek používaných nejen v automobilovém průmyslu je nezbytné vyvíjet nové metody, jak regulovat tření a opotřebení. Jednou z možných cest je nanášení kompozitních polymerních vrstev na kluzné plochy ložisek. Tyto vrstvy musejí být nanášeny v tenké rovnoměrné tloušťce. Proto tyto účely je vhodné zkonstruovat zařízení pro automatické opakovatelné nanášení.

Typ práce: vývojová - konstrukční

Projekt: Vývojová zakázka (HS)

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je navrhnout a realizovat zařízení pro automatické nanášení polymerních vrstev na třecí povrchy radiálních kluzných ložisek. Zařízení má umožnit rovnoměrné nanášení vrstvy o regulovatelné tloušťce.

Dílčí cíle diplomové práce:

- navrhnout koncepci zařízení s ohledem na legislativní požadavky,
- provést konstrukční řešení zařízení,
- zrealizovat a otestovat zařízení.

Požadované výstupy: funkční vzorek, průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. Konstruování strojních součástí. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0, 2010.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem a následnou realizací zařízení pro nanášení polymerních kluzných laků na pracovní plochy kluzných ložisek automobilových motorů. V první části práce je provedena rešerše současného stavu poznání v oblasti konstrukce ložisek a požadavků kladených na ložiskové povlaky a kluzné laky. Jsou zde také popsány technologie nanášení povlaků a vhodnost jejich použití pro různé povlakovací materiály. V druhé části práce jsou uvedeny základní prvky použité pro konstrukci zařízení a jsou představeny koncepční návrhy, vytvořené s přihlédnutím k ergonomii ovládání a zajištění bezpečnosti obsluhy. Vstupními parametry pro návrh a konstrukci zařízení jsou požadované rozměry pracovního prostoru a rozměry ložisek, na která bude kluzný lak nanášen. Dále je popsána celá konstrukce, nástřikový okruh společně s pneumatickými regulačními prvky, a také je navržen systém pro zjednodušení manipulace s ložisky během všech technologických operací, spojených s nástřikem kluzného laku. Součástí práce je také ověření funkčnosti zařízení provedením zkušebních nástřiků na ložiska.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kluzné ložisko, ložisko klikové hřídele, polymerní povlak, nástřik

ABSTRACT

This master's thesis is aimed on design of polymer coating machine that sprays polymer sliding coatings onto surfaces of crankshaft journal bearings used in car engines. At the beginning of this master's thesis, basic overview of crankshaft bearings design and materials that are used for sliding coatings is given. Then suitable manufacturing technologies for different materials of coatings are described. After describing basic principles of coating technologies and how crankshaft bearings work, main components used for design of the spraying machine are introduced. Three prototypes of the machine are created in virtual environment to verify ergonomics of control and to fulfill safety requirements. In main part of the thesis, description of all parts and subassemblies, such as frame, spraying circuit, pneumatic regulators and safety features is given. Also functions of all parts of the machine are explained in details. Moreover system for handling and manipulation with coated bearings during all necessary technological operations was created. In addition functionality of the machine was verified and checked by spraying of polymer coating on testing samples and crankshaft bearings.

KEYWORDS

Journal bearing, crankshaft bearing, polymer coating, spraying

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MELUZÍN, O. *Konstrukce zařízení pro nanášení polymerních povlaků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 98 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Šperka, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Konstrukce zařízení pro nanášení polymerních povlaků* vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Petra Šperky, Ph. D., s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

v Brně dne

.....

podpis

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Petru Šperkovi, Ph. D. za všechny cenné rady, připomínky a vedení při vypracování mé diplomové práce. Děkuji také své rodině a blízkým za podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

Abstrakt	5
Klíčová slova	5
Abstract	5
Keywords	5
Bibliografická citace	7
Čestné prohlášení	9
Poděkování	11
Obsah	13
1 Úvod	15
2 Současný stav řešené problematiky	16
2.1 Ložiska klikových hřídelů	16
2.1.1 Konstrukce kluzných ložisek	16
2.1.2 Požadavky na materiály kluzných ložisek klikových hřídelů	17
2.1.3 Povlaky kluzných ložisek klikových hřídelů	18
2.1.4 Polymerní kluzné laky	19
2.1.5 Oblast funkce kluzných laků	20
2.2 Metody nanášení povlaků	21
2.2.1 Tepelné nástriky	21
2.2.2 Studené nástriky	22
2.2.3 Studené nástriky v praxi	23
2.2.4 Nástriky s využitím elektrostatických účinků	24
2.3 Podobná zařízení.....	24
3 Analýza problému a cíl práce	27
3.1 Analýza problému.....	27
3.2 Cíl práce.....	28
4 Konceptní řešení	29
4.1 Konceptní návrh nařízení	29
4.1.1 Koncepte nástřiku kluzného laku	29
4.1.2 Konceptní návrh zařízení	30
4.2 Komponenty použité pro konstrukci zařízení.....	31
4.2.1 Rám.....	31
4.2.2 Čerpací a nástřikový okruh.....	32
4.2.3 Pneumatický obvod	34
4.2.4 Lineární vedení a pojezdy	35
4.2.5 Upínací desky	36
4.2.6 Řídící elektronika	36
4.2.7 Snímače a bezpečnostní prvky	37
4.3 Konstrukční návrhy a ergonomické řešení	38
4.3.1 Konstrukční varianta 1.....	38
4.3.2 Konstrukční varianta 2.....	39
4.3.3 Konstrukční varianta 3.....	41
5 Konstrukční řešení	44
5.1 Výsledné konstrukční řešení.....	44
5.1.1 Rám.....	46
5.1.2 Nástřikový okruh	50
5.1.3 Lineární vedení a pojezdy	51

5.1.4 Karuselová upínací deska	59
5.1.5 Upínání kruhových ložisek	63
5.1.6 Upínání lineárních ložisek a vzorků	66
5.1.7 Oddělení elektrických prvků od pracovního prostoru	69
5.1.8 Krytování a zajištění bezpečnosti	71
5.1.9 Ovládání zařízení	72
5.2 Výpočty a simulace.....	74
5.2.1 Modální analýza.....	74
5.3 Ověření funkčnosti.....	78
6 Diskuze.....	80
7 Závěr	81
8 Seznam použitých zdrojů a literatury.....	82
9 Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin.....	86
10 Seznam obrázků a grafů.....	88
11 Seznam tabulek	90
12 Přílohy.....	91

1 ÚVOD

V posledních desetiletích došlo k výraznému nárůstu využívání automobilů a dopravních prostředků, které jsou poháněny spalovacími motory. Jedním z klíčových komponent motoru je klikový hřídel, který spolu s ojnícemi přenáší přímočarý pohyb pístů na rotační pohyb. Klikové hřídele jsou uloženy v radiálních kluzných ložiscích, jejichž úkolem je kromě uložení hřídele umožnění jeho rotace a přenos zatížení do bloku motoru při zajištění co nejnižšího součinitele tření a vysoké životnosti ložisek. Motorová kluzná ložiska se vyrábějí jako kompozice několika materiálů a využívají tak kombinace různých materiálových vlastností pro dosažení požadované pevnosti, tuhosti a odolnosti vůči poškození. Na pracovní plochy ložisek je možné dále nanést povlak pro snížení tření a celkové zlepšení tribologických vlastností ložiska. Druh naneseného povlaku se volí zejména dle provozních podmínek, za kterých budou ložiska pracovat a může být zvolen povlak kovový či nekovový. Nejběžnější nekovové povlaky jsou z polymerních materiálů a nejčastěji se nanáší nástřikem.

Při vývoji nových povlaků pro kluzná ložiska je nutné vyrobit testovací vzorky a ověřovací série, na kterých se provádí tribologické a životnostní testy pro ověření funkčnosti ložisek i použitých materiálů. Proto vyvstal požadavek na vývoj zařízení, které umožní nástřik různých druhů polymerních laků na funkční plochy kluzných ložisek. Toto zařízení bude sloužit zejména pro vývoj a výzkum v dané oblasti.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

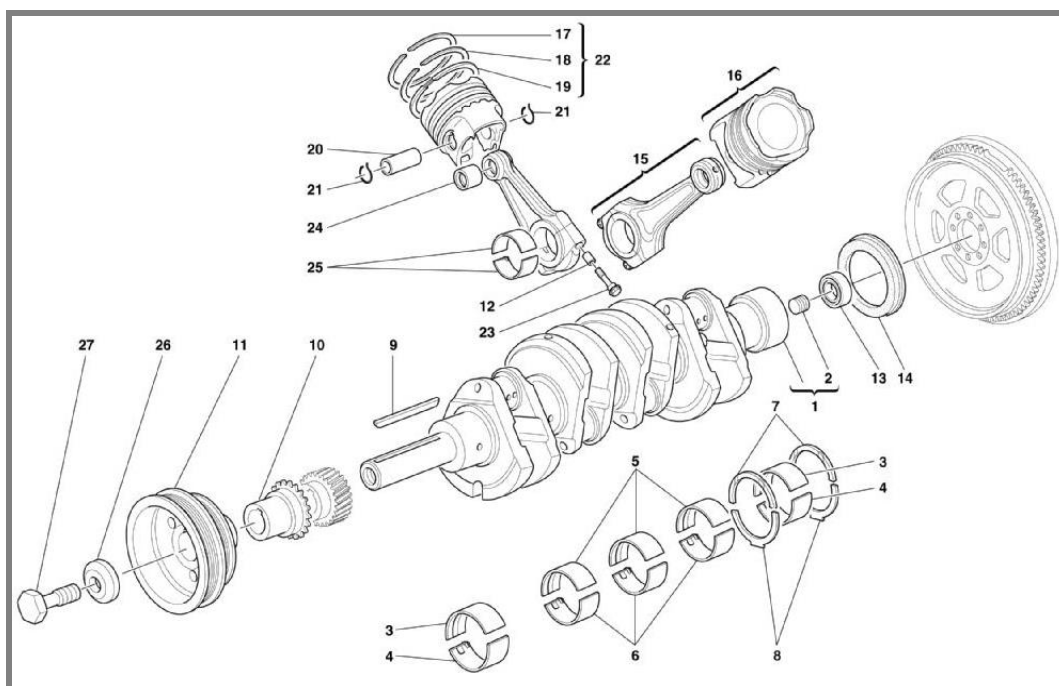
Před zahájením návrhu konstrukce nástřikového zařízení a výběrem vhodných komponent je nutné prostudovat odbornou literaturu zabývající se technologiemi nástřiků polymerních vrstev, normy pro návrhy stříkacích zařízení a bezpečnostní normy. Dále zvolit metodu vhodnou pro nástřik polymeru a určit parametry, které budou klíčové pro vytvoření vrstvy, splňující jak tribologické požadavky, tak požadavky na mechanickou odolnost a životnost povlaku.

2.1 Ložiska klikových hřídelů

Při konstrukci moderních spalovacích motorů je kladen důraz zejména na vysoký výkon, vysoké otáčky, nízké emise a spotřebu. Pro splnění těchto požadavků musí motorová ložiska odolávat velkému zatížení a teplotnímu namáhání. Důležitým parametrem je také životnost ložiska [1,2].

2.1.1 Konstrukce kluzných ložisek

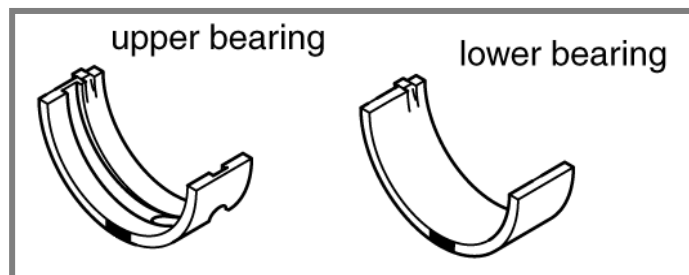
Ložiska klikových hřídelů jsou konstruována jako půlkruhová většinou o tloušťce 2 až 5 mm. Na obrázku 2-1 je sestava klikového hřídele s ojnicemi a písty. Kluzná ložiska, na která bude navrhovaným zařízením nanášen povlak, se používají pro uložení klikového hřídele v bloku motoru (poz. 3, 4 a 5, 6), mezi hřídelí a ojnicí (poz. 25), případně mezi ojnicí a pístním čepem (poz. 24).



Obr. 2-1 Sestava klikového hřídele s ojnicemi a písty [3].

Ložisko je rozděleno na 2 poloviny – pánve, které se liší tvarem. Jedna polovina pánve má mazací drážku a díru pro přívod maziva. Druhá polovina má naopak hladký povrch. To, zda jsou mazací otvory a drážky umístěny v horní či spodní pánvi, je dáno konstrukcí bloku motoru a umístěním přívodů maziva. Možná je i varianta, kdy jsou mazací drážky i s mazacími otvory v obou pánvích.

Tato varianta se používá zejména u vysokovýkonných motorů pro lepší zajištění mazání po celém obvodu čepu. Obě pánve ložisek jsou opatřeny zámky pro upevnění v bloku motoru a zajištění proti pootočení [3,4]. Detail pánví ložiska je na obrázku 2-2.



Obr. 2-2 Tvar pánví kluzného ložiska klikových hřídelů [4].

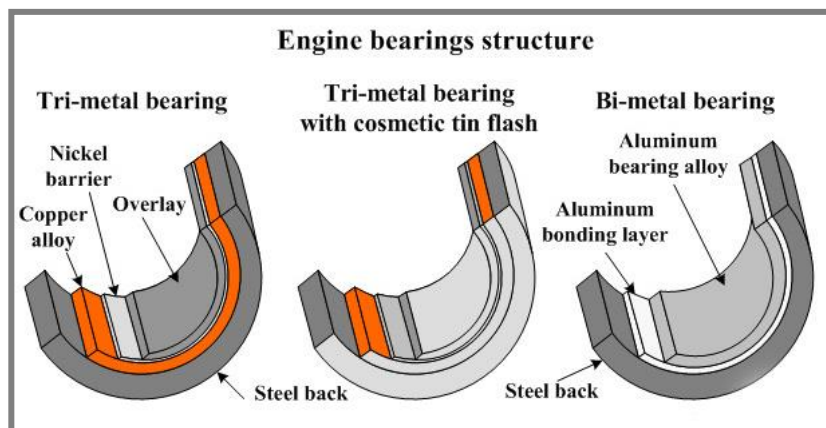
2.1.2 Požadavky na materiály kluzných ložisek klikových hřídelů

Aby ložiska splňovala všechny požadované parametry, používají se pro jejich konstrukci zejména kovové či kompozitní materiály.

Výběr vhodného materiálu pro konstrukci ložiska klikového hřídele je komplexní úkol, vzhledem k požadavkům, které jsou na ložiska kladeny. Neexistuje univerzálně použitelný materiál, ale vždy se jedná o kompromis a výběr závisí na typu ložiska, otáčkách hřídele, velikosti zatížení, kontaktním tlaku, režimu mazání, ve kterém bude ložisko pracovat a pracovní teplotě [1,2,5].

Obecně by vlastnosti ložiskového materiálu měly být vyvážené tak, aby bylo splněno co nejvíce z výše uvedených požadavků a pracovních podmínek. Základní materiál ložiska by měl být částečně pružný, aby pohlcoval rázy od spalovacího motoru, ale zároveň tvrdý a odolný vůči abrazi, aby nedošlo k rychlému opotřebení ložisek a následnému zadření motoru. Jelikož jsou ložiska v průběhu pracovního života vysokocyklově namáhána, je důležitá také únavová životnost a zejména odolnost vůči kontaktní únavě. Další nezbytnou vlastností je odolnost vůči creepu, jelikož ložiska pracují za teplot v řádech stovek °C, a je důležité, aby si své mechanické vlastnosti udržely i při vysokých teplotách [1,2,5].

Většina ložisek se tedy vyrábí jako bi-metalová či tri-metalová. Kombinací jednotlivých vrstev materiálu je možné docílit vhodného poměru všech požadovaných vlastností. Jednotlivé materiály a řazení vrstev u nejpoužívanějších motorových ložisek je uvedeno na obrázku 2-3.

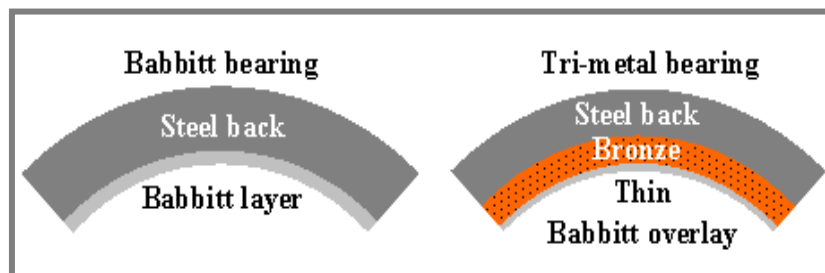


Obr. 2-3 Materiály a řazení vrstev motorových kluzných ložisek [2].

Volba základního materiálu kluzných ložisek je pouze prvním krokem k jeho úspěšné konstrukci. Dále je nutné zvolit třecí povlak, který bude na ložisko nanesen a bude zajišťovat a zlepšovat kluzné vlastnosti. Z hlediska odolnosti a životnosti jsou na povlaky kladeny stejné požadavky jako na ložiskové materiály [1,2].

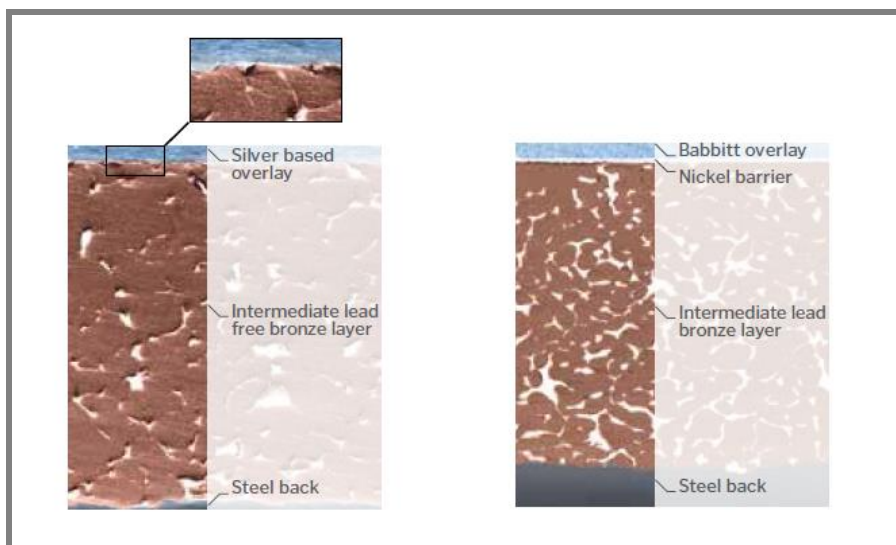
2.1.3 Povlaky kluzných ložisek klikových hřídelů

Podle náročnosti pracovních podmínek se na kluzná ložiska klikových hřídelů nanáší buď povlaky kovové, nebo nekovové. Pro velmi namáhaná ložiska a náročné aplikace se nejčastěji používají kovové povlaky. Ty mohou být na bázi bronzu, stříbra nebo ze speciální slitiny nazývané babbitt. Jedná se o cínovou či olověnou kompozici s přídavkem mědi, antimonu a dalších kovů. Ložiska s tímto povlakem mají vynikající kluzné vlastnosti a používají se zejména v náročných provozních podmínkách, kdy motor dosahuje vysokých otáček a pracuje za vysokých tlaků či teplot. Typickou aplikací tak mohou být motory závodních automobilů, soutěžních speciálů nebo vrtulové letecké motory. Nevýhodou těchto povlaků jsou vyšší náklady na výrobu oproti povlakům nekovovým [6,7,8]. Na obrázku 2-4 je znázorněno složení vrstev bi-metalových a tri-metalových ložisek s babbittovou vrstvou.



Obr. 2-4 Schéma vrstev bi- a tri-metalového ložiska s babbittovým povlakem [6].

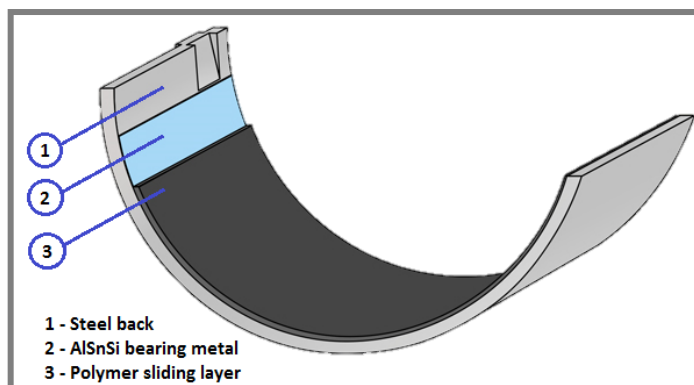
Detailní složení ložiska s ocelovým základním materiálem, bronzovou přechodovou vrstvou a stříbrným, resp. babbittovým povlakem je uvedeno na obrázku 2-5. Ložisko s babbittovou vrstvou navíc obsahuje tenkou niklovou vrstvu, která zabraňuje difuzi [9].



Obr. 2-5 Složení vrstev ložiska se stříbrným a babbittovým povlakem [9].

2.1.4 Polymerní kluzné laky

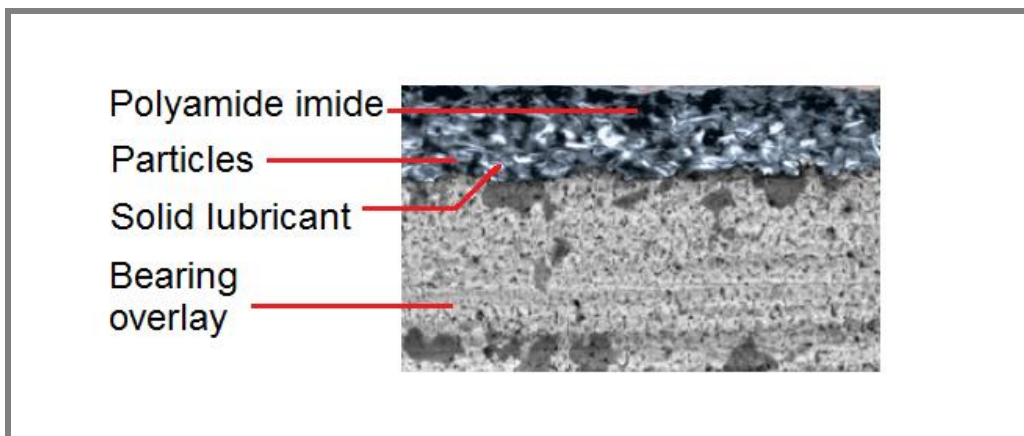
V případě, že motorová ložiska pracují za nižších tlaků, teplot nebo otáček, je možné pro uložení klikového hřídele použít kluzná ložiska s nekovovými povlaky. Nejčastěji používané nekovové povlaky jsou vytvořeny z polymerů a jsou využívány zejména kvůli nižší ceně a levnější technologii nanášení. Polymerní povlaky se často nazývají kluzné laky a mohou být použity pro osobní automobily, motorky či motory ručních pracovních strojů [10,11]. Ložiska jsou, stejně jako v případě kovových povlaků, vyrobena z kompozice několika materiálů. Nejčastěji jsou bi-metalová a na funkční povrch je nanesen kluzný lak, jak je uvedeno na obrázku 2-6.



Obr. 2-6 Schéma vrstev bi-metalového ložiska s polymerním kluzným lakem [11].

Polymerní kluzný lak má 2 základní složky: matici a v ní rozptýlené pevné částice. Matrice zajišťuje soudržnost celé vrstvy, přičemž polymerní částice by v ní měly být rovnoměrně rozptýleny, aby byly zajištěny stejné vlastnosti po celém pracovním povrchu ložiska. Částice jsou přítomny z důvodu zvýšení odolnosti laku a zlepšení mazacích vlastností v případech, kdy není zajištěno dostatečné mazání olejem. Proto jsou ložiska s polymerními laky ve velké míře používána pro moderní spalovací motory, vybavené systémy stop-start. Při těchto podmínkách, kdy dochází k častému vypínání a startování motoru, jsou ložiska výrazně namáhána v důsledku nedostatku maziva v kontaktu. Díky obsahu pevných částic a částečné poddajnosti kluzného laku si však ložiska zachovávají své vlastnosti po dlouhou dobu provozu a nedochází k jejich rychlému poškození [5,10].

Pro vytvoření kluzných laků jsou používány materiály polyamid 6 (PA6), polyvinylidenfluorid (PVDF), vysoko pevnostní polyetylen (UHMWPE), teflon (PTFE) nebo grafit. V automobilovém průmyslu se také čím dál častěji využívá polymer polyamid-imid, který má vynikající kluzné vlastnosti a dobrou chemickou a tepelnou odolnost. Své mechanické vlastnosti si udržuje i při dlouhodobém vystavení nad teplotu 220 °C, a patří tak mezi nejodolnější polymerní materiály používané pro kluzné laky [10,12,13]. Základní vlastnosti polymeru polyamid-imid jsou uvedeny v příloze 1 [14]. Řez ložiskem s naneseným polymerním kluzným lakem je na obrázku 2-7.

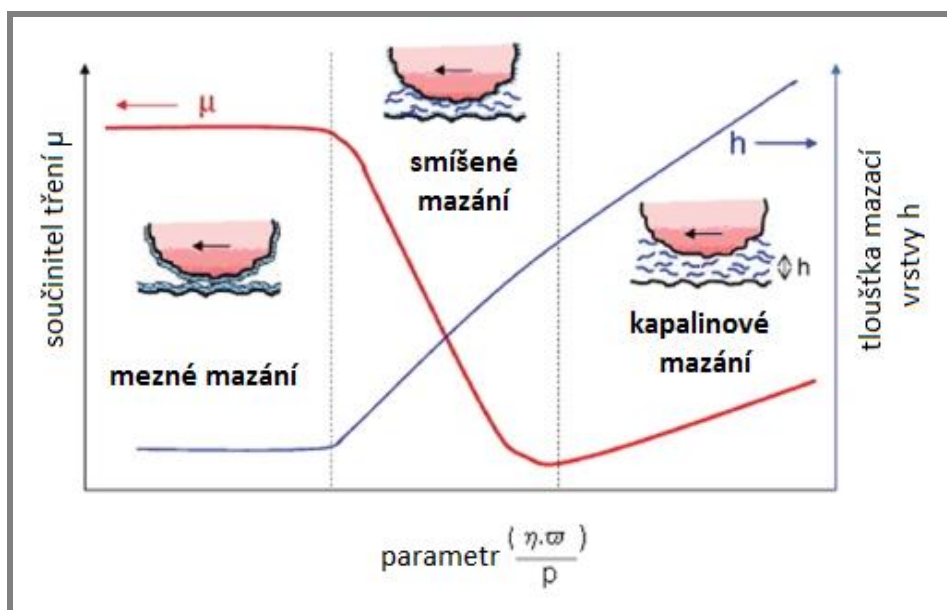


Obr. 2-7 Řez ložiskem s polymerním kluzným lakem [15].

2.1.5 Oblast funkce kluzných laků

Kluzné laky nanášené na povrchy ložisek primárně pracují při startech a dobězích motorů, kdy má motor malé otáčky a olejová čerpadla nezajišťují dostatečnou dodávku oleje. Tyto podmínky způsobují, že v kontaktu není dostatečná vrstva maziva. Z tribologického hlediska se jedná o režim mezného až smíšeného mazání.

Mezný režim mazání je charakteristický tím, že třecí povrchy se buď navzájem dotýkají, nebo jsou odděleny pouze malou vrstvou mezného mazacího filmu. Mazání tak není dáno vlastnostmi maziva, ale vlastnostmi obou povrchů. Po přechodu do smíšeného režimu mazání již lokálně vznikají místa, kde je tloušťka mazací vrstvy dostatečná, ale zejména na nerovnostech povrchů stále dochází ke kontaktu obou těles. Právě proto je vhodné na ložiska nanášet kluzné laky, které mohou výrazným způsobem snížit opotřebení třecích povrchů, prodloužit životnost ložisek a dále snížit součinitel tření, který je v režimu mezného a smíšeného mazání výrazně vyšší než při plném kapalinovém mazání [16,17]. Toto je patrné ze Stribekovy křivky, která je na obrázku 2-8.



Obr. 2-8 Stribekova křivka a tloušťka mazacího filmu [17].

2.2 Metody nanášení povlaků

Povlaky a kluzné laky jsou nejčastěji nanášeny nástřikem a metoda se volí zejména dle podmínek, za kterých bude ložisko pracovat. Materiály kovových povlaků je nutné v průběhu nástřikového procesu natavit pro lepší přilnutí k povlakované součásti. Proto se zde volí metody nanášení za tepla. Pro materiály s nižší teplotou tavení nebo tam, kde není nutné při nanášení materiál zahřívat na vysoké teploty, nacházejí využití metody studeného nástřiku [1,18].

2.2.1 Tepelné nástřiky

Při tepelném nástřiku dochází k natavení či úplnému roztavení povlakovacího materiálu v pracovní komoře nástřikového zařízení. Částice jsou unášeny nosným plynem, čímž dosahují vysoké rychlosti a po dopadu na povlakovanou součást chladnou a ulpívají na jejím povrchu. Tepelné nástřiky se volí pro více namáhané součásti. Tomu odpovídají i odolnější materiály, které se pro tyto povlaky používají. Nejčastěji nanášené povlaky jsou chromové, manganové, wolframové, případně kombinace s NiCr či ZrO_2 [1,19].

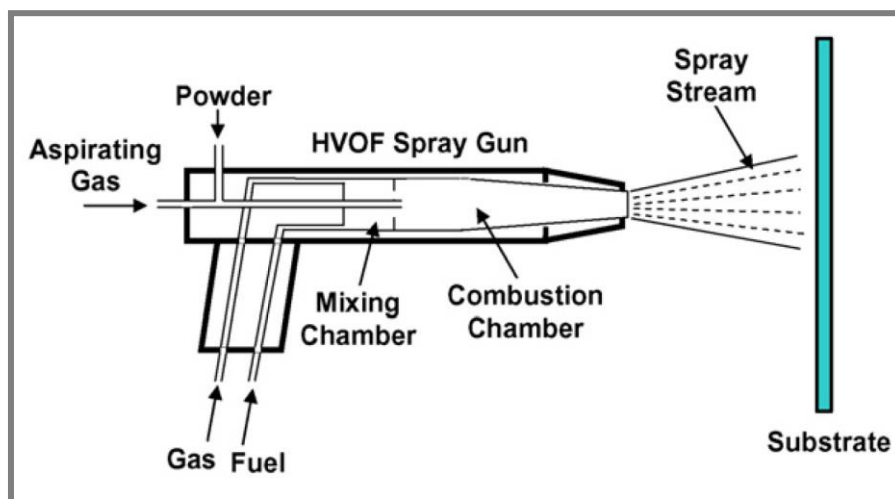
Tyto povlaky nachází využití ve vesmírných programech, energetice a také v automobilovém průmyslu na součástech, které jsou vystaveny vysokým teplotám, vysokému zatížení či koroznímu prostředí [18].

Tepelné nástřiky můžeme dělit do několika kategorií [20,21]:

- žárový nástřik plamenem,
- nástřik plazmou,
- nástřik s využitím elektrického oblouku,
- vysokorychlostní oxidační nástřik plamenem (HVOF).

Dále je možné rozdělení podle formy, ve které je materiál povlaku přiváděn do spalovací komory. Ten může být např. ve formě prášku nebo drátu [21].

Všechny metody jsou podobné z hlediska technologie provedení nástřiku, liší se pouze způsobem, jakým je natavován povlakový materiál, případně jestli k jeho smíchání s nosným plynem dochází ve spalovací komoře, nebo až v oblasti výstupní trysky [20,21]. Příkladem tepelného nástřiku může být metoda HVOF, jejíž schéma je uvedeno na obrázku 2-9.

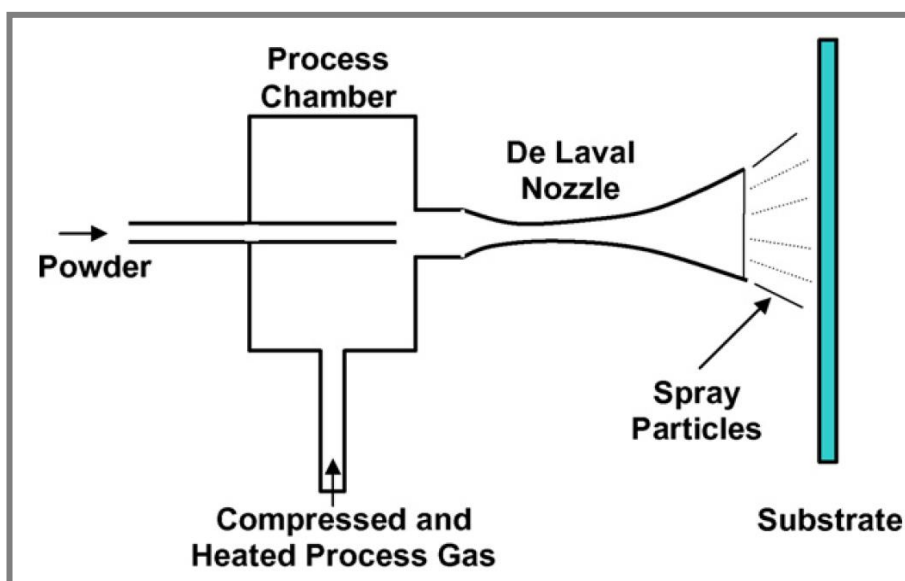


Obr. 2-9 Princip vysokorychlostního oxidačního nástřiku plamenem HVOF [20].

Výhodou technologií tepelného nástřiku je, že je možné nanášet povlaky z různých materiálů a použít materiály s dobrými mechanickými vlastnostmi a vysokými teplotami tavení. Tepelnými nástřiky je možné vytvářet povlaky s nízkou porozitou a konstantní tloušťkou vrstvy, což také patří mezi jejich nesporné výhody [20,21]. Nevýhodou je naopak možná degradace a oxidace, zejména povlakovaného materiálu, vlivem vysokých teplot při nanášení povlaku, případně nemožnost použití těchto metod pro málo odolné základní materiály s nízkými teplotami tavení [20,22].

2.2.2 Studené nástřiky

Studené nástřiky se provádí za teplot, kdy nedochází k natavování částic, které tvoří povlak. Metoda byla vynalezena v polovině 80. let 20. století na Institutu teoretické a aplikované mechaniky Ruské akademie věd v Novosibirsku. Princip metody je takový, že se v pracovní komoře mísí přehřátý plyn, který slouží jako unášecí médium, s práškem povlakového materiálu. Pro vytvoření povlaku je nutné, aby došlo k plastické deformaci částic při nárazu na povlakovanou součást, a tím k jejich ulpění na povrchu součásti. Toho je docíleno průchodem směsí lavalovou dýzou, kde jsou částice urychleny na velmi vysokou rychlost, většinou vyšší než rychlost zvuku [20,22]. Schéma principu technologie studeného nástřiku je uvedeno na obrázku 2-10.



Obr. 2-10 Princip studeného nástřiku [20].

Rozdělení metod studeného nástřiku je možné na základě pracovních tlaků, kterých dosahuje unášecí plyn na [20,22]:

- nízkotlaké (0,1 až jednotky barů),
- vysokotlaké (jednotky až desítky či stovky barů).

Případně lze dělení provést dle použitého pracovního plynu. Použity mohou být [20,22]:

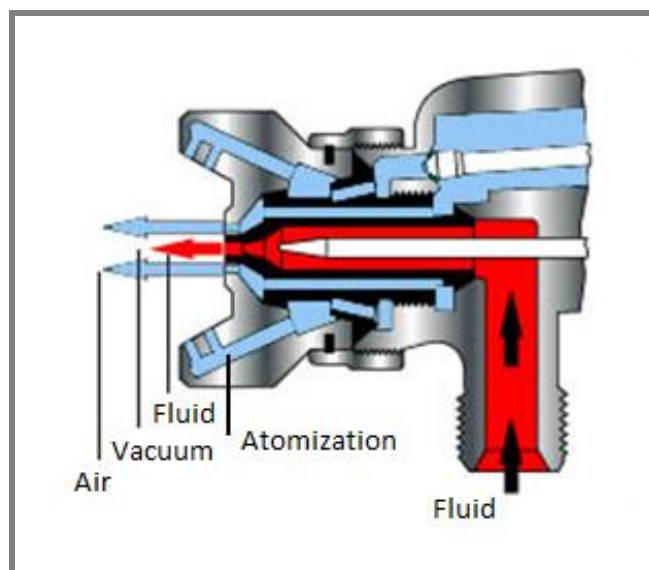
- kyslík,
- dusík,
- vzduch,
- inertní plyny.

Studené nástřikové metody lze využít pro materiály s nižšími teplotami tavení, např. měď, oxid hlinitý a jejich kombinace nebo pro polymerní materiály [20,22]. Výhodami této technologie jsou nízké pracovní teploty, kdy materiál nepřechází do natavené fáze a nedochází tak k jeho překrytalizaci, oxidaci, ani jiné chemické reakci. Další výhodou je, že povlakované součásti jsou jen minimálně tepelně ovlivněny, čímž nevznikají žádná zbytková napětí. Metoda se vyznačuje vysokou účinností a je možné s ní nahradit některé chemické procesy nanášení, kdy je nutné používat zdraví nebezpečné chemické látky či látky, které mohou znečišťovat životní prostředí [20,22].

2.2.3 Studené nástřiky v praxi

Metody studeného nástřiku, které se používají pro průmyslovou výrobu, jsou založeny na principu unášení nástřikovaného média vzduchem. Médium je dodáváno ve formě prášku nebo kapaliny. Tyto nástřiky se používají nejčastěji pro nanášení laků a stříkání barev např. v automobilovém průmyslu.

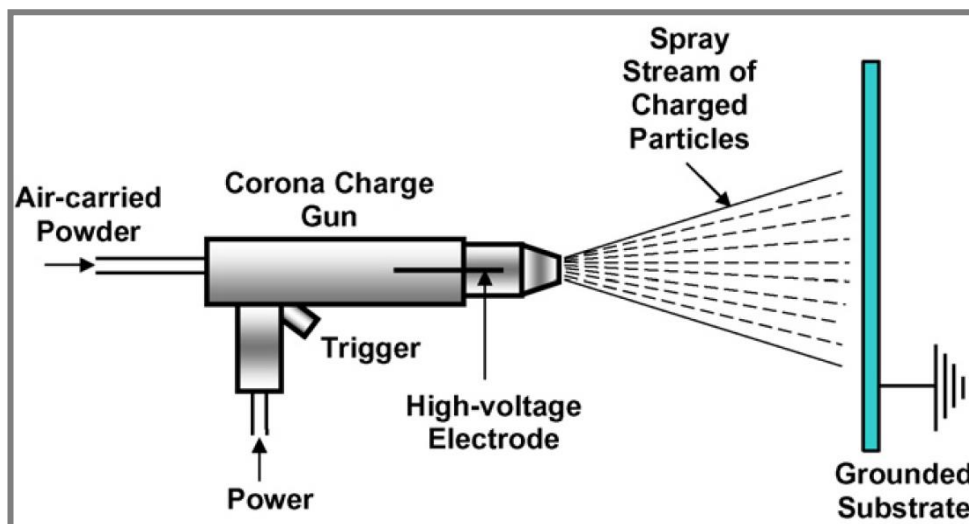
Nejdůležitější součástí celého nástřikového okruhu je stříkácí pistole. Ta funguje tak, že do střední části – trysky – je kanálem přiváděno nástřikované médium a vrtáním v okolí proudí tlakový vzduch. Tímto prouděním vzniká na výstupu z trysky podtlak a rychle proudící vzduch strhává a unáší částice nástřikovaného média k povrchu povlakované součásti. Rovnoměrnost nanášené vrstvy je zajištěna rozprašováním pomocí soustavy bočních děr v okolí trysky, kterými proudí tzv. atomizační vzduch. Tlakem a průtokem atomizačního vzduchu je možné nastavit tvar a rozměry nástřikované stopy (též nazývané jako pattern). Průtok atomizačního a unášecího vzduchu je obvykle regulován ručně, polohou jehly uvnitř přívodních kanálů. Nastavení probíhá před zahájením nástřiku tak, aby bylo dosaženo požadované nástřikové stopy. Regulace množství nástřikovaného média se nejčastěji provádí tlakem v zásobní nádobě nebo výkonem čerpadla a jehla v trysce slouží pouze k uzavření přívodu materiálu. Materiálová jehla je ovládána pneumaticky, čímž může být nástřik automatizován [20,23]. Řez stříkácí pistolí s popisem jednotlivých kanálů je na obrázku 2-11.



Obr. 2-11 Řez stříkácí pistolí [23].

2.2.4 Nástřiky s využitím elektrostatických účinků

Pro nanášení polymerních povlaků je možné použít také elektrostatické nástřikové metody. Do trysky je stejně jako u metody studeného nástřiku přiváděn unášecí plyn spolu s povlakovacím materiálem. Ten je však navíc na výstupu z trysky nabit elektrostatickým nábojem. Povlakovaná součást je uzemněna a v důsledku různých nábojů dochází k uchycení částic povlaku na součásti [20]. Schéma principu metody je uvedeno na obrázku 2-12.



Obr. 2-12 Princip elektrostatického nástřiku [20].

Existují dvě varianty této metody, které se liší způsobem nabíjení částic [20]:

- „corona“ electrostatic spray: nabíjení probíhá vysokým stejnosměrným napětím elektrodou umístěnou uvnitř stříkací pistole,
- „tribo-charge“ electrostatic spray: nabíjení probíhá třením mezi částicemi a vedením uvnitř trysky stříkací pistole.

Elektrostatické nástřiky nacházejí uplatnění zejména při nanášení polymerních materiálů jako je nylon, vinyl a jiné termoplasty [20]. Výhodou metody je vysoká účinnost, rychlost vytvoření povlaku a možnost automatizace nástřikového procesu. Nevýhodou je, že metoda není vhodná pro nanášení vícesložkových materiálů nebo pro případy, kdy je nutné použít rozpouštědlo pro zředění nástřikované směsi. Při použití vícesložkových směsí by měly částice rozdílný náboj a nedošlo by k vytvoření rovnoměrné vrstvy povlaku s požadovaným složením. Povlakované komponenty musí být navíc vyrobeny z elektricky vodivých materiálů, a proto je použití metody omezeno nejčastěji na kovové součásti [20].

2.3 Podobná zařízení

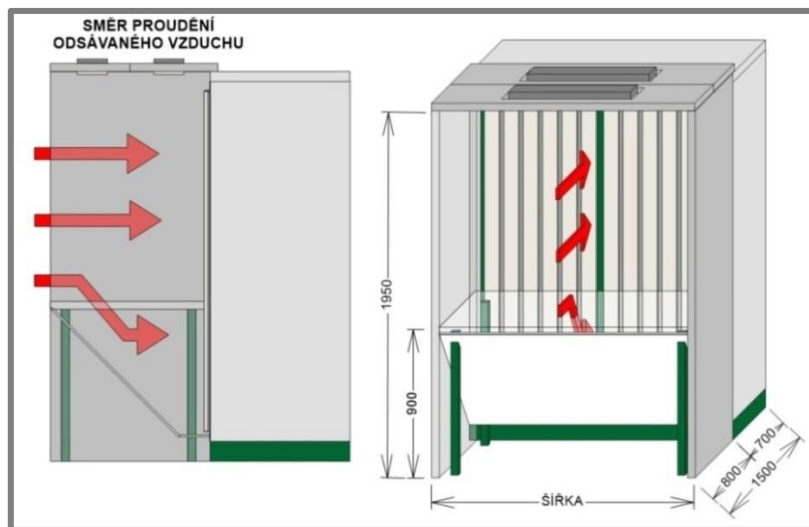
Zařízení navrhované v rámci diplomové práce je svým určením specifické a jednoúčelově zaměřené. Firmy, zabývající se výrobou jednoúčelových strojů, nedávají volně k dispozici materiály ani katalogy, které by koncepci či konstrukční řešení hlavních prvků více popisovaly. Nicméně podobné konstrukční uspořádání a parametry, ze kterých by se pro návrh dalo vycházet, lze nalézt u lakovacích kabin či boxů, které jsou např. v nutnosti odsávání pracovního prostoru a zajištění bezpečnosti obsluhy obdobné.

Na trhu existuje velké množství stříkacích kabin, které mohou být použity pro ruční stříkání nebo jsou předpřipraveny pro automatizovanou výrobu. Mohou obsahovat vícezónové odsávání, vyhřívání pracovní komory pro lepší tvrdnutí laku, několikastupňovou ochranu proti vniknutí nečistot s filtry, a také rekuperační jednotky pro úpravu a znovupoužití odsávaného vzduchu [24,25]. Příklad jednoduché stolové stříkací kabiny je uveden na obrázku 2-13.



Obr. 2-13 Stolová stříkací kabina [26].

Jedním z hlavních a nejdůležitějších prvků u stříkacích kabin je odsávací stěna, jejíž správná funkce je klíčová pro zajištění bezpečnosti obsluhy a vytvoření kvalitního lakovaného povrchu. Stěna v sobě má díry nebo drážky, přes které je odsáván vzduch z pracovního prostoru. Čelní část stěny je většinou vyjímatelná pro snadnější čištění. Dále může být stěna doplněna o vodní spád, který pomáhá zachycovat aerosoly vzniklé při stříkání. Voda je pak filtrována a usazené nečistoty je možné jednoduše oddělit a ekologicky likvidovat. Schéma proudění vzduchu při odsávání u komerčně vyráběné stříkací kabiny je na obrázku 2-14 [25,26].



Obr. 2-14 Schéma proudění vzduchu ve stříkací kabině [26].

Některé boxy bývají připraveny pro automatizovanou nebo poloautomatizovanou výrobu. Automatizace nástřikového procesu je vhodná zejména tam, kde je nutné zajistit opakovatelnou kvalitu nástřiku, nebo je předpoklad velkosériové výroby. Na obrázku 2-15 je zobrazeno univerzální trojosé rameno, určené pro instalace do stříkacích boxů, jehož polohování je zajištěno lineárním vedením s motory. V případě velkých boxů je možné rameno umístit přímo do boxu, kde je však vhodné zajistit dodatečnou ochranu vedení před zanesením nástřikovaným materiálem. Další možností je umístění ramena nad box, kdy je v pracovním prostoru pouze vertikální pohybová osa se stříkacími pistolemi [27]. Obdobné řešení polohování trysky s využitím lineárních vedení je možné použít i pro zařízení navrhované v rámci této diplomové práce.



Obr. 2-15 Univerzální trojosé rameno pro stříkací boxy [27].

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Z rešeršní části práce je možné vyvodit závěry, jakým způsobem se navrhují ložiska pro klikové hřídele, jaké se pro konstrukci ložisek nejčastěji používají materiály a jaké by měly mít vlastnosti. Dále jsou představeny nejpoužívanější druhy povlaků a kluzných laků a uvedeny příklady jejich použití v současném automobilovém průmyslu. Popsány jsou také technologie nanášení, jejich fyzikální principy a vhodnost použití pro jednotlivé povlakovací materiály a povlaky.

Z hlediska technologie nanášení je pro polymerní kluzné laky nejvhodnější technologie studeného nástřiku. Tato metoda bude proto zvolena i pro navrhované zařízení a bude nutné najít parametry nástřikového okruhu tak, aby bylo možné vytvořit souvislou vrstvu v dostatečné tloušťce po celém obvodu ložisek. Konstantní tloušťku vrstvy je možné zajistit automatizací všech pohybů spojených s nástřikem a to jak pohybu stříkací pistole, tak ložisek. Automatizace je nutná také z důvodu zajištění opakovatelnosti nástřikového procesu. Pro polohování stříkací pistole bude vhodné použít lineární vedení a pohon motory. Vodící mechanismy musí být v pracovním prostoru krytovány, aby nedošlo k jejich rychlému zanesení nastřikovaným polymerem a poškození. Nástřik bude probíhat pouze ve směru od obsluhy a nepředpokládá se nanášení v kolmém směru na pracovní stůl. Z tohoto důvodu nebude nutné řešit odsávání přes stůl a pracovní podložku, které se využívá pouze v případech kolmého nástřiku.

Pro zajištění bezpečnosti musí být celý pracovní prostor oddělen od všech elektrických prvků a krytován ze všech stran. Přístup bude jen z jedné strany přes dveře, jejichž poloha bude sledována snímačem, a v případě, že dojde k otevření dveří během nástřiku, musí dojít k jeho okamžitému přerušení. Kvůli krytování bude odvětrávání řešeno přes digestoř v horní části pracovní kabiny. Toto umístění je výhodné také vzhledem k tomu, že odvod vzduchu bude připojen na centrální rozvody a připojení bude velmi jednoduché – pouze použitím přechodové příruby s připojovacími vedením.

Celá základní konstrukce navrhovaného zařízení bude vycházet z požadavků na stříkací kabiny a vysoký důraz bude při návrhu kladen na bezpečnost. Zařízení musí splňovat všechny bezpečnostní normy jak z hlediska ochrany obsluhy, tak ochrany životního prostředí. Směrodatné budou v tomto ohledu zejména normy ČSN EN 12215 „Bezpečnostní požadavky na lakovny a stříkací kabiny pro nanášení organických tekutých nátěrových hmot“ a ČSN 60079 pro výbušné atmosféry kvůli používaným materiálům. Zařízení musí být zároveň ergonomické a univerzálně nastavitelné v rozsahu, který je zadán požadovanými parametry.

Navrhované zařízení je určeno pro zahraniční firmu, která podobné zařízení provozuje v mateřském závodě v Japonsku. Japonské zařízení je uzpůsobeno na nástřik většího množství kluzného laku, a tím určeno pro výrobu ve větších sériích. S rozšiřováním aktivit zadavatele v oblasti výzkumu a vývoje nových materiálů pro kluzná ložiska klikových hřídelů vznikl požadavek na konstrukci nového zařízení, které umožní jednoduchou výměnu nastřikované polymerní směsi a bude univerzálně použitelné pro velké rozsahy rozměrů ložisek. Zařízení musí zároveň odpovídat příslušným bezpečnostním normám a požadavkům platným v Evropské unii a České republice.

3.2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je navrhnout a zkonstruovat zařízení pro nanášení polymerních kluzných laků na ložiska klikových hřídelů. Zařízení má umožnit regulaci tloušťky nanášené vrstvy a zajistit opakovatelnost nástřikového procesu bez odchylek v kvalitě. Výstupem práce je funkční zařízení, které bude plnit úkoly v rámci výzkumu a vývoje v dané oblasti.

Náplní této diplomové práce je návrh koncepce celého zařízení spolu s vyřešením ergonomie ovládání. Dále konstrukční návrh všech komponent polohovacího systému, nástřikového okruhu a zajištění bezpečnosti dle příslušných norem a předpisů. Součástí konstrukčního návrhu je také vytvoření kompletní výkresové dokumentace a zadání do výroby. Závěrečným krokem v řešení diplomové práce je montáž zařízení a ověření jeho funkčnosti provedením zkušebních nástřiků. Elektrické zapojení a vývoj řídicího programu bude řešen v rámci kooperace.

Řešení diplomové práce bylo rozděleno do několika etap, aby bylo možné provádět průběžnou kontrolu:

- konstrukční návrh dílčích skupin,
- vytvoření 3D modelu a výpočty pomocí MKP,
- vytvoření výkresové dokumentace,
- výroba zařízení – zadáno externím firmám,
- montáž,
- prvotní testování na vzorcích,
- provedení testovacích nástřiků na ložiska a ověření celkové funkčnosti.

Na základě rešerše a požadavků zadavatele byly stanoveny vstupní parametry, ze kterých se bude při návrhu zařízení vycházet:

- Velikost pracovního prostoru:
 - 650 x 650 mm.
- Lineární vedení:
 - opakovatelná přesnost polohování 0,1 mm,
 - max. rychlost posuvu $v_{\max}=100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ s možností regulace,
 - délka vertikálního posuvu 300 mm,
 - délka horizontálního posuvu 200 mm,
 - délka přísuvu 50 mm.
- Rotační upínací deska:
 - otáčky 300 min^{-1} s možností regulace 0 až 100 %,
 - rozsah upínaných kruhových ložisek $\varnothing 30$ až $\varnothing 150$ mm.
- Lineární upínací deska:
 - rozsah délky upínaných ložisek 10 až 200 mm,
 - snadná manipulace.
- Látky tvořící kluzný lak:
 - dynamická viskozita směsi polymeru $\eta=0,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,
 - tloušťka nanášené vrstvy laku $h=5-10 \text{ } \mu\text{m}$.
- Tlak vzduchu v pneumatickém okruhu:
 - max. 7 barů.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

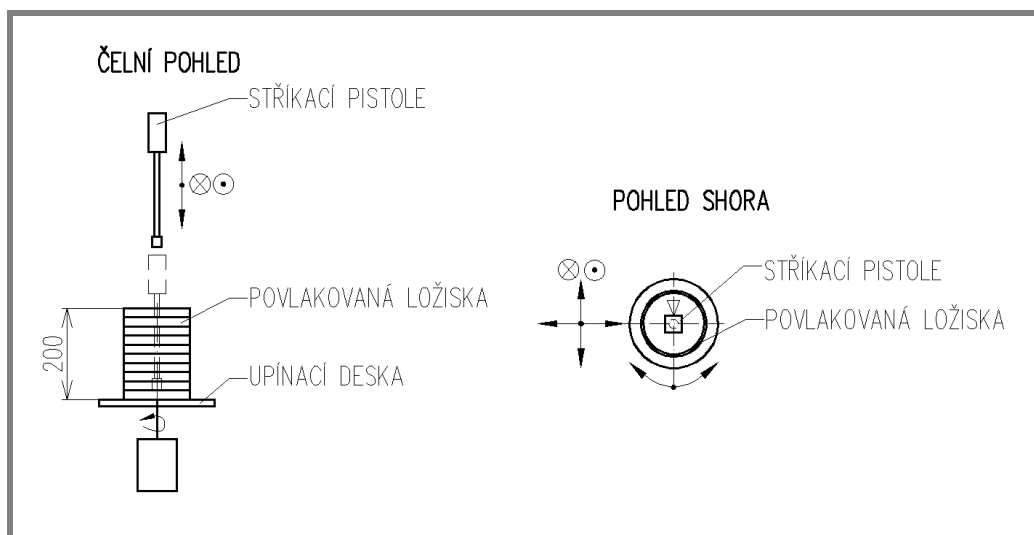
4.1 Koncepční návrh nařízení

Zařízení má dle požadavků zadání umožnit nástřik na kruhová a lineární ložiska případně malé laboratorní vzorky. Před návrhem zařízení je nutné vytvořit koncepci nástřiku pro oba tyto případy tak, aby byl vždy zajištěn nástřik rovnoměrné vrstvy kluzného laku po celé ploše ložisek v odpovídající kvalitě.

4.1.1 Koncepce nástřiku kluzného laku

Nástřik na kruhová ložiska bude probíhat pomocí složeného pohybu. Kruhová ložiska se nejprve naskládají tak, aby vytvořila dutý válec o výšce max. 200 mm. Poté se do středu válce spustí stříkácí pistole s prodloužením a pohybem směrem vzhůru dojde k nástřiku kluzného laku. Během nástřikového procesu budou ložiska rotovat tak, aby se vytvořila rovnoměrná vrstva laku o požadované tloušťky. Stříkácí pistole použita pro navrhované zařízení proto musí být osazena prodloužením, které umožní nástřik pod úhlem až 90°.

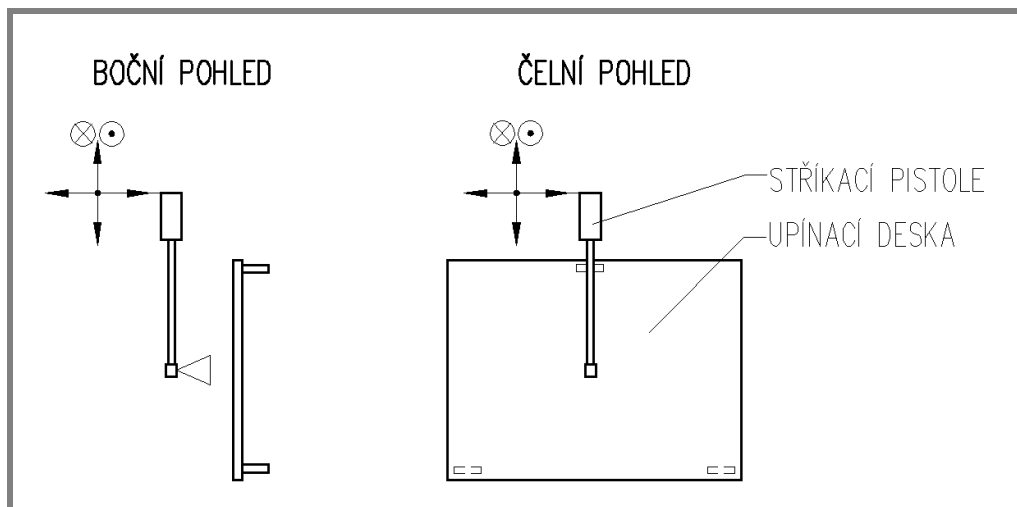
Před nástřikem budou ložiska nejprve pískována pro zvýšení drsnosti povrchu a poté vložena do pece k předehřátí. Obě tyto operace zajistí lepší přilnutí polymerního laku k povrchu ložisek a jsou nezbytné pro vytvoření souvislé vrstvy s požadovanými vlastnostmi. Po provedení nástřiku se ložiska opět vkládají do pece pro vytvrzení laku. Pro zjednodušení manipulace během všech těchto technologických operací bude vhodné vytvořit univerzální upínací šablonu, v níž budou ložiska po celou dobu uchycena. Šablona musí být rozdělena na poloviny, protože ložiska mají půlkruhový tvar. Až složením těchto dvou částí se vytvoří dutý válcový otvor, do kterého se spustí stříkácí pistole s prodloužením. Schéma principu nástřiku na kruhová ložiska je na obrázku 4-1.



Obr. 4-1 Schéma principu nástřiku laku na kruhová ložiska.

Nástřik na lineární ložiska bude probíhat tak, že se ložiska upnou na desku a ručním přísuvem se nastaví vzdálenost, ze které bude prováděn nástřik. Pohyb dvou os bude motorický a automatizovaný. Pomocí tohoto složeného dvouosého pohybu se nanese kluzný lak na povrch lineárních kluzných ložisek nebo laboratorních vzorků,

které se budou používat pro tribologické testy. Schéma nástřiku na lineární ložiska je na obrázku 4-2.

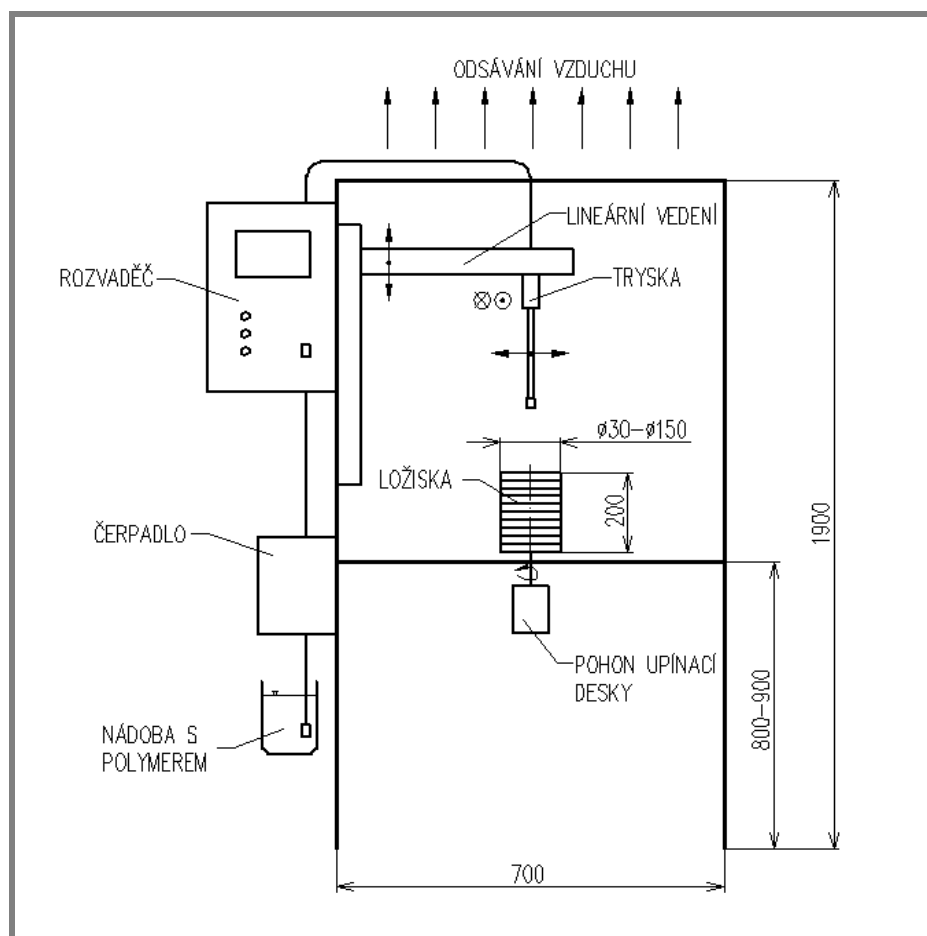


Obr. 4-2 Schéma principu nástřiku na lineární ložiska.

4.1.2 Koncepční návrh zařízení

Po vytvoření konceptu nástřiku a definování nutných rozsahů pohybů je možné přistoupit ke koncepčnímu návrhu zařízení a rozmístění hlavních komponent. Jedním z hlavních požadavků, který určuje výslednou konstrukci, je velikost pracovního prostoru. Ten musí být dostatečně velký, aby bylo možné pohodlně manipulovat s ložisky během upínání, a také aby nemohlo dojít k žádnému poranění obsluhy. Jelikož budou zařízením nanášeny různé druhy polymerů, které tvoří kluzné laky, musí být zajištěn dostatečný prostor pro umístění zásobníku na polymerní směs a zvoleno takové řešení, aby byla výměna směsi co nejjednodušší a nejrychlejší. Zařízení bude obsluhováno ve stoje. Výška pracovního stolu zařízení proto odpovídá výšce dílenských stolů. Ty mají ve většině případů pracovní desku ve výšce 800 až 900 mm od podlahy.

Koncepční návrh zařízení se základními rozměry a rozmístěním jednotlivých komponent je na obrázku 4-3.



Obr. 4-3 Konceptní návrh zařízení se základními rozměry.

4.2 Komponenty použité pro konstrukci zařízení

4.2

Na základě vytvořeného konceptního návrhu je možné zařízení rozdělit do několika hlavních konstrukčních skupin:

- rám,
- čerpací a nástřikový okruh,
- pneumatický obvod,
- lineární vedení a pojezdy,
- karuselová upínací deska s pohonem,
- řídicí elektronika,
- snímače a bezpečnostní prvky.

4.2.1 Rám

Rám je hlavním prvkem zařízení a musí zajistit zejména dostatečnou tuhost. Konstrukce bude buď svařovaná, nebo montovaná z hliníkových profilů. Výhodou montované konstrukce je, že se jedná o modulární systém, který lze v případě potřeby jednoduše upravit přidáním nebo odebráním profilů. Svařovaná konstrukce je naopak robustnější a je vyloučena možnost povolení spojených profilů v průběhu provozu. Hlavním kritériem pro volbu konstrukce budou finanční náklady na výrobu.

4.2.2 Čerpací a nástřikový okruh

Celý okruh se bude skládat z několika hlavních částí:

- zásobní nádrže,
- čerpadla nebo tlakové nádoby,
- stříkací pistole s prodloužením,
- hadic a vedení.

Před zahájením nástřiku je nejdříve nutné smíchat polymer s rozpouštědlem. Tím se sníží jeho viskozita a je možné provést nástřik. Pro ředění polymerů, nástřikovaných navrhovaným zařízením, bude použita látka methylpyrrolidon (NMP). NMP je zdraví nebezpečné rozpouštědlo a je klasifikováno jako látka s nebezpečím výbuchu. Zařízení tak bude muset odpovídat příslušným bezpečnostním normám. Základní vlastnosti rozpouštědla NMP jsou uvedeny v příloze 2 [28]. Smíchání polymeru s rozpouštědlem bude probíhat v zásobní nádobě, která by měla obsahovat i míchadlo, které jednak zajistí dokonalé rozmíchání rozpouštědla s polymerem a také zamezí zasychání směsi ještě před nástřikem. Rozpouštědlo nutné k ředění polymeru je agresivní chemická látka, a proto musí být všechny komponenty nástřikového okruhu, které s ním přijdou do styku, vyrobeny z nerezové oceli. Těsnění a hadice musí být z teflonu, který je vůči působení rozpouštědla odolný. Rozpouštědlo ve výsledném kluzném laku nezůstává, ale po nástřiku se vypaří.

Ze zásobní nádoby bude přes čerpadlo dopravována připravená směs přes ventily až do stříkací pistole a trysky. Pro dopravu polymeru se nabízí dvě možnosti.

První z nich je použití pumpy nebo čerpadla. Pístová pumpa pro tuto aplikaci není vhodná, protože by polymer byl v kontaktu s pístem, který je mazán, a mohlo by docházet k mísení polymeru s olejem, jehož přítomnost je ve výsledném laku nežádoucí. Vhodnější je použít membránovou pumpu, kde je pracovní komora od funkčních částí oddělena pružnou membránou. Nevýhodou při použití membránové pumpy jsou možné tlakové oscilace v obvodu. Ty je možné částečně omezit použitím regulačních ventilů. Při nástřiku malých objemů, které jsou předpokládány pro navrhované zařízení, však mohou i malé tlakové rozdíly ovlivnit rovnoměrnost nastřikované vrstvy kluzného laku.

Pomocí membránové pumpy je řešeno původní zařízení používané v Japonsku. Pumpa použitá na japonském zařízení je na obrázku 4-4.



Obr. 4-4 Membránová pumpa firmy Meijiair Co., typ PDP-05-SU [29].

Druhou možností pro dopravu polymeru do stříkací pistole je použití tlakových nádob, které se před zahájením nástřiku natlakují, a poté fungují jako zdroj média samostatně. I během nástřikového procesu je do nádob přiváděn tlakový vzduch a je tak zajištěna stálá dodávka materiálu bez tlakových oscilací. Výhodou tlakových nádob je, že v porovnání s membránovou pumpou v okruhu cirkuluje jen minimální množství materiálu. Tím odpadá ztrátový objem, který se vrací zpětnou větví do pumpy, nebo je zachycen v odpadní nádobě. Nevýhodou řešení s použitím nádob je, že systém zatím nebyl pro danou aplikaci vyzkoušen a může být problematické jej odladit na požadované parametry. Příklady tlakových nádob pro nástřiky jsou uvedeny na obrázku 4-5.



Obr. 4-5 Tlakové nádoby MDG od firmy Walther-pilot [30].

Další důležitou součástí nástřikového okruhu je stříkací pistole. Většina průmyslově používaných pistolí pracuje na stejném principu, jako je uvedeno v kapitole 2.2.3, a jejich výběr se provádí na základně parametrů nastříkovaného média. Hlavním kritériem pro výběr je viskozita nanášené směsi, průtok, tlak vzduchu a požadovaný tvar nástřikové stopy.

Stříkací pistole, používaná na japonském zařízení, je na obrázku 4-6. Jedná se o model Lumina ST-6-C8 od firmy Fuso Seiki Co., Ltd. Použití této pistole s prodloužením je pro nástřik na ložiska velmi výhodné, díky tvaru nástřikové stopy a možnosti nástřiku na vnitřní válcové plochy pod úhlem 90°.



Obr. 4-6 Stříkací pistole Lumina ST-6-C8 [31].

Alternativami dostupnými na českém trhu jsou např. stříkácí pistole Pilot WA 600 s prodloužením DV 80 od německé firmy Walther-Pilot nebo pistole typ A11 od firmy Krautberger. Tyto stříkácí pistole jsou na obrázku 4-7 a 4-8.



Obr. 4-7 Stříkácí pistole WA 600 a prodloužení DV 80 [30].



Obr. 4-8 Stříkácí pistole Krautberger A11 a detail trysky prodloužení [32].

4.2.3 Pneumatický obvod

Pneumatický obvod je součástí nástřikového okruhu a bude zajišťovat zejména úpravu tlakového vzduchu, automatizaci celého nástřikového procesu a možnost nastavení a regulaci parametrů, které ovlivňují nástřik, resp. výsledný kluzný lak. Tlakový vzduch bude odebírán z centrálního rozvodu, takže zařízení nebude nutné osazovat kompresorem. Jelikož nemusí být z centrálního rozvodu zajištěna stálá čistota a kvalita vzduchu, prvním prvkem celého obvodu bude filtr s odlučovačem kondenzované vlhkosti. Do obvodu bude nutné zařadit regulátory pro nastavení tlaku vzduchu a také ventily. Ty budou buď ruční, např. kulové, nebo elektromagnetické,

aby bylo možné nástřikový proces automatizovat a přepínat větve řídicím programem. Všechny prvky, které přijdou do kontaktu s rozpouštědlem, musí být stejně jako komponenty nástřikového okruhu z nerezové oceli nebo, v případě těsnění, z teflonu.

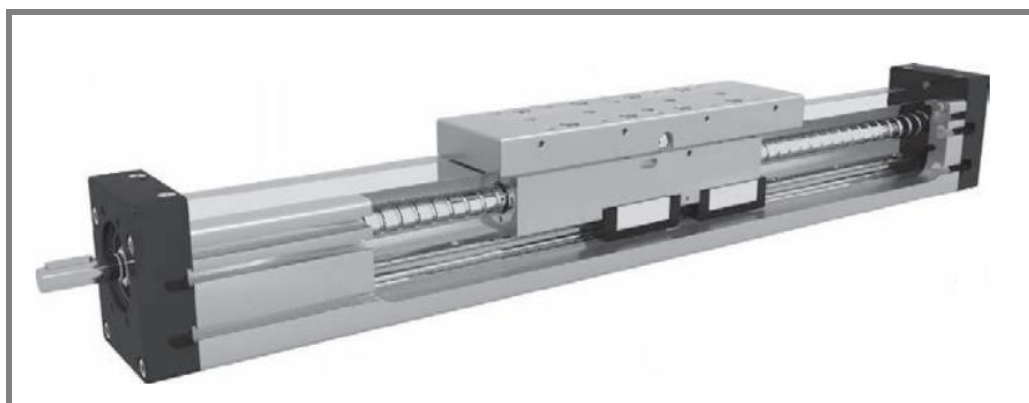
Na obrázku 4-9 je příklad úpravny vzduchu, ručního regulátoru a elektromagnetického ventilu od firmy Festo, s.r.o., které mohou být v obvodu použity.



Obr. 4-9 Pneumatické prvky firmy Festo [33].

4.2.4 Lineární vedení a pojezdy

Pohyb stříkací pistole bude zajištěn trojosým polohovacím systémem. Jednou z možností je použití lineárních vodících tyčí s ložiskovými domky a pohonem ozubeným řemenem či kuličkovým šroubem. Vzhledem k tomu, že pohony a vedení budou uvnitř pracovního prostoru, kde bude probíhat nástřik kluzného laku, je vhodné zvolit zakrytované a utěsněné moduly tak, aby bylo zamezeno vniknutí polymeru s rozpouštědlem do posuvného mechanismu. Tyto moduly nabízí několik firem a jejich výhodou je možnost poskládání do víceosých systémů. Jednou z možných řešení je modul MTV od firmy Matis, s.r.o., zobrazený na obrázku 4-10.



Obr. 4-10 Krytovaný lineární modul MTV [34].

Vertikální a horizontální posuvové osy budou složeny z lineárních modulů a poháněny motorem. Pohyb vozíku může být proveden kuličkovým šroubem nebo šroubem s lichoběžníkovým závitem. Výhodou kuličkových šroubů je vysoká účinnost a vyšší přesnost polohování. Nevýhodou je, že kuličkový šroub není

samosvorný, a proto musí motor obsahovat brzdu pro zajištění polohy. Šrouby s lichoběžníkovým závitem mají naopak větší tření v závitech, ale jsou samosvorné. Této vlastnosti může být s výhodou využito pro zajištění bezpečnosti. V případě poruchy motoru nebo brzdy motoru totiž nedojde k náhlému posunutí nebo dokonce pádu vozíku. Tím je zajištěna bezpečnost obsluhy. Existují také pneumatické moduly, kdy je vozík polohován stlačeným vzduchem a modul funguje podobně jako pneumatický válec. Tyto moduly nebudou pro řešení použity z důvodu možných problémů při přesném a opakovaném polohování stříkací pistole.

Třetí osa bude ovládána pouze ručně a bude zajišťovat přísuv a vymezovat vzdálenost, ze které bude prováděn nástřik. Zde bude vhodné použít vozík, který zajistí rychlé nastavení požadované polohy. Nastavenou polohu by mělo být možné aretovat a zajistit tak konstantní vzdálenost v průběhu celého nástřiku. Použít může být například vozík firmy Misumi, s ozubeným hřebenem, typ XDTS90, který je na obrázku 4-11.



Obr. 4-11 Vozík Misumi XDTS90 [35].

4.2.5 Upínací desky

Upínací desky budou dvě. Jedna pro kruhová a druhá pro lineární ložiska. Obě desky musí být vyrobeny z nerezové oceli, aby byla zajištěna odolnost vůči nástřikované směsi a rozpouštědlu.

Pro kruhová ložiska bude nutné desku opatřit středěním. Tím bude zajištěna stejná poloha ložisek s osou rotace upínací desky. Pro tento účel mohou být použity středící kolíky, případně tvarové upínače. Jelikož bude upínací deska rotovat až 300 min^{-1} , musí být ložiska k desce pevně přichyceny, aby nedošlo k jejich uvolnění. Zde mohou být použity šrouby, případně excentrické upínače.

Deska pro lineární ložiska a laboratorní vzorky bude vyjímatelná, a to kvůli lepší manipulaci při upínání. Přichycení dílů může být provedeno pomocí magnetů zapuštěných do desky nebo upínkami. Deska bude dále plnit funkci zkušebního ostříkacího terče a její ustavení uvnitř stříkací kabiny bude provedeno pomocí středících čepů, aby byla zajištěna stále stejná poloha.

4.2.6 Řídící elektronika

Řídící elektronika bude obstarávat veškerou komunikaci mezi jednotlivými komponenty, řídit pohyb lineárních modulů a ovládat čerpací okruh. Pohon lineárních modulů budou obstarávat 2 servomotory a karuselovou desku bude pohánět DC motor. Automatizování a ovládání nástřikového obvodu bude zajištěno elektromagnetickými ventily. Řízení bude probíhat přes PLC jednotku a nastavování

parametrů nástřiku bude obsluha provádět přes dotykový display. Na něm se budou zobrazovat aktuální informace o nástřiku a provozní stavy zařízení. Pro pohodlnou obsluhu bude zvolen display s úhlopříčkou 7" od firmy B&R Automation, který je zobrazen na obrázku 4-12.



Obr. 4-12 Dotykový display ATOM 7" C [36].

4.2.7 Snímače a bezpečnostní prvky

Zařízení bude také nutné osadit prvky aktivní a pasivní bezpečnosti. Poloha zavřených dveří bude kontrolována pomocí koncových spínačů. Pokud dveře nebudou řádně zavřeny, nebude možné zahájit nástřikový proces. Případně, dojde-li k otevření dveří během nástřiku, musí být nástřik okamžitě přerušeno.

Dalšími prvky budou indukční či koncové snímače pro kontrolu koncových poloh lineárních modulů. Jejich použitím bude zajištěno, že nedojde k najetí posuvem až do úplné koncové polohy, což by mohlo vést k poškození modulů nebo pohybového mechanismu. Zároveň je možné využít koncové spínače pro definici nulového bodu stroje v rámci pracovního prostoru.

Vzduch ze stříkací kabiny musí být odsáván, aby nemohlo dojít ke zvýšení koncentrace nebezpečných látek v pracovním prostoru. V případě nutnosti bude kabina osazena tlakovými snímači, aby byl kontrolován stálý podtlak v průběhu nástřikového procesu a nemohlo dojít k úniku nebezpečných chemikálií do okolního prostředí [37,38].

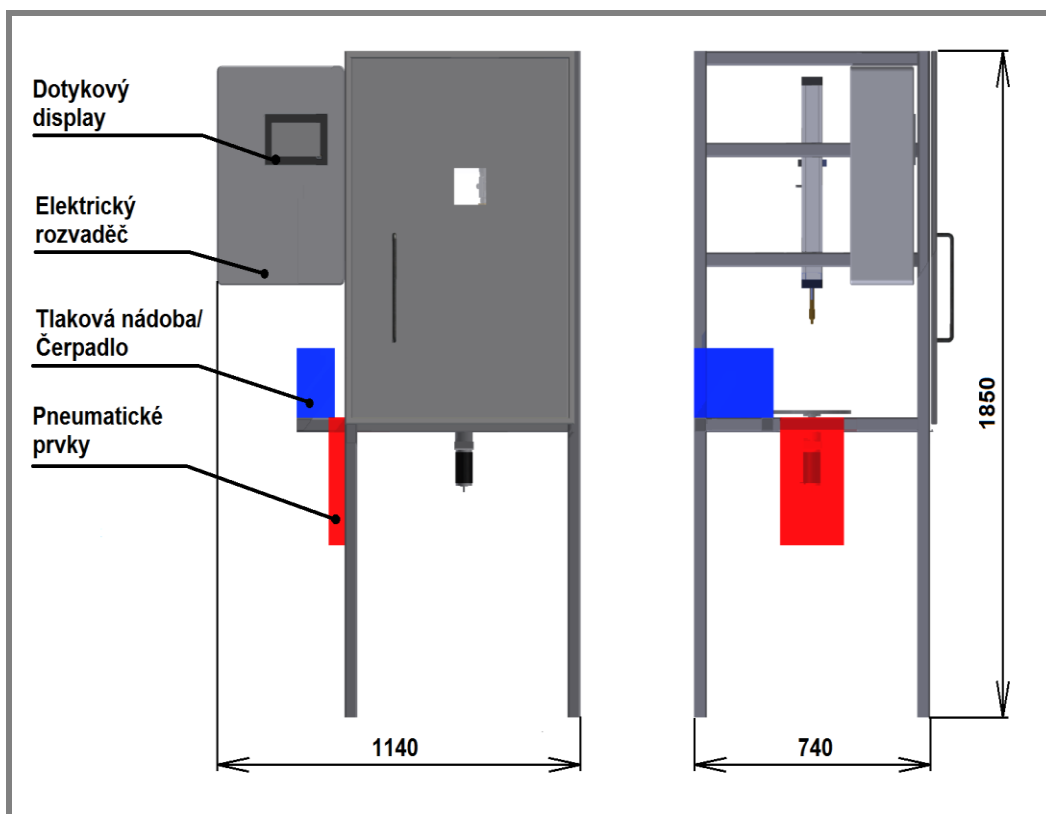
Samozřejmostí je také zajištění bezpečnosti obsluhy zařízení. Z přední strany budou dveře pro vstup do stříkací kabiny a zbytek zařízení bude krytován nerezovými plechy. Elektronika bude oddělena přepážkou kvůli bezpečnostním požadavkům podle normy ČSN 60079. Podle této normy nemohou být v prostoru s látkami s nebezpečím výbuchu žádné elektrické komponenty bez příslušné certifikace ani prvky, které mohou způsobit vznícení či elektrický zkrat. Všechny plechové díly proto budou uzemněny. Průzory, kterými může obsluha sledovat průběh nástřiku, budou mít velikost max. 100x100 mm, aby nemohlo dojít k hromadění statické elektřiny na velkých neuzemněných plochách a případnému výboji [37,38].

4.3 Konstrukční návrhy a ergonomické řešení

Po vytvoření základního koncepčního návrhu a výběru komponent je možné vytvořit konstrukční návrhy zařízení, které detailně řeší ergonomii ovládání a obsluhy, a také se zabývají rozmístěním jednotlivých konstrukčních skupin a součástí. Navržené varianty se liší zejména rozmístěním hlavních prvků, případně použitými komponenty podle toho, jak se měnily či byly doladovány jednotlivé konstrukční skupiny. Protože je zařízení navrhováno pro použití ve výzkumu a vývoji, a není plánována jeho sériová výroba, nebyl vyroben žádný prototyp, který by ověřoval ergonomii a funkčnost. Návrhy vznikaly pouze jako 3D modely v prostředí programu Autodesk Inventor 2015.

4.3.1 Konstrukční varianta 1

První varianta konstrukce zařízení vychází z koncepčního návrhu. Přístup do pracovního prostoru je navržen z přední strany přes dveře. Ostatní strany jsou krytovány nerezovým plechem. V levé části je prostor pro umístění čerpadla a zásobníku na polymer. Vedle čerpadla jsou umístěny pneumatické regulační prvky. V této fázi návrhu bylo uvažováno, že směs polymeru s rozpouštědlem bude připravována mimo zařízení, a nebylo tak nutné navrhovat prostor pro manipulaci se zásobníkem směsi. Ten by se před nástřikem pouze umístil k čerpadlu. V levé horní části se nachází elektrický rozvaděč s dotykovým ovládacím displejem. Návrh první konstrukční varianty se základními rozměry je na obrázku 4-13 (pro přehlednost není zobrazeno krytování stříkací kabiny, ale ponechány jsou dveře).

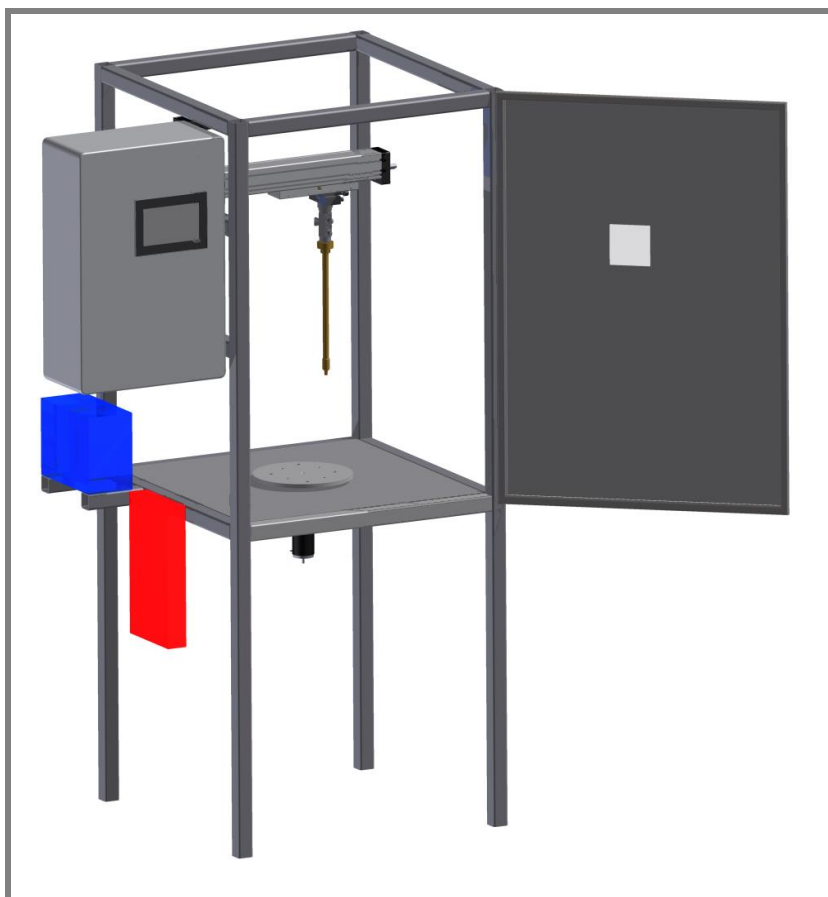


Obr. 4-13 Konstrukční varianta 1.

První varianta je navržena hlavně pro ověření koncepčního návrhu a vytvoření lepší představy o nezbytných zástavbových rozměrech pro přidělení lineárních modulů a dalších konstrukčních skupin.

Zhodnocení

Návrh je poměrně kompaktní a není potřeba velký prostor pro umístění zařízení i při dodržení zadaných hodnot vnitřního prostoru stříkací kabiny. Přestože požadavky na rozměry pracovního prostoru jsou splněny, stříkací kabina není příliš velká a lineární moduly se stříkací pistolí by mohly omezovat manipulaci s ložisky nebo upínání desky pro lineární ložiska. Nevýhodou také je, že rozvaděč a pumpa jsou na jedné straně, a mohlo by dojít k převrácení zařízení, což je nepřijatelné. Pro lepší vizualizaci návrhu je na obrázku 4-14 zobrazen 3D pohled na 1. konstrukční variantu i s naznačeným otevíráním dveří.

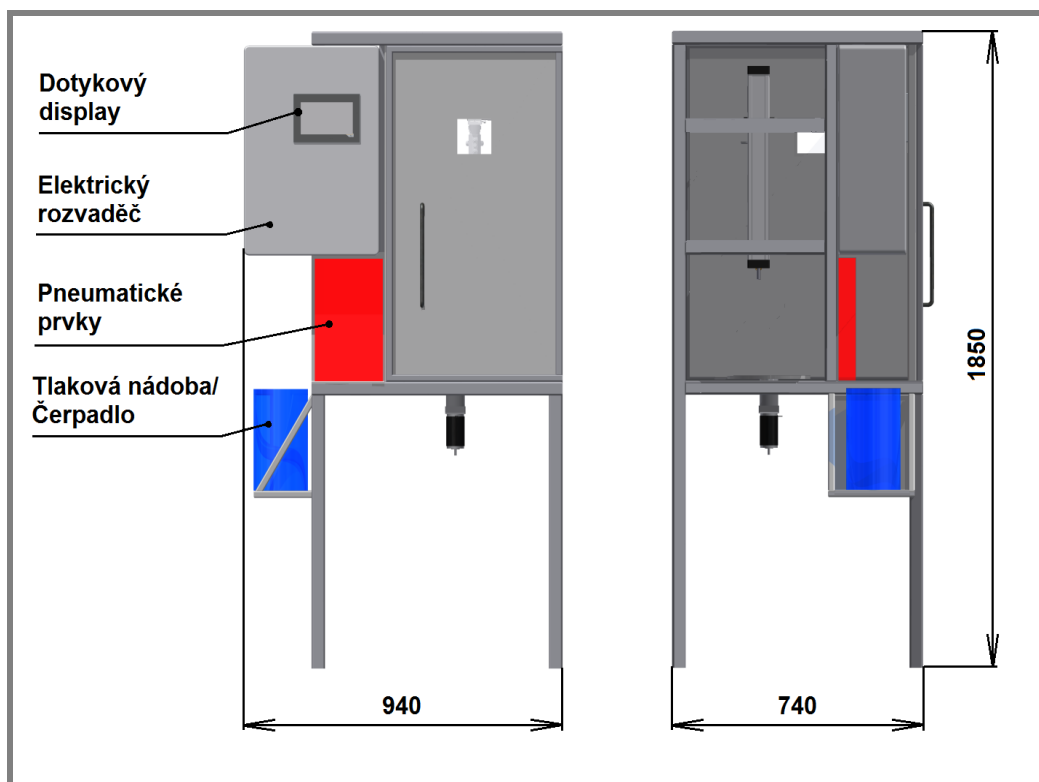


Obr. 4-14 3D pohled na variantu 1.

4.3.2 Konstrukční varianta 2

Po zjištění potřebných zástavbových prostor a navržení rozmístění základních konstrukčních skupin byl vytvořen druhý návrh, který lépe zohledňuje požadavky na ergonomičnost zařízení. Dveře byly zvětšeny a přístup do stříkací kabiny je nyní ze dvou stran. Tím se výrazně zlepšila přístupnost pracovního prostoru a obsluha má více místa pro manipulaci s ložisky. Čerpací systém se zásobníkem polymerní směsi jsou umístěny zčásti pod úroveň pracovního stolu, čímž se manipulační prostor také zvětšil. Elektrický rozvaděč s displejem se nachází v levé horní části, ale byl zapuštěn do rámu, aby se těžiště posunulo více ke středu zařízení

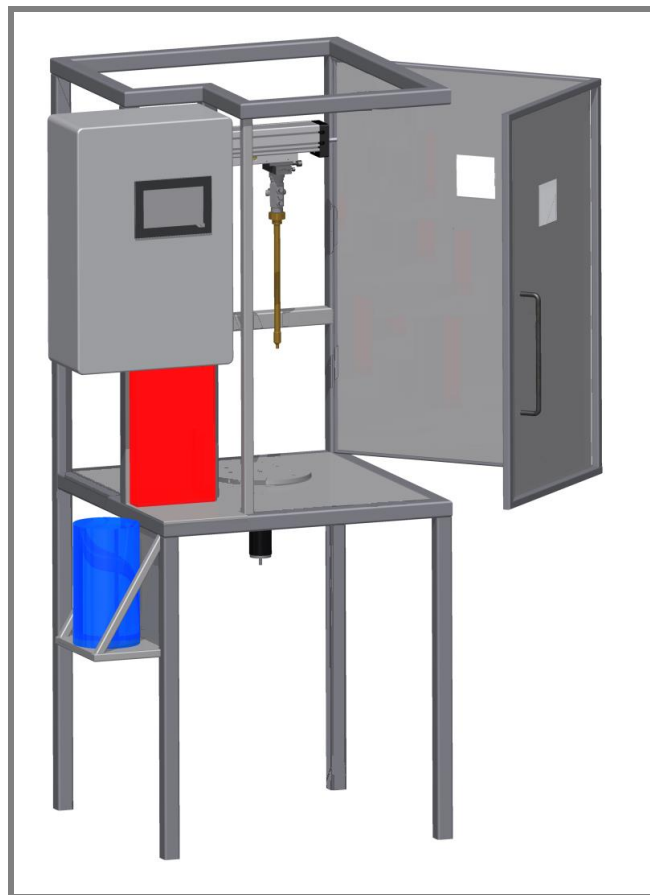
a minimalizovaly rozměry. Pod rozvaděčem je místo pro regulační prvky pneumatického obvodu. Návrh 2. konstrukční varianty se základními rozměry je na obrázku 4-15.



Obr. 4-15 Konstrukční varianta 2.

Zhodnocení

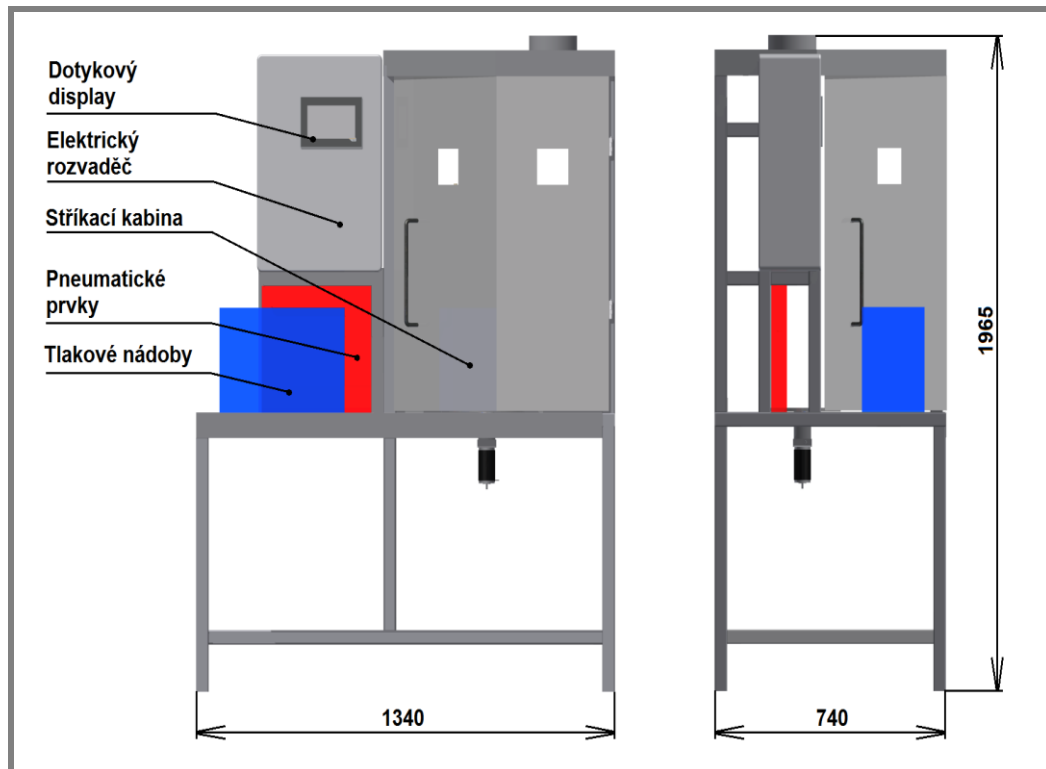
Výhodou tohoto návrhu je lepší přístupnost stříkací kabiny a větší manipulační prostor pro obsluhu. Upínání ložisek může být prováděno z boční strany a obsluha tak není výrazně omezena lineárním vedením, stříkací pistolí ani krytováním. Zároveň se zvětšil prostor pro přístup k zásobníku a čerpadlu, zapuštěním této části pod úroveň pracovního stolu. Obsluha tak může pohodlně manipulovat se zásobníkem případně provádět výměnu polymerní směsi přímo u zařízení. 3D pohled se znázorněným otevíráním dveří je na obrázku 4-16.



Obr. 4-16 3D pohled na variantu 2.

4.3.3 Konstrukční varianta 3

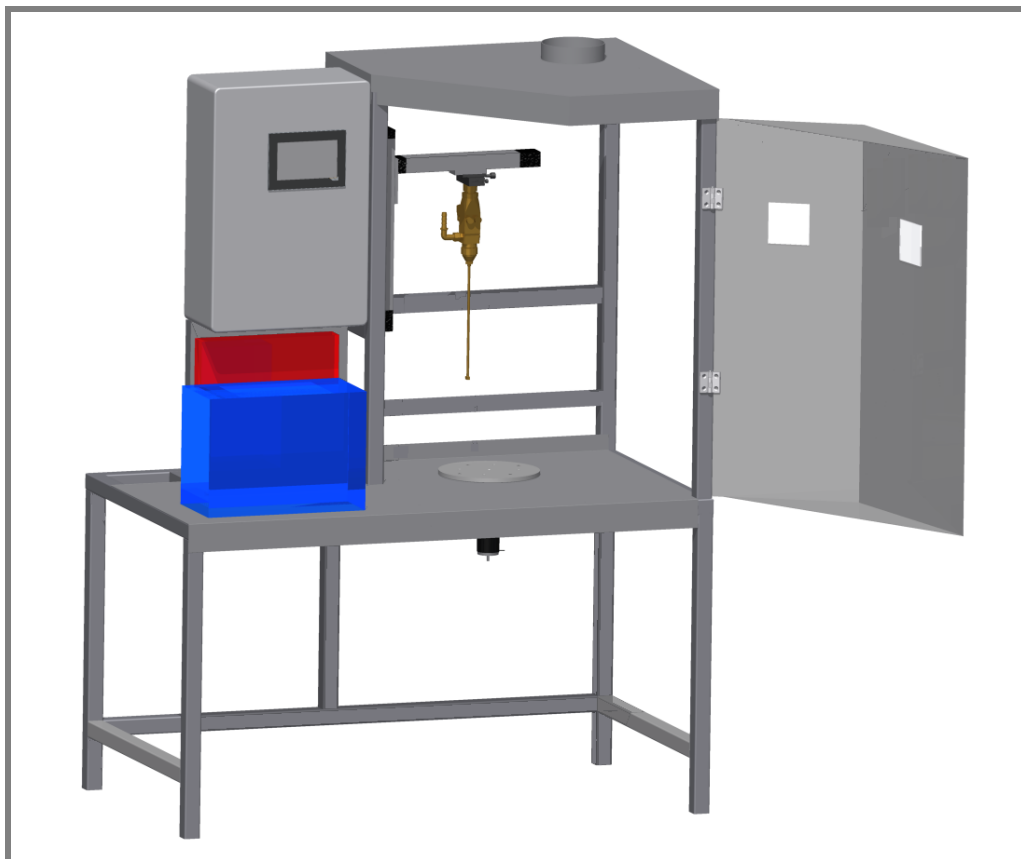
Třetí varianta má od předchozích dvou výrazně odlišné koncepční uspořádání. Zařízení je konstrukčně rozděleno na 2 hlavní části. Toto rozdělení je provedeno z důvodu použití jako zdroj polymeru tlakové nádoby. S tím souvisí nutnost zvětšení manipulačního prostoru, neboť výměna polymeru pro nástřik bude probíhat přímo u zařízení a při této výměně je nutné odmontovat a odložit víko tlakové nádoby. Pro zjednodušení ovládání zařízení byly všechny prvky pneumatického obvodu přesunuty k tlakovým nádobám a v levé části se nachází také rozvaděč s dotykovým displejem. Pravá část zařízení je pak vyhrazena pro stříkací kabinu, nad kterou je umístěna digestoň pro odsávání vzduchu z pracovního prostoru. Přístup do kabiny je pouze z přední strany, ale dveře jsou zkoseny, čímž je vytvořen plynulý přechod k ovládací části a zvětšen pracovní stůl. Návrh 3. konstrukční varianty se základními rozměry je na obrázku 4-17.



Obr. 4-17 Konstrukční varianta 3.

Zhodnocení

Výhodou návrhu je, že zařízení je vizuálně rozděleno na 2 části. Vpravo je stříkací kabina, ve které probíhá nástřik, a vlevo jsou umístěny všechny ovládací prvky. Obsluha tak může zařízení pohodlně ovládat a přitom kontrolovat průběh nástřiku přes průhledy ve dveřích. Stříkací kabina je dostatečně velká pro manipulaci s ložisky při upínání a na pracovním stole je vyhrazeno místo pro umístění tlakových nádob. Prodloužením pracovního stolu se také zvýšila stabilita zařízení. Tento koncepční návrh splňuje požadavky na ergonomii a dostupnost všech ovládacích prvků pro obsluhu. Proto bude finální řešení vycházet z této varianty a měnit se budou jen přípojovací rozměry v závislosti na použitých komponentách, případně další detaily konstrukce. Základní koncept a rozmístění však zůstane zachováno. 3D pohled s vizualizací otevřených dveří je na obrázku 4-18.



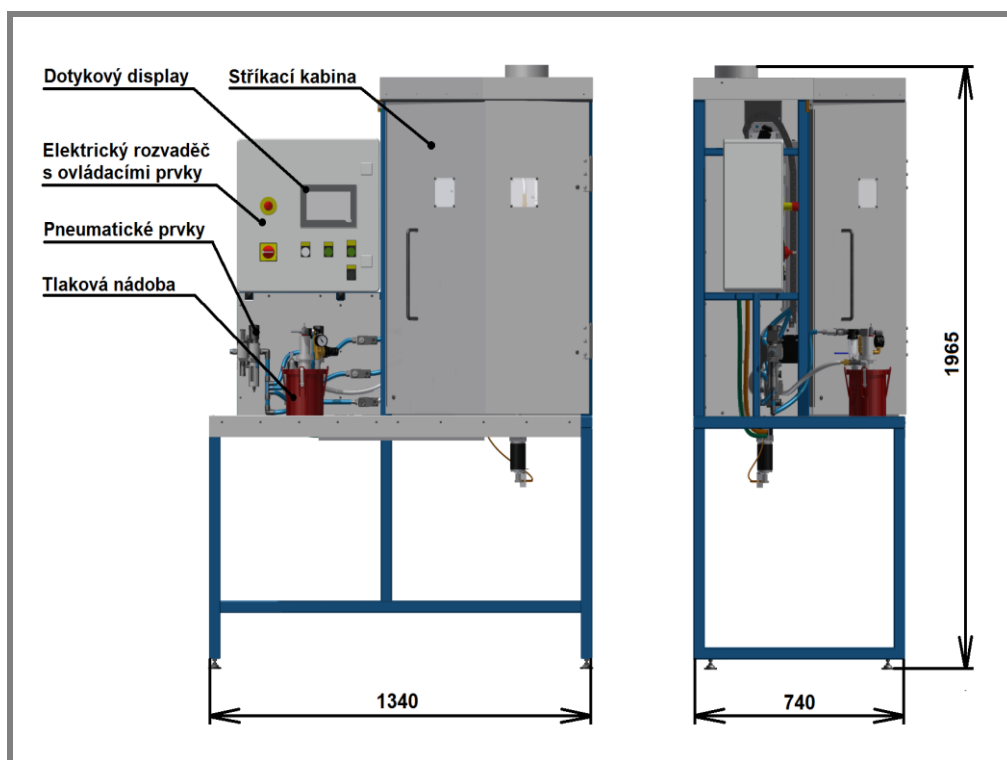
Obr. 4-18 3D pohled na variantu 3.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Konstrukční řešení koncepčně vychází ze 3. konstrukčního návrhu. Do rámu zařízení je však navíc přidána přepážka pro oddělení elektrických částí od pracovního prostoru stříkací kabiny a změněna poloha uchycení lineárního vedení.

5.1 Výsledné konstrukční řešení

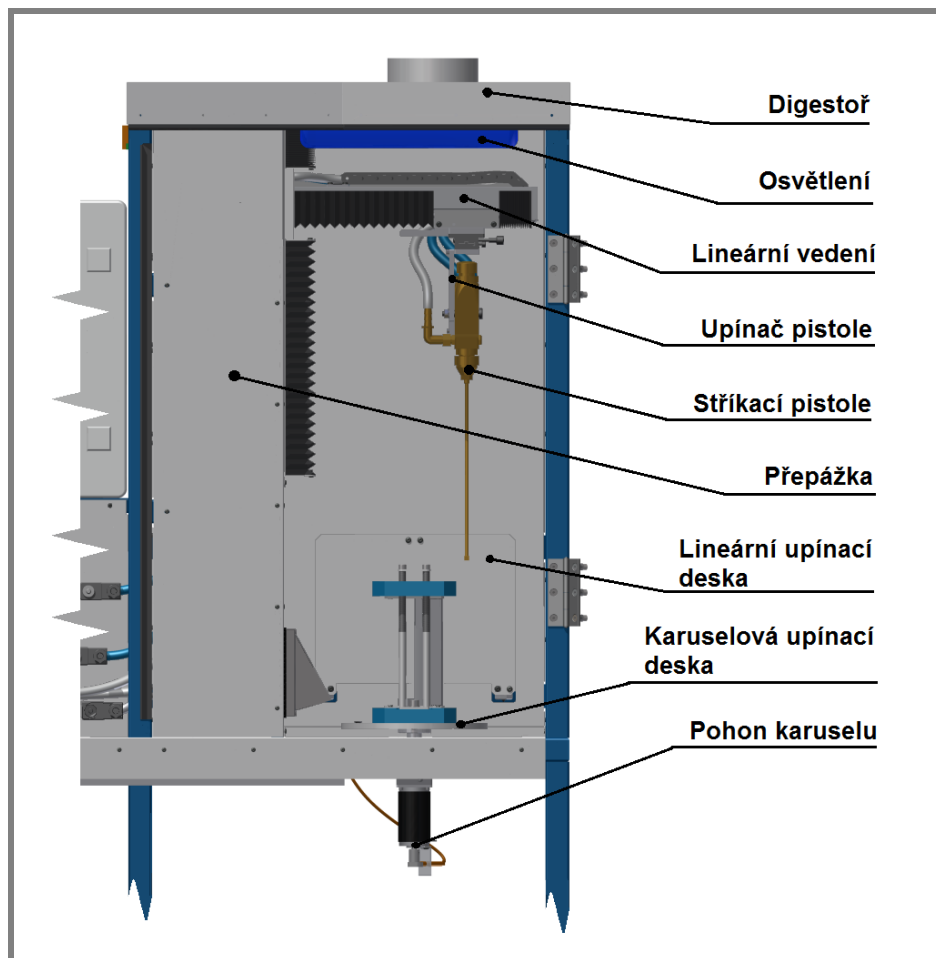
V pravé části se nachází stříkací kabina, která je ze všech stran krytovaná a přístupná pouze přes dveře. Levá část zařízení je určena k manipulaci se zásobními nádobami a jsou zde umístěny hlavní vypínač přívodu tlakového vzduchu, regulátory, kterými se nastavuje tlak atomizačního a ovládacího vzduchu pro stříkací pistoli a elektromagnetické ventily. Nad pneumatickými prvky je umístěn elektrický rozvaděč s dotykovým displejem, hlavním vypínačem, tlačítkem spouštění nástřiku a čištění a také kontrolky provozních stavů. Výsledný návrh konstrukce včetně základních rozměrů a popisu hlavních částí je na obrázku 5-1.



Obr. 5-1 Výsledné konstrukční řešení s rozměry a popisem hlavních částí.

Uvnitř stříkací kabiny je v levé části přepážka oddělující elektrické součásti od pracovního prostoru. Za přepážkou je umístěn lineární modul vertikálního posuvu spolu se servomotory. Modul pro horizontální pohyb je umístěn v pracovním prostoru, aby stříkací pistole dosáhla do všech požadovaných poloh. Na pohyblivém vozíku horizontálního modulu je umístěn ruční polohovací stolek a dále upínací stříkací pistole. Ve spodní části stříkací kabiny je karuselová upínací deska pro upnutí kruhových ložisek. Deska během nástřikového procesu rotuje a její pohon se nachází pod pracovním stolem, aby nedošlo k jeho zanesení nastříkovanou směsí a poškození. Na zadní stěně zařízení se nachází vyjímatelná deska pro upínání lineárních ložisek a laboratorních vzorků. Tuto desku lze v případě potřeby zaměnit

za zkušební ostříkový terč. V horní části je digestoř pro odsávání vzduchu do centrálního vzduchového systému. Připojení na rozvod je provedeno přes přechodovou přírubu. Součástí digestoře je světlo pro osvětlení celého pracovního prostoru stříkací kabiny. Pohled do stříkací kabiny s popisem komponent je uveden na obrázku 5-2.



Obr. 5-2 Pohled do stříkací kabiny s popisem komponent.

3D pohled na celé zařízení s vizualizací otevřených dveří a přístupem do stříkací kabiny je na obrázku 5-3.



Obr. 5-3 3D pohled na výsledné konstrukční řešení nástřikového zařízení.

5.1.1 Rám

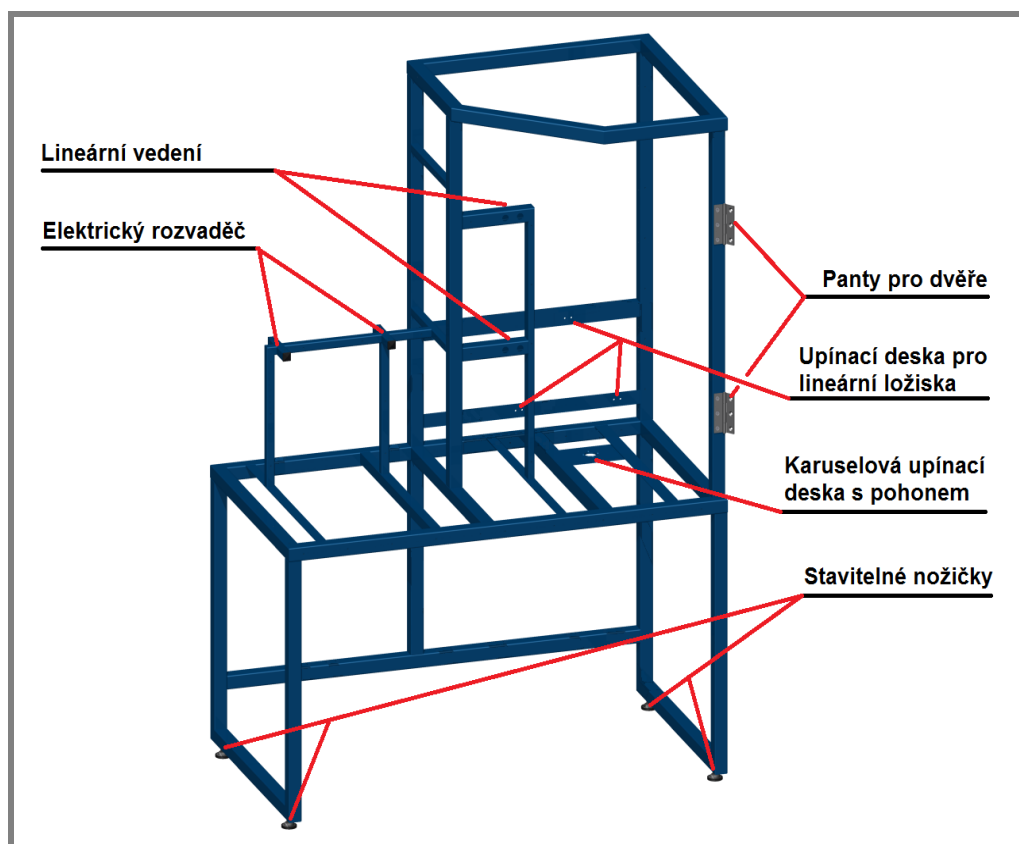
Pro výrobu rámu zařízení je možné použít dva základní typy konstrukce. První volbou je svařovaný rám, který se po svaření lakuje, zejména jako ochrana proti korozi. Druhou variantou je použití tažených hliníkových profilů, které se spojují úhelníkovými spojkami nebo speciálními maticemi. Pro zajištění dostatečné pevnosti a tuhosti rámu je svařovaná varianta navržena ze čtvercových profilů 40x40 mm s tloušťkou stěny 2 mm a montovaná varianta také z profilů 40x40 mm. Hlavním kritériem pro výběr typu konstrukce jsou finanční náklady na výrobu. Cena za výrobu jednotlivých variant je uvedena v tabulce 5-1. U montovaného rámu jsou v ceně započítány také náklady na spojovací matice a úhelníkové spojky. Rám byl poptán u více dodavatelů, ale pro zjednodušení jsou v tabulce 5-1 uvedeny pouze nejvýhodnější nabídky.

Tab. 5-1 Finanční náklady na výrobu rámu.

Typ konstrukce	Dodavatel	Cena [Kč]
Svařovaná	B&K Kovovýroba Brno, s.r.o.	17 760
Montovaná	Marek Industrial a. s.	19 500

Jako výsledná varianta výroby rámu je zvolena svařovaná konstrukce. Rám je vyroben ze standardní svařitelné oceli S235JRG2 s povrchovou úpravou práškové barvy, odstín RAL 5017 – „dopravní modrá.“ Dodavatelem je firma B&K kovovýroba Brno, s.r.o.

Přímo na rám je uchycena sestava lineárního vedení pro polohování stříkací pistole, karuselová upínací deska s pohonem a upínací deska pro lineární ložiska. Dále je vytvořena podpurná konstrukce pod elektrický rozvaděč. V přední části jsou přidělané panty pro zavěšení dveří. Stabilita zařízení je zajištěna umístěním 4 výškově stavitelných nožiček ze spodní strany rámu. Ty navíc umožňují zvednutí zařízení až do výšky nutné pro najetí nízkozdvížného vozíku, čímž se výrazně zjednoduší manipulace se zařízením v případě jeho přemísťování. Celá konstrukce rámu s označenými místy pro připevnění jednotlivých komponent je na obrázku 5-4.

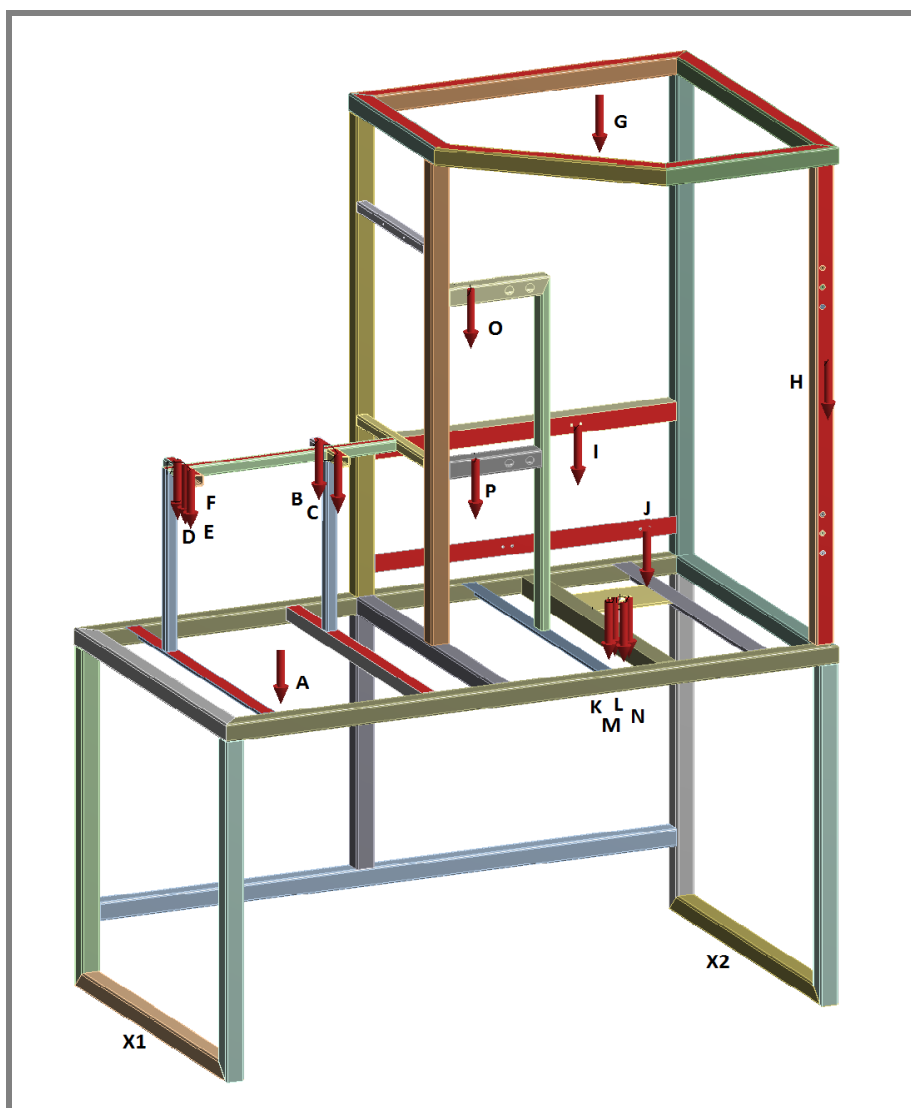


Obr. 5-4 Rám zařízení.

Pro zjištění deformací rámu od přimontovaných prvků byla provedena deformačně-napěťová MKP analýza. Geometrie výpočtového modelu je vytvořena jako skořepinová s přiřazenou tloušťkou stěny. Dále je vytvořena síť s velikostí prvku 20 mm, jsou definovány okrajové podmínky vazeb vetknutí v místech X1, X2 a rám je zatížen silami, které odpovídají hmotnostem jednotlivých komponent. K hmotnosti každé komponenty je v zatížení připočtena rezerva 5 kg (50 N) pro případ použití dalšího příslušenství. V případě, že komponenta dosedá na více ploch rámu, je zatížení rovnoměrně rozděleno mezi tyto plochy. Hmotnosti a z nich vycházející definované zatížení je uvedeno v tabulce 5-2. Okrajové podmínky MKP analýzy jsou uvedeny na obrázku 5-5. Průhyby rámu ve sledovaných místech jsou uvedeny v tabulce 5-3 a zobrazeny na obrázku 5-6.

Tab. 5-2 Hmotnosti komponent a definované zatížení pro MKP analýzu rámu.

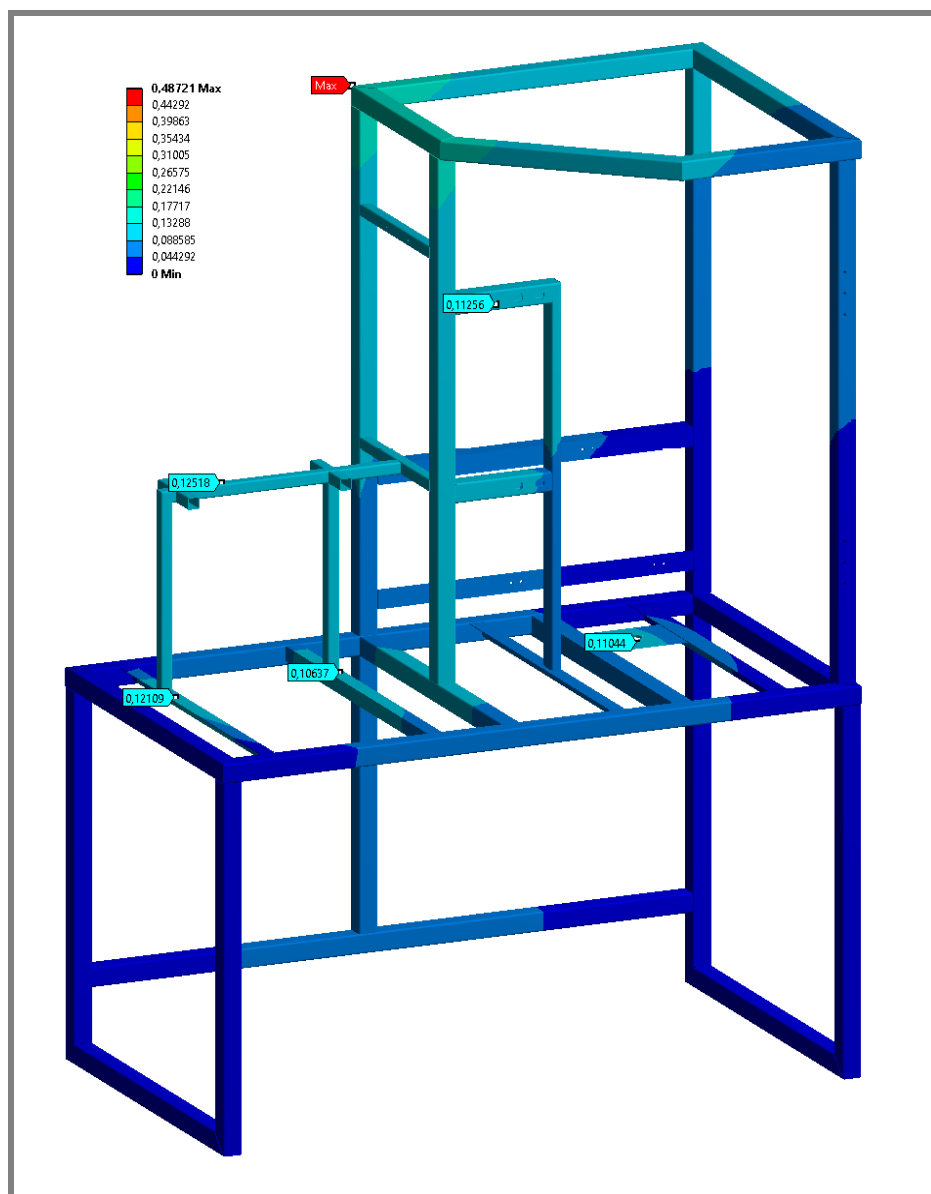
Komponenta	Hmotnost [kg]	Zatížení [N]	Označení sil
Tlakové nádoby	6	110	A
Elektrický rozvaděč	25	300	B,C,D,E,F
Digestoř	4	90	G
Dveře	9	140	H
Lineární upínací deska	3,5	85	I,J
Karuselová upínací deska	13	180	K,L,M,N
Lineární vedení	22	270	O,P



Obr. 5-5 Okrajové podmínky deformačně-napěťové MKP analýzy rámu.

Tab. 5-3 Výsledky deformačně-napěťové MKP analýzy rámu.

Komponenta (místo)	Deformace [mm]
Tlakové nádoby	0,2
Elektrický rozvaděč	0,3
Digestoř	0,2
Dveře	0,1
Lineární upínací deska	0,1
Karuselová upínací deska	0,2
Lineární vedení	0,2



Obr. 5-6 Deformace rámu způsobené připojenými prvky.

Z výsledků MKP analýzy je patrné, že na sledovaných místech jsou deformace rámu maximálně v řádech desetin mm. Maximum deformace je 0,5 mm v horní části rámu. Pro zajištění přesnosti nástřiku je nejdůležitější, že průhyby pod karuselovou deskou a lineárním vedením jsou jen minimální, a nemůže tak být ovlivněna přesnost nástřiku v důsledku nadměrných deformací. Rám je tedy v navržené konfiguraci dostatečně tuhý, vyhovuje stanoveným požadavkům a může být použit pro konstrukci nástřikového zařízení.

5.1.2 Nástřikový okruh

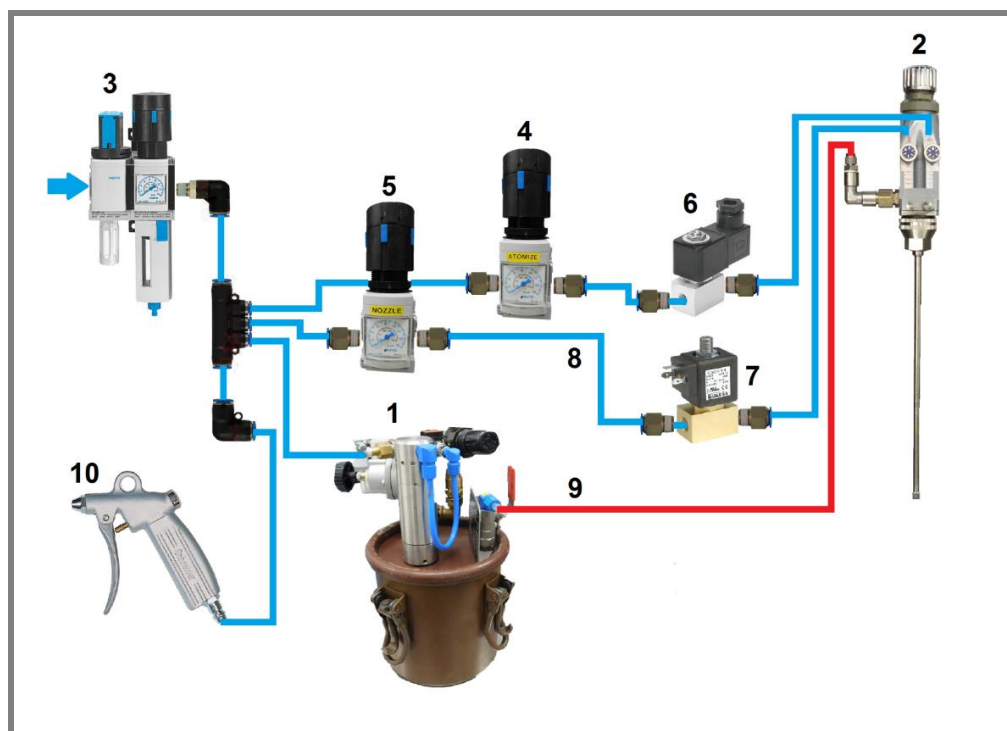
Nástřikový okruh je navržen na základě zadaných vstupních parametrů. Základním údajem pro výběr všech prvků je viskozita nástřikované směsi polymeru s rozpouštědlem. Všechny prvky nástřikového okruhu, které jsou v kontaktu s touto směsí, jsou navrženy z nerezové oceli nebo v případě těsnění a hadic z teflonu. Tyto materiály jsou použity z důvodu odolnosti vůči leptavým účinkům rozpouštědla. Jako zdroj polymeru je zvolena tlaková nádoba, která zajišťuje dodávku dostatečného množství materiálu pro nástřik a navíc bez tlakových oscilací. Odchylky a nestálý tlak v nástřikovém systému mohou způsobit nerovnoměrnost nástřikované vrstvy, čemuž je použitím tlakové nádoby zamezeno. Tlaková nádoba je opatřena míchadlem, které zajišťuje dokonalé promísení polymeru s rozpouštědlem před nástřikem. Míchadlo zároveň zabraňuje zaschnutí směsi před zahájením nástřiku nebo při jeho přerušení v případech, kdy budou nástřikovány větší počty ložisek ve více sériích s časovými rozestupy. Dodavatelem tlakové nádoby a stříkací pistole je firma Krautzberger GmbH, která se specializuje na výrobu komponent pro stříkací zařízení. V průběhu výběru komponent proběhlo testování různých druhů stříkacích pistolí přímo u výrobce a byla také vyzkoušena funkčnost navrženého systému pro danou aplikaci. Stříkací pistole je osazena prodloužením pro nástřik na vnitřní válcové plochy s možností nástřiku pod úhlem až 90°. Tvar nástřikované stopy tzv. pattern lze měnit tlakem atomizačního vzduchu, dvěma regulátory přímo na pistoli a také nastavením trysky v koncové části prodloužení.

Součástí nástřikového okruhu jsou i pneumatické prvky. Ty zajišťují regulaci tlaku vzduchu a také automatizaci celého nástřikového procesu. Vstupem do pneumatického obvodu je tlakový vzduch z centrálního rozvodu o tlaku max. 7 barů. Pro zajištění požadované čistoty vzduchu je první komponentou v obvodu kombinovaná jednotka, která se skládá z hlavního vypínače přívodu vzduchu, odlučovače vlhkosti, filtru a vstupního regulátoru. Následují 2 ruční regulátory pro nastavení tlaku atomizačního vzduchu v pistoli a pro ovládání jehly, která otevírá/uzavírá přívod materiálu do trysky. Tlak a množství polymeru, dodávaného z tlakové nádoby je možné nastavit samostatnými regulátory, kterými je nádoba osazena. Po regulátorech jsou v obvodu umístěny 2 elektromagnetické ventily, které zajišťují automatizaci nástřiku. Jsou zvoleny ventily v normálním stavu bez napětí uzavřené a pouze v případě nástřiku dojde k otevření požadované cesty na nezbytně nutnou dobu. Tím je zajištěna bezpečnost a zamezeno možnosti neočekávaného spuštění nástřiku. Spínání elektromagnetických ventilů probíhá automaticky řídicím programem podle požadovaných cyklů. Dodavatelem pneumatických prvků je firma Festo, s.r.o. a to z důvodu, že nabízí kompletní portfolio výrobků, včetně odolné varianty z nerezové oceli a s teflonovým těsněním. Pro čištění zařízení je v pneumatickém okruhu zařazena také ruční ofukovací pistole.

Všechny zvolené prvky nástřikového a pneumatického obvodu jsou uvedeny v tabulce 5-4. Celý nástřikový okruh s popisem jednotlivých komponent je zobrazen na obrázku 5-7. Pro lepší názornost je v obrázku značeno vedení tlakového vzduchu modře a přívod polymerní směsi červeně. Plné schéma zapojení pneumatického obvodu je v příloze 3.

Tab. 5-4 Zvolené prvky nástřikového a pneumatického okruhu.

Prvek okruhu	Pozice	Označení
Tlaková nádoba na polymer	1	2l - 2,5 bar, PTFE
Stříkací pistole s prodloužením	2	Typ A11
Vstupní kombinovaná jednotka	3	MSB4-1/4-C4-J1-WP
Ruční regulátor atomizace	4	MS4-LR-1/4-D7-AS
Ruční regulátor jehly	5	MS4-LR-1/4-D7-AS
Elektromagnetický ventil	6	VZWD-L-M22C-M-G14-20-V-1-P14-15
Elektromagnetický ventil s odfukem	7	DN2/3-24VDC-TM35-D384
Přívodní hadice – vzduch	8	PUN-8X1-BL, PUN-6X1-BL
Přívodní hadice – polymerní směs	9	PFAN-8X1-NT
Ruční ofukovací pistole	10	LA-01



Obr. 5-7 Nástřikový okruh s popisem jednotlivých komponent.

5.1.3 Lineární vedení a pojezdy

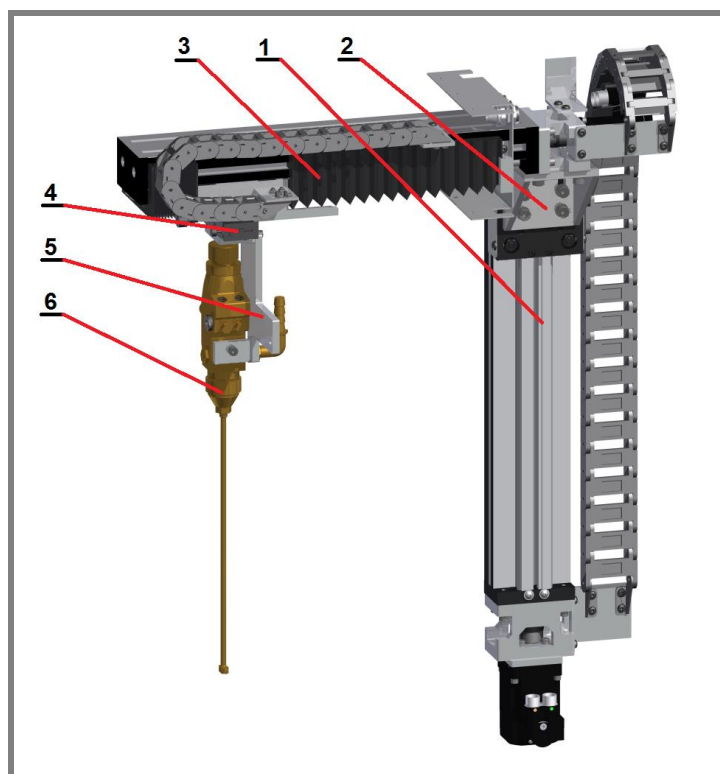
Pohyb stříkací pistole zajišťuje soustava trojosého lineárního vedení. Systém je složen ze dvou krytovaných lineárních modulů se šroubem s lichoběžníkovým závitem od firmy T. E. A. Technik, s.r.o. a jednoho ručně polohovatelného stolku. Lineární moduly jsou použity pro posuv horizontální a vertikální osy a jejich pohon

jsou použity servomotory. Pohybový šroub lineárních modulů je umístěn uvnitř modulu a tím je chráněn před znečištěním. Rozsahy pohybů jsou 300 mm pro vertikální a 250 mm pro horizontální posuv. Ruční přísuv je možné nastavit v rozsahu ± 35 mm od středové polohy stolku. Spojení vertikálního a horizontálního modulu je provedeno přírubou. Ruční polohovací stolek je přes desku přimontován přímo do pohyblivého vozíku horizontálního modulu.

Moduly mají krytíván pouze pohybový šroub, ale stále může docházet k zanášení vodících rolen, které nejsou z výroby nijak ochráněny. Na horizontální modul, který je přímo ve stříkací kabině, jsou proto namontovány krycí měchy. Tyto měchy se používají například pro krytívání posuvů obráběcích strojů. Základní popis sestavy trojosého lineárního vedení je v tabulce 5-5 a na obrázku 5-8.

Tab. 5-5 Komponenty polohovacího systému.

Komponenta	Pozice
Vertikální posuvový modul	1
Příruba pro spojení lineárních modulů	2
Horizontální posuvový modul	3
Polohovací stolek pro stříkací pistoli	4
Upínač stříkací pistole	5
Stříkací pistole s prodloužením	6



Obr. 5-8 Sestava lineárního vedení s popisem hlavních částí.

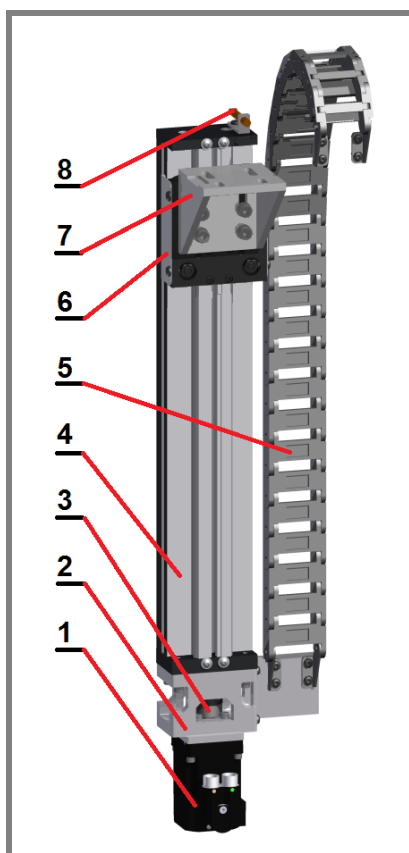
Vertikální posuv

Vertikálním posuvem je stříkací pistole polohována směrem nahoru a dolů. Je zvolen modul NL206 TR-550. Celý posuv je složen z lineárního modulu, přípojovací příruby a servomotoru. Pohybový šroub je se servomotorem spojen přes pružnou

spojku. Na horní přírubě se nachází indukční snímač, který kontroluje dosažení koncové polohy pohyblivého vozíku. V případě, že dojde k najetí až na tuto hranici, je řídicím programem zastaven pohyb motoru, a nemůže tak dojít k nárazu do koncové části a tím k poškození modulu nebo pohybového mechanismu. Lineární modul je upevněn přímo na rám stoje pomocí upínacích kamenů. Na pohyblivém vozíku je přidělena příruba pro spojení s horizontálním posuvem. Části vodících rolen pod pohyblivým vozíkem jsou zakryty plechem, aby nemohlo dojít k poranění obsluhy při neopatrné manipulaci v okolí vozíku. Modul je osazen energetickým řetězem, kterým jsou vedeny hadice do stříkací pistole a napájecí kabely k servomotoru horizontálního posuvu. Seznam komponent vertikálního posuvu je uveden v tabulce 5-6. Schéma s popisem jednotlivých částí je na obrázku 5-9.

Tab. 5-6 Komponenty vertikálního posuvu.

Komponenta	Pozice
Servomotor	1
Příruba motoru	2
Pružná spojka	3
Lineární modul	4
Energetický řetěz	5
Plechové kryty vodících rolen	6
Příruba pro spojení modulů	7
Indukční snímač koncové polohy	8



Obr. 5-9 Schéma a popis komponent vertikálního posuvu.

Volba servomotoru pro pohon vertikálního posuvu

Základní údaje:

- Hmotnost horizontálního posuvu se stříkací pistolí: $m_1 = 13\text{kg}$
(se započítanou rezervou 2,5 kg (25 N) pro případ použití příslušenství)
- Maximální rychlost posuvu $v_{\max} = 100\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
- Statický součinitel tření pohybového šroubu: $\mu = 0,3$
- Pohybový šroub: rovnoramenný TR 16x4
- Moment setrvačnosti pohybového šroubu: $I_{s1} = 2,2 \cdot 10^{-5}\text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Čas pro dosažení maximální posuvové rychlosti (rampa): $t_M = 0,1\text{s}$

Výpočet otáček servomotoru:

$$n_M = \frac{60 \cdot v_{\max}}{s} = \frac{60 \cdot 100\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}}{4\text{mm}} = 1500\text{ min}^{-1} \quad (5.1)$$

kde: n_M [min⁻¹] - otáčky servomotoru,
 v_{\max} [mm · s⁻¹] - maximální rychlost posuvu,
 s [mm] - stoupání pohybového šroubu.

Výpočet kroutícího momentu od zátěže:

$$T_{L1} = \frac{m_1 \cdot g \cdot s}{2\pi\eta_s} + \frac{\mu \cdot F_p \cdot s}{2\pi} = \frac{13\text{kg} \cdot 9,81\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,004\text{m}}{2\pi \cdot 0,4} +$$

$$0,3 \cdot \frac{1}{3} \cdot 13\text{kg} \cdot 9,81\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,004\text{m}$$

$$+ \frac{\phantom{0,3 \cdot \frac{1}{3} \cdot 13\text{kg} \cdot 9,81\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,004\text{m}}}{2\pi} = 0,22\text{Nm} \quad (5.2)$$

kde: T_{L1} [N · m] - kroutící moment od zátěže,
 m_1 [kg] - hmotnost zátěže vertikálního modulu,
 g [m · s⁻²] - gravitační zrychlení,
 η_s [-] - účinnost pohybového šroubu,
 μ [-] - statický součinitel tření pohybového šroubu,
 F_p [N] - předpětí pohybového šroubu.

Výpočet momentu setrvačnosti od zátěže:

$$I_{z1} = m_1 \cdot \left(\frac{s}{2\pi}\right)^2 = 13\text{kg} \cdot \left(\frac{0,004\text{m}}{2\pi}\right)^2 = 5,3 \cdot 10^{-6}\text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5.3)$$

kde: I_{z1} [kg · m²] - moment setrvačnosti zátěže.

Výpočet kroutícího momentu od zátěže setrvačnými momenty:

$$T_{A1} = \frac{(I_{s1} + I_{z1}) \cdot n_M}{9,55 \cdot t_M} = \frac{(2,2 \cdot 10^{-5} + 5,3 \cdot 10^{-6})\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 1500\text{min}^{-1}}{9,55 \cdot 0,1\text{s}} = 0,043\text{Nm} \quad (5.4)$$

kde: T_{A1} [N·m] - kroutící moment od zátěže setrvačnými momenty,
 I_{S1} [kg·m²] - moment setrvačnosti pohybového šroubu,
 n_M [min⁻¹] - otáčky servomotoru,
 t_M [s] - čas pro dosažení maximální posuvové rychlosti.

Výpočet kroutícího momentu servomotoru:

$$T_{MV} = k_1 \cdot (T_{L1} + T_{A1}) = 1,5 \cdot (0,22Nm + 0,043Nm) = 0,4Nm \quad (5.5)$$

kde: T_{MV} [N·m] - kroutící moment servomotoru vertikálního modulu,
 k_1 [-] - návrhový součinitel,
 T_{L1} [N·m] - kroutící moment od zátěže,
 T_{A1} [N·m] - kroutící moment od zátěže setrvačnými momenty.

Kroutící moment vypočítaný v rovnici 5.5 je pouze předběžný. Součinitel tření a účinnost pohybového mechanismu se může v reálné aplikaci velmi lišit. Na základě předběžného výpočtu je vhodné provést upřesňující simulace, které do výpočtu navíc zahrnují délky pojezdů, rychlosti polohování a detailněji uvažují vliv setrvačných hmot. Tyto simulace byly při návrhu provedeny ve spolupráci s firmou B&R Automation, která je dodavatelem servomotorů.

Na základě výpočtů z rovnic 5.1 až 5.5 a provedených simulací je pro pohon vertikálního posuvu zvolen servomotor **8LVA22**, jehož základní charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 5-7. Pro spojení servomotoru a pohybového šroubu je zvolena pružná spojka **Misumi MCOCRK30-8-14-KRH2**.

Tab. 5-7 Parametry zvoleného servomotoru pro vertikální posuv.

Servomotor 8LVA22	
Nominální výkon	204 W
Nominální kroutící moment	0,65 N·m
Maximální kroutící moment	2 N·m
Maximální otáčky	3 000 min ⁻¹
Napětí	400 V
Proud	2,9 A

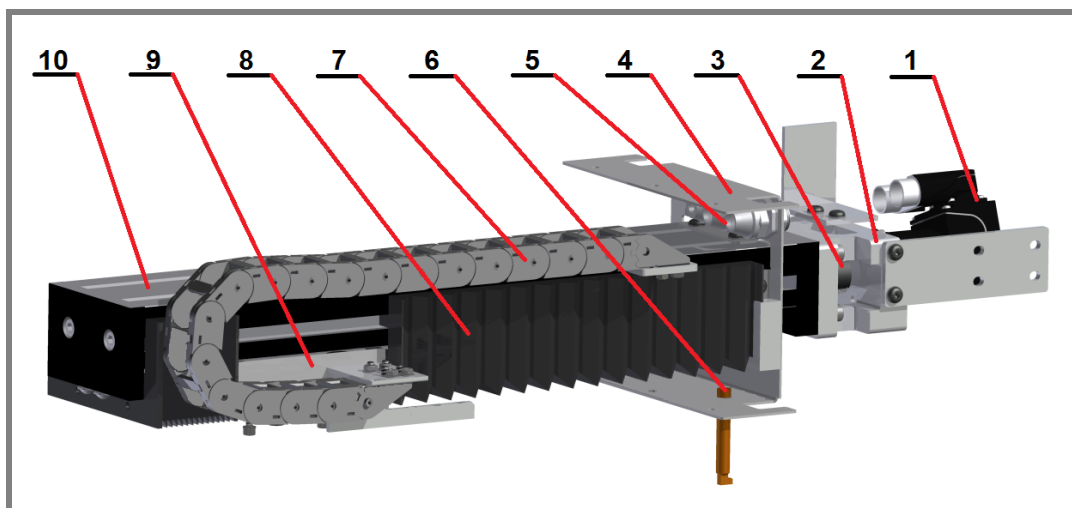
Horizontální posuv

Horizontální směr posuvu je z pohledu obsluhy vlevo a vpravo. Pro posuv je zvolen lineární modul NL106 TR-440. Pohon modulu zajišťuje servomotor, který je k modulu připojen přírubou. Spojení mezi servomotorem a pohybovým šroubem je provedeno pomocí pružné spojky. Vodicí rolny jsou zakryty měchy, aby nedocházelo k jejich znečištění a zanášení nastříkovanou směsí polymeru. Z boční strany jsou rolny zakryty plechy z důvodu zajištění bezpečnosti obsluhy a zamezení zásahu do pohybového mechanismu. Koncová poloha je kontrolována indukčním snímačem. V případě, že by došlo k jejímu dosažení, je softwarovým zásahem vypnut motor a pohyb zastaven, stejně jako v případě vertikálního posuvu. Pro umístění přívodních hadic stříkací pistole je použit energetický řetěz. Na horizontálním modulu je dále umístěna přechodová deska, ke které jsou připojeny

krycí měchy od velké přepážky oddělující pracovní prostor od elektrických součástí. Pro průchod hadic stříkací pistole do stříkací kabiny jsou použity kabelové průchodky. Popis součástí horizontálního posuvu je uveden v tabulce 5-8 a na obrázku 5-10.

Tab. 5-8 Komponenty horizontálního posuvu.

Komponenta	Pozice
Servomotor	1
Příruba motoru	2
Pružná spojka	3
Pohyblivá deska přepážky	4
Kabelové průchodky pro hadice	5
Indukční snímač koncové polohy	6
Energetický řetěz	7
Krycí měchy	8
Plechové kryty vodících roln	9
Lineární modul	10



Obr. 5-10 Schéma a popis komponent horizontálního posuvu.

Volba servomotoru pro pohon horizontálního posuvu

Základní údaje:

- Hmotnost ručního polohovacího stolku se stříkacími pistolemi: $m_2 = 2,5 \text{ kg}$ (se započítanou rezervou 0,8 kg (8 N) pro případ použití příslušenství)
- Maximální rychlost posuvu $v_{\max} = 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
- Statický součinitel tření pohybového šroubu: $\mu = 0,3$
- Pohybový šroub: rovnoramenný TR 16x4
- Moment setrvačnosti pohybového šroubu: $I_{\xi_2} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Čas pro dosažení maximální posuvové rychlosti (rampa): $t_M = 0,1 \text{ s}$

Výpočet otáček servomotoru:

$$n_M = \frac{60 \cdot v_{\max}}{s} = \frac{60 \cdot 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}}{4 \text{ mm}} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (5.6)$$

kde: n_M [min⁻¹] - otáčky servomotoru,
 v_{\max} [mm · s⁻¹] - maximální rychlost posuvu,
 s [mm] - stoupání pohybového šroubu.

Výpočet kroutícího momentu od zátěže:

$$T_{L2} = \frac{m_2 \cdot g \cdot s}{2\pi\eta_\xi} + \frac{\mu \cdot F_P \cdot s}{2\pi} = \frac{2,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,004 \text{ m}}{2\pi \cdot 0,4} +$$

$$+ \frac{0,3 \cdot \frac{1}{3} \cdot 2,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,004 \text{ m}}{2\pi} = 0,041 \text{ Nm} \quad (5.7)$$

kde: T_{L2} [N · m] - kroutící moment od zátěže,
 m_2 [kg] - hmotnost zátěže horizontálního modulu,
 g [m · s⁻²] - gravitační zrychlení,
 η_ξ [-] - účinnost pohybového šroubu,
 μ [-] - statický součinitel tření pohybového šroubu,
 F_P [N] - předpětí pohybového šroubu.

Výpočet momentu setrvačnosti od zátěže:

$$I_{Z2} = m_2 \cdot \left(\frac{s}{2\pi} \right)^2 = 2,5 \text{ kg} \cdot \left(\frac{0,004 \text{ m}}{2\pi} \right)^2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5.8)$$

kde: I_{Z2} [kg · m²] - moment setrvačnosti zátěže.

Výpočet kroutícího momentu od zátěže setrvačnými momenty:

$$T_{A2} = \frac{(I_{S2} + I_{Z2}) \cdot n_M}{9,55 \cdot t_M} = \frac{(2 \cdot 10^{-5} + 1 \cdot 10^{-6}) \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 1500 \text{ min}^{-1}}{9,55 \cdot 0,1 \text{ s}} = 0,033 \text{ Nm} \quad (5.9)$$

kde: T_{A2} [N · m] - kroutící moment od zátěže setrvačnými momenty,
 I_{S2} [kg · m²] - moment setrvačnosti pohybového šroubu,
 n_M [min⁻¹] - otáčky servomotoru,
 t_M [s] - čas pro dosažení maximální posuvové rychlosti.

Výpočet kroutícího momentu servomotoru:

$$T_{MH} = k_2 \cdot (T_{L2} + T_{A2}) = 1,5 \cdot (0,041 \text{ Nm} + 0,033 \text{ Nm}) = 0,11 \text{ Nm} \quad (5.10)$$

kde: T_{MH} [N · m] - kroutící moment servomotoru horizontálního modulu,
 k_2 [-] - návrhový součinitel,

- T_{L2} [N·m] - kroutící moment od zátěže,
 T_{A2} [N·m] - kroutící moment od zátěže setrvačnými momenty.

Kroutící moment vypočítaný v rovnici 5.10 je pouze předběžný. Stejně jako v případě vertikálního posuvu je vypočítaná hodnota použita pro simulaci a přesnější výpočet. Na základě výpočtů z rovnic 5.6 až 5.10 a provedených simulací je pro pohon horizontálního posuvu zvolen servomotor **8LVA13**, jehož základní charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 5-9. Pro spojení servomotoru a pohybového šroubu je zvolena pružná spojka **Misumi MCOCRK20-7-8-KRH2**.

Tab. 5-9 Parametry zvoleného servomotoru pro horizontální posuv.

Servomotor 8LVA13	
Nominální výkon	101 W
Nominální kroutící moment	0,32 N·m
Maximální kroutící moment	1 N·m
Otáčky	3 000 min ⁻¹
Napětí	400 V
Proud	1,6 A

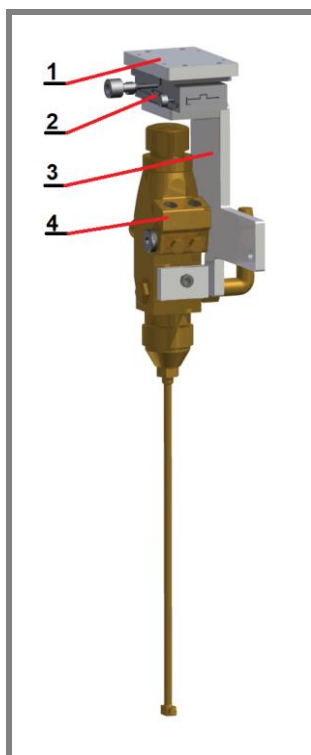
Přísuv a upínání stříkací pistole

Pohyb ve směru 3. osy je z pohledu obsluhy vpřed a vzad. Tímto pohybem se nastavuje vzdálenost stříkací pistole od ložisek, ze které se provádí nástřík. Pohyb je zajištěn polohovacím stolkem Misumi XDTS90 s ručním nastavením polohy. Tento typ je zvolen z důvodu rozsahu pohybu, který je ± 35 mm od středové polohy, a možností aretace nastavené polohy, čímž je zajištěna stejná vzdálenost pistole od ložisek po celou dobu nástříku. Další výhodou je, že se pohybový mechanismus nachází uvnitř stolku, a je tak chráněn před znečištěním.

Polohovací stolek je k horizontálnímu posuvu připojen přes přechodovou desku. Deska je použita z důvodu kolize mezi upínacími děrami stolku a děrami, které jsou v pohyblivém vozíku lineárního modulu již z výroby. Na polohovací stolek je upevněn upínač, do kterého je přichycena stříkací pistole. Upínač je navržen jako dvoupolohový, a to z důvodu, že pro vytvoření kvalitního kluzného laku je nutné provádět nástřík ze vzdálenosti max. 25 mm od povrchu ložisek. Pro nástřík na kruhová ložiska je pistole v základní poloze umístěna na střed karuselové upínací desky. Pohybem stolku je poté možné nastavit požadovanou vzdálenost nástříku pro celý rozsah upínaných ložisek od průměru 30 do 150 mm. Při nástříku na lineární ložiska nebo laboratorní vzorky se tryska přesune do 2. polohy, čímž se přiblíží k lineární upínací desce. Od této polohy je opět možné stolkem nastavit požadovanou vzdálenost nástříku. Jednotlivé komponenty přísuvu a upínání stříkací pistole s popisy jsou uvedeny v tabulce 5-10 a na obrázku 5-11.

Tab. 5-10 Komponenty ručního přísuvu.

Komponenta	Pozice
Přechodová deska	1
Polohovací stůl	2
Upínač stříkací pistole	3
Stříkací pistole s prodloužením	4



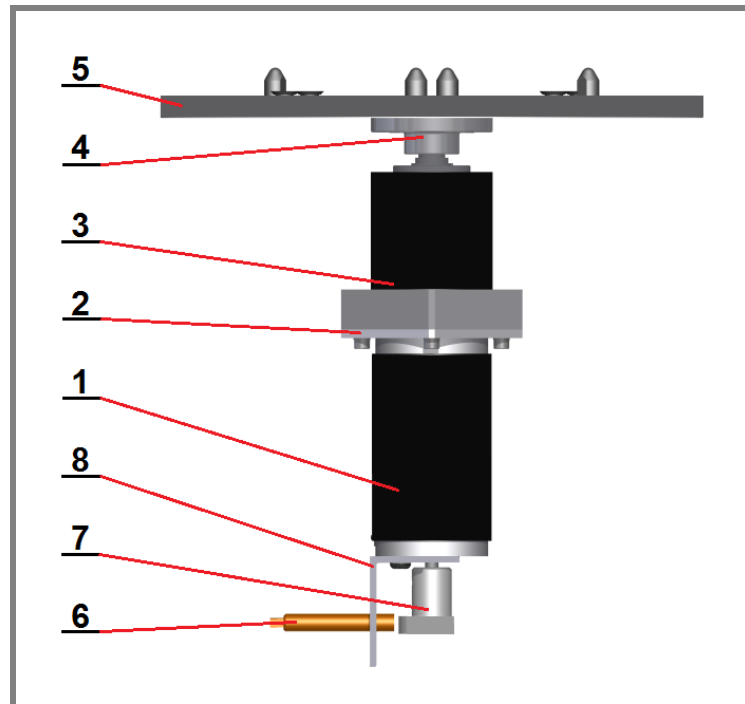
Obr. 5-11 Komponenty ručního přísuvu stříkací pistole.

5.1.4 Karuselová upínací deska

Kruhová ložiska během nástřiku rotují. Tím je zajištěno vytvoření rovnoměrné vrstvy klzného laku. Tuto rotaci zajišťuje karuselová upínací deska s pohonem. Počet otáček karuselové desky je nastavitelný v rozsahu $0\text{--}300\text{ min}^{-1}$ a v kombinaci s pohybem stříkací pistole je tak možné vytvořit klznou vrstvu v rozsahu 5 až 10 μm , která je požadována zadáním diplomové práce. Karuselová deska je poháněna DC motorem s planetovou převodovkou s převodovým poměrem 1:4. Převodovka je přes přírubu spojena s upínací deskou a přenos krouticího momentu je proveden těsným perem. Otáčky karuselové desky obsluha zadává v řídicím programu a počet otáček je možné nastavit zcela nezávisle na ostatních parametrech nástřiku. Dosažení požadovaného počtu otáček kontroluje indukční snímač spolu s palcem umístěným na výstupní hřídeli motoru. Popis jednotlivých částí karuselu s pohonem je v tabulce 5-11 a na obrázku 5-12.

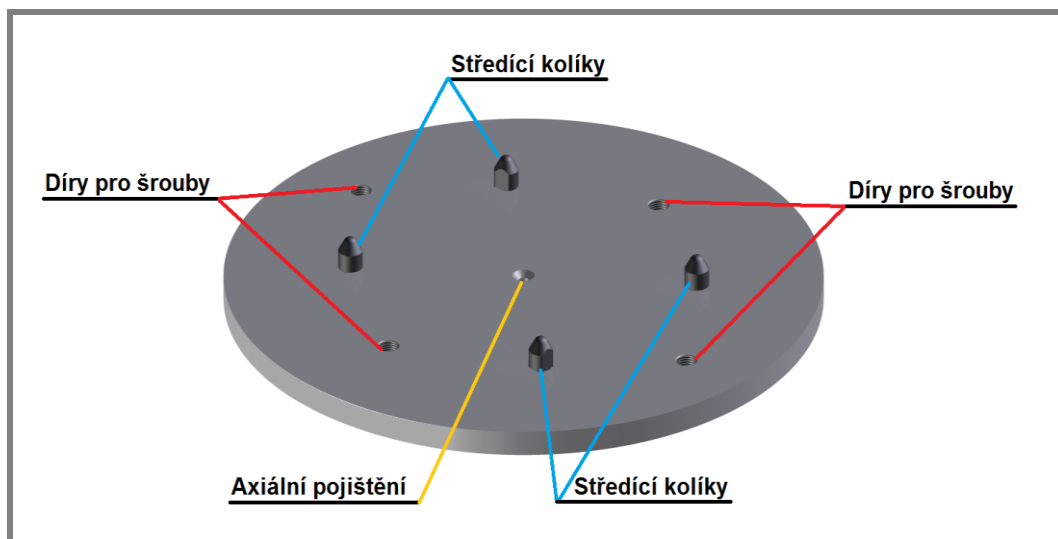
Tab. 5-11 Komponenty karuselové upínací desky a pohonu.

Komponenta	Pozice
DC motor	1
Motorová příruba	2
Planetová převodovka	3
Příruba karuselu	4
Upínací deska	5
Indukční snímač	6
Palec pro počítání otáček	7
Držák snímače	8



Obr. 5-12 Popis hlavních částí karuselové upínací desky a pohonu.

Karuselová deska obsahuje 4 středící kolíky, kterými se ustavuje poloha šablon s ložisky. Středící kolíky kromě přesnosti zajišťují také to, že šablony budou vždy upnuty ve stejné pozici v ose rotace upínací desky. Uchycení šablon k desce je provedeno pomocí šroubů, aby nemohlo dojít k jejich uvolnění během rotace v průběhu nástřiku. V axiálním směru je karuselová deska zajištěna proti posunutí šroubem. Upínací deska s popisem částí je uvedena na obrázku 5-13.



Obr. 5-13 Popis částí karuselové upínací desky.

Volba motoru pro pohon karuselové upínací desky

Základní údaje:

- Moment setrvačnosti upínací desky: $I_1 = 0,0277 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Moment setrvačnosti malé šablony: $I_2 = 0,0068 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Moment setrvačnosti velké šablony: $I_3 = 0,064 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Moment setrvačnosti motoru a převodovky: $I_4 = 0,03 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$
- Požadované otáčky upínací desky: 300 min^{-1}
- Čas pro dosažení otáček (rampa): 5 s

Výpočet celkového momentu setrvačnosti:

$$I_{1C} = I_1 + I_2 + I_4 = 0,0277 + 0,0068 + 3 \cdot 10^{-6} = 0,035 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5.11)$$

$$I_{2C} = I_1 + I_3 + I_4 = 0,0277 + 0,064 + 3 \cdot 10^{-6} = 0,094 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5.12)$$

kde: I_{1C} [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] - moment setrvačnosti desky s malou šablonou,
 I_{2C} [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] - moment setrvačnosti desky s velkou šablonou.

Dále je počítáno pouze s hodnotou I_{2C} , která je vyšší.

Výpočet úhlového zrychlení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \varpi}{\Delta t} = \frac{\varpi_2 - \varpi_1}{t_2 - t_1} = \frac{2\pi \frac{(n_2 - n_1)}{60}}{t_2 - t_1} = \frac{2\pi \frac{(300 \text{ min}^{-1} - 0)}{60}}{5 \text{ s} - 0} = 6,28 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (5.13)$$

kde: ε [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$] - úhlové zrychlení,
 ϖ_1 [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] - počáteční úhlová rychlost,
 ϖ_2 [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] - koncová úhlová rychlost,
 t_1 [s] - počáteční čas,
 t_2 [s] - koncový čas,
 n_1 [min^{-1}] - počáteční otáčky desky,
 n_2 [min^{-1}] - požadované otáčky desky.

Výpočet požadovaného kroutícího momentu:

$$M_3 = I_{2C} \cdot \varepsilon = 0,094 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 6,28 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} = 0,59 \text{ Nm} \quad (5.14)$$

kde: M_3 [$\text{N} \cdot \text{m}$] - požadovaný kroutící moment motoru karuselové desky,
 I_{2C} [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] - moment setrvačnosti s velkou šablonou,
 ε [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$] - úhlové zrychlení.

Výpočet požadovaného výkonu motoru:

$$P_3 = \frac{M_3 \cdot \varpi_2}{\eta_P} = \frac{M_3 \cdot 2\pi \frac{n}{60}}{\eta_P} = \frac{0,59 \text{ Nm} \cdot 2\pi \frac{300 \text{ min}^{-1}}{60}}{0,97} = 19,1 \text{ W} \quad (5.15)$$

kde: P_3 [W] - požadovaný výkon motoru karuselové desky,
 M_3 [N·m] - požadovaný kroutící moment motoru karuselové desky,
 ϖ_2 [rad·s⁻¹] - koncová úhlová rychlost,
 η_P [%] - účinnost převodovky.

Na základě výpočtu je pro pohon karuselové upínací desky zvolen DC motor **Transtecno 035.240 EC** s planetovou převodovkou **Bonfiglioli Tecnoingranaggi LC 050.1.4.STD 12'.40B.CD.6.KE**. Parametry zvolených komponent jsou uvedeny v tabulkách 5-12 a 5-13.

Tab. 5-12 Parametry zvoleného motoru.

DC motor 050.240 EC	
Výkon	55 W
Nominální kroutící moment	0,18 N·m
Otáčky	3 000 min ⁻¹
Napětí	24 V
Proud	4 A

Tab. 5-13 Parametry zvolené převodovky.

Převodovka LC 050.1.4.STD 12'.40B.CD.6.KE	
Převodový poměr	1:4
Max. výstupní kroutící moment	12 N·m
Max. otáčky	5 000 min ⁻¹
Max. radiální zatížení	500 N
Max. axiální zatížení	600 N

Kontrola perového spoje karuselové upínací desky

Základní údaje:

- Materiál pera: ocel 11 600
- Označení použitého pera: PERO 4e7 x 4 x 14
- Materiál příruby: EN AW-6061 (AlMg1SiCu)
- Kroutící moment motoru: 0,18 N·m
- Převodový poměr planetové převodovky: 1:4
- Průměr výstupní hřídele převodovky: 12 mm

Výpočet kroutícího momentu na hřídeli převodovky:

$$i = \frac{M_{K2}}{M_{K1}} \Rightarrow M_{K2} = i \cdot M_{K1} = 4 \cdot 0,18 \text{ Nm} = 0,72 \text{ Nm} \quad (5.16)$$

kde: i [-] - převodový poměr planetové převodovky,
 M_{K1} [N·m] - kroutící moment motoru,
 M_{K2} [N·m] - kroutící moment na výstupním hřídeli převodovky.

Výpočet obvodové síly na hřídeli převodovky:

$$M_{K2} = \frac{F_o}{\frac{d_H}{2}} \Rightarrow F_o = \frac{2M_{K2}}{d_H} = \frac{2 \cdot 0,72 Nm}{12 mm} = 120 N \quad (5.17)$$

kde: F_o [N] - obvodová síla,
 M_{K2} [N·m] - kroutící moment na výstupním hřídeli převodovky,
 d_H [mm] - průměr výstupní hřídele převodovky.

Výpočet tlaku mezi perem a nábojem:

$$p = \frac{F_o}{t_1(l-b)} = \frac{120 N}{1,6 mm \cdot (14 mm - 4 mm)} = 7,5 MPa \quad (5.18)$$

kde: p [MPa] - tlak mezi perem a nábojem,
 F_o [N] - obvodová síla,
 t_1 [mm] - hloubka drážky pera v náboji,
 l [mm] - délka pera,
 b [mm] - šířka pera.

Výpočet dovoleného tlaku:

$$p_D = k_3 \cdot p_0 = 0,8 \cdot 70 MPa = 56 MPa \quad (5.19)$$

kde: p_D [MPa] - dovolený tlak mezi perem a nábojem,
 k_3 [-] - součinitel pro jednosměrné, klidné zatížení [16],
 p_0 [MPa] - základní hodnota tlaku pro materiál EN AW-6061 [16].

Zhodnocení: $p_D > p$ (56 MPa > 7,5 MPa) \Rightarrow **Vyhovuje**

5.1.5 Upínání kruhových ložisek

Pro upínání ložisek bylo nutné navrhnout šablonu, ve které budou ložiska uchycena během přípravných prací, nástřiku a závěrečného vytvrzení kluzného laku v peci. Přípravné práce zahrnují srovnání a upnutí půlkruhových ložisek do šablony, pískování povrchu, na který bude nanesen kluzný lak a následné předehřátí v peci. Po předehřevu se ložiska v šabloně ihned přidělají na karuselovou upínací desku zařízení a probíhá nástřik kluzného laku. Poté se ložiska znovu vkládají do pece, tentokrát pro vytvrzení laku. Předehřev i vytvrzování probíhá při teplotách do 250 °C. Materiál šablony tak musí mít teplotu tavení vyšší než je tato hodnota a navíc musí být odolný vůči účinkům rozpouštědla, protože je v přímém kontaktu s nástřikovanou polymerní směsí. Jako materiál pro výrobu šablony je zvolen teflon, který nejen splňuje požadavky na tepelnou a chemickou odolnost, ale zároveň

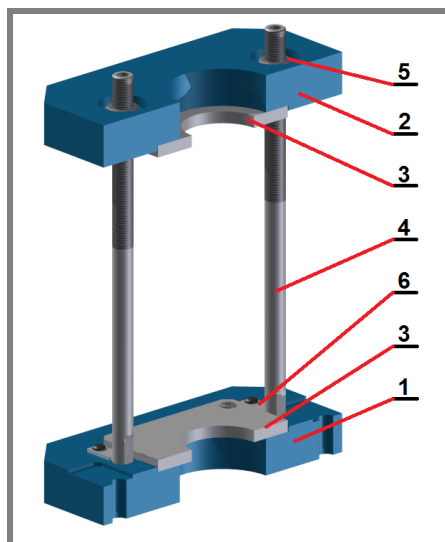
na něm neulpívá nastříkovaný polymer a šablonu je možné po nástřiku jednoduše očistit.

Šablona je rozdělená na 2 části, a to z důvodu půlkruhového tvaru ložisek. Manipulace s ložisky v průběhu všech operací probíhá vždy v celku s polovinou šablony a pouze pro nástřik se šablona skládá dohromady tak, aby vznikl prostor dutého válce, do kterého se spustí stříkací pistole s prodloužením.

Obě poloviny šablony jsou složeny ze dvou kostek, mezi které se upínají ložiska. Spodní kostka, která dosedá na karuselovou upínací desku, navíc obsahuje díry pro středící kolíky a šrouby. Dosedací plochy pro ložiska jsou osazeny nerezovými plechy pro zajištění rovinnosti a přesnosti upínání. Spojení obou kostek je provedeno závitovými tyčemi, které umožňují libovolné nastavení upínacího rozsahu. Závitové tyče jsou zajištěny proti otáčení malými dorazovými destičkami. Stažení šablony a zajištění polohy upínaných ložisek je řešeno maticemi. Popis jednotlivých částí poloviny šablony je v tabulce 5-14 a na obrázku 5-14.

Tab. 5-14 Části poloviny upínací šablony pro kruhová ložiska.

Komponenta	Pozice
Spodní kostka	1
Horní kostka	2
Dosedací nerezový plech	3
Závitová tyč	4
Stahovací matice	5
Dorazová destička závitové tyče	6

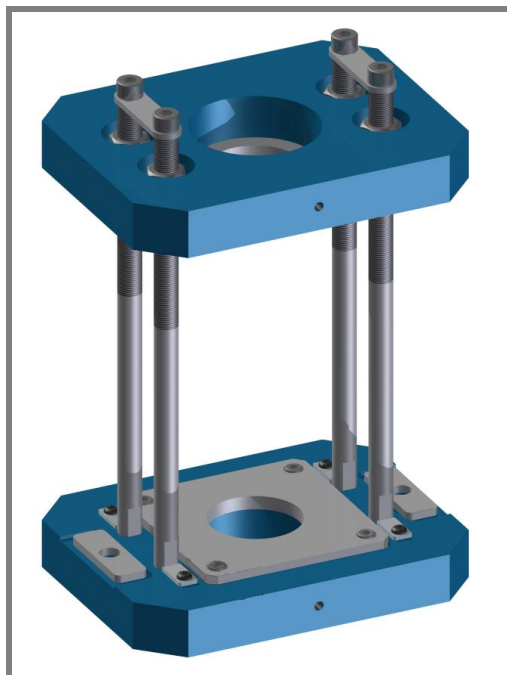


Obr. 5-14 Popis hlavních částí poloviny upínací šablony pro kruhová ložiska.

Vlivem odstředivé síly, způsobené rotací ložisek, by mohlo během nástřikového procesu dojít k rozevření šablony. Tento stav je nepřijatelný, protože by byla vytvořena vrstva o nerovnoměrné tloušťce. Obě poloviny šablony jsou proto v průběhu nástřiku v horní části spojeny, čímž je zamezeno jejich rozdělení.

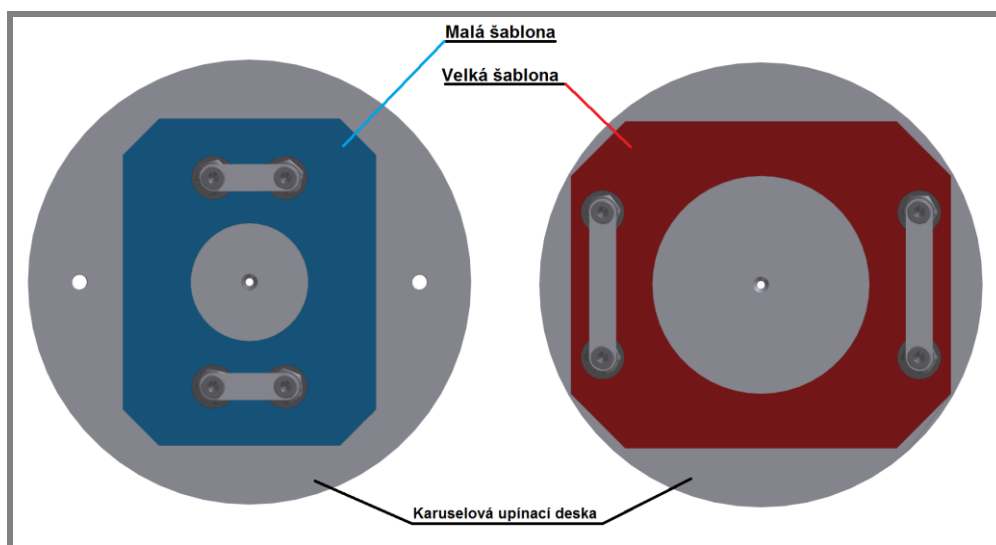
Upínání šablon na karuselovou desku je provedeno pomocí šroubů, aby byla zajištěna dostatečná tuhost spojení a nemohlo dojít k uvolnění šablony během rotace

v průběhu nástřikového procesu. Složená šablona v konfiguraci pro upnutí na karuselovou desku je zobrazena na obrázku 5-15.



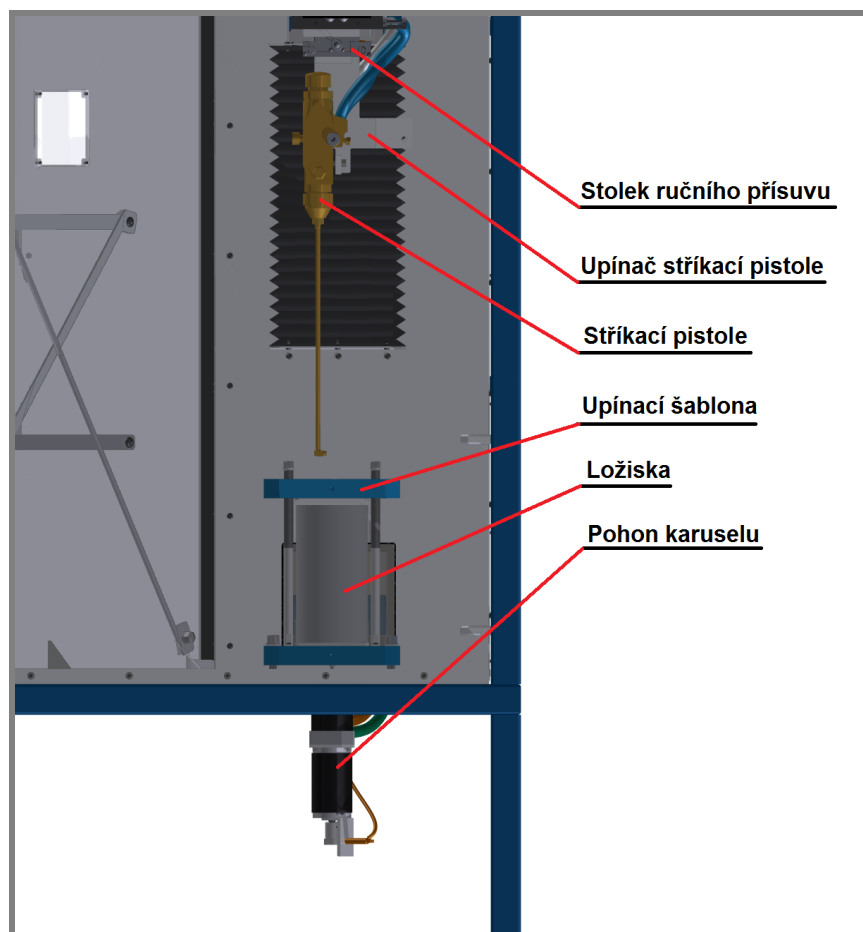
Obr. 5-15 Složená šablona pro upínání ložisek.

V zadání práce je požadován nástřik na ložiska o průměrech od 30 do 150 mm. Z tohoto důvodu jsou vytvořeny 2 šablony, které dělí požadovaný rozsah. Menší šablona slouží pro upnutí ložisek o průměru od 30 do 90 mm a velká šablona od 90 do 150 mm. Malá šablona je dále rozdělena pro rozsahy 30 až 50 mm a 50 až 90 mm. Tato změna se provádí pouze výměnou dosedacích nerezových plechů. Obě navržené šablony je možné upnout na karuselovou desku bez nutnosti její úpravy či dokonce výměny. Toho je dosaženo křížovým rozmístěním středících kolíků, kdy se šablony upínají v rozdílných polohách, které jsou vůči sobě pootočené o 90°. Schéma upínání šablon je uvedeno na obrázku 5-16.



Obr. 5-16 Schéma upínání šablon na karuselové desce – pohled shora.

Konfigurace zařízení při nástřiku na kruhová ložiska je uvedena na obrázku 5-17.



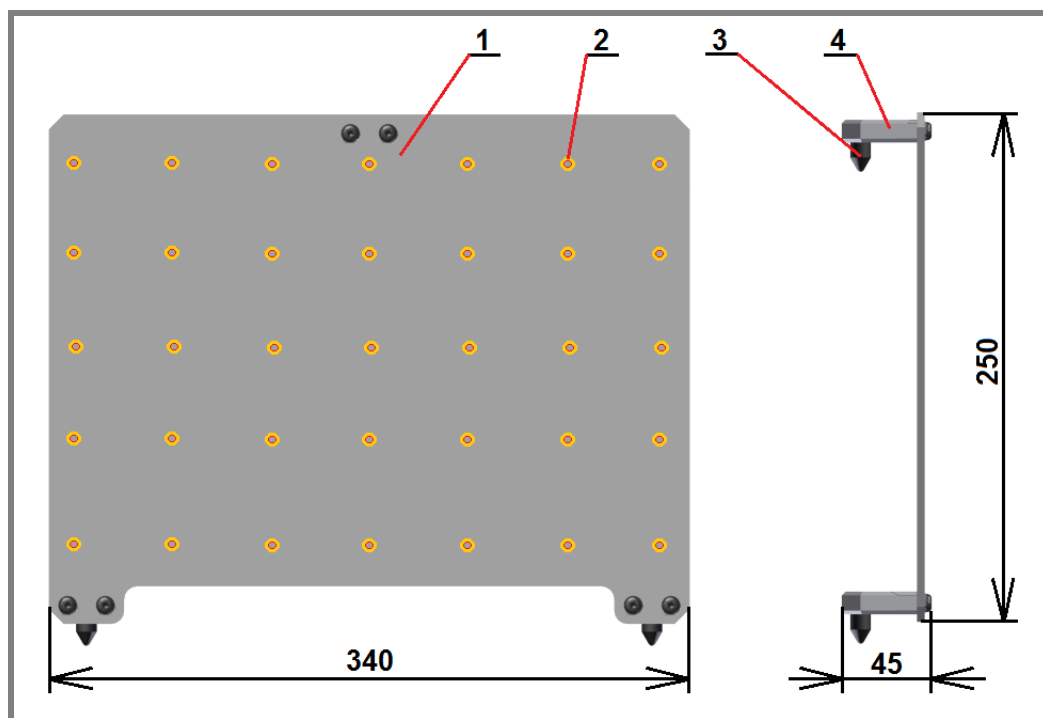
Obr. 5-17 Zařízení při nástřiku na kruhová ložiska – boční pohled.

5.1.6 Upínání lineárních ložisek a vzorků

Zařízením budou nanášeny kluzné laky nejen na pracovní povrchy kruhových ložisek, ale také na lineární kluzná ložiska, případně na malé laboratorní vzorky, které slouží pro tribologické testy. Lineární ložiska mohou mít délku až 200 mm. Laboratorní vzorky jsou naopak poměrně malé s rozměry 10x10 mm až 20x20 mm. Pro upínání těchto rovinných součástí byla vytvořena samostatná upínací deska. Ta je vyrobena z nerezové oceli pro zajištění odolnosti vůči nastříkované směsi. Upínání ložisek a vzorků se provádí pomocí magnetů, které jsou zapuštěny ze zadní strany desky. Přední strana magnetů neobsahuje, aby nebyla narušena rovinnost dosedací plochy. Na desku je možné upnout i rozměrnější ložiska nebo větší počet vzorků, protože magnety jsou rozmístěny v roztečích tak, aby plochu upínané součásti pokrývalo více magnetů zároveň. V případě, že by vzorky nebo ložiska nebyly vyrobeny z magnetického materiálu, je možné na desku připevnit upínky, pomocí kterých by se tyto součásti upnuly. Většinou jsou však ložiska i vzorky vyrobeny z magnetických materiálů a použití upínek tak není nutné. Popis jednotlivých částí lineární upínací desky je v tabulce 5-15 a na obrázku 5-18. Rozmístění magnetů je pro přehlednost na obrázku 5-18 zvýrazněno barevně.

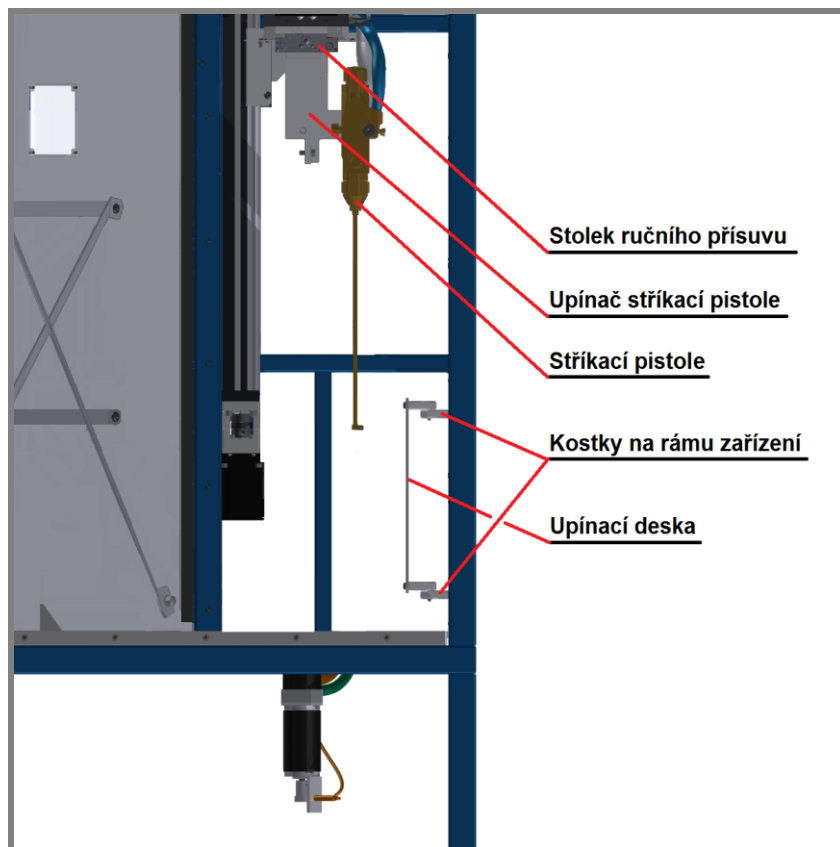
Tab. 5-15 Části lineární upínací desky.

Komponenta	Pozice
Upínací deska	1
Magnety	2
Středící čep	3
Kostka	4



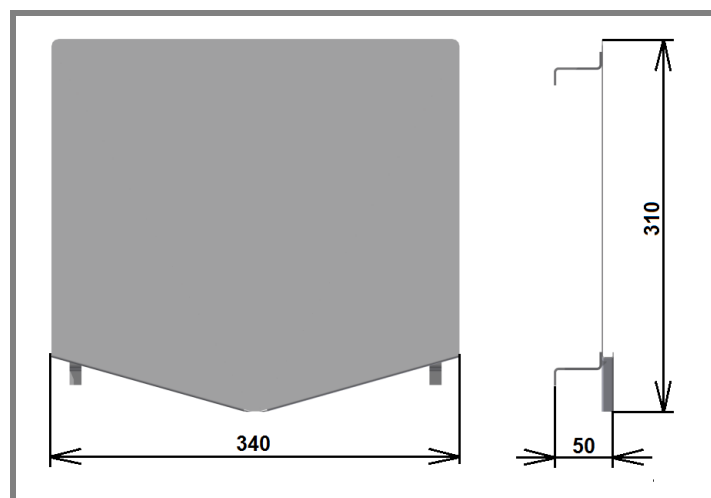
Obr. 5-18 Popis částí lineární upínací desky.

Upínací deska je navržena jako vyjímatelná a je kladen důraz na jednoduchost manipulace při jejím umístění zpět do zařízení. Umístění a zajištění polohy je provedeno použitím středících čepů, které jsou našroubovány v kostkách na zadní straně desky. Tyto čepy přesně zapadají do protikusů umístěných na rámu zařízení a je tak zajištěna vždy stejná poloha desky uvnitř stříkací kabiny. Poloha desky ve stříkací kabině a konfigurace zařízení při nástřiku na lineární ložiska nebo laboratorní vzorky je uvedena na obrázku 5-19. Pro přehlednost a znázornění polohy upínací desky je na obrázku 5-19 skryta přepážka oddělující elektrické součásti od stříkací kabiny.



Obr. 5-19 Zařízení při nástřiku na lineární ložiska – boční pohled.

V případě, kdy je před nástřikem nutné nastavit nebo změnit tvar nástřikované stopy – patternu – je možné místo upínací desky umístit do pracovního prostoru zkušební ostříkovaný terč, který je pro tyto účely vytvořen. Na něm je možné zkusit různá nastavení parametrů nástřiku a odladit tvar stopy ještě před tím, než bude proveden nástřik na ložiska. Terč svými rozměry odpovídá upínací desce, ale je navíc v dolní části vybaven drážkou pro odtékání polymeru do kádinky nebo odpadní nádoby. Zkušební terč se umísťuje do kostek na rámu zařízení stejným způsobem jako upínací deska pro lineární ložiska. Zkušební terč je zobrazen na obrázku 5-20.

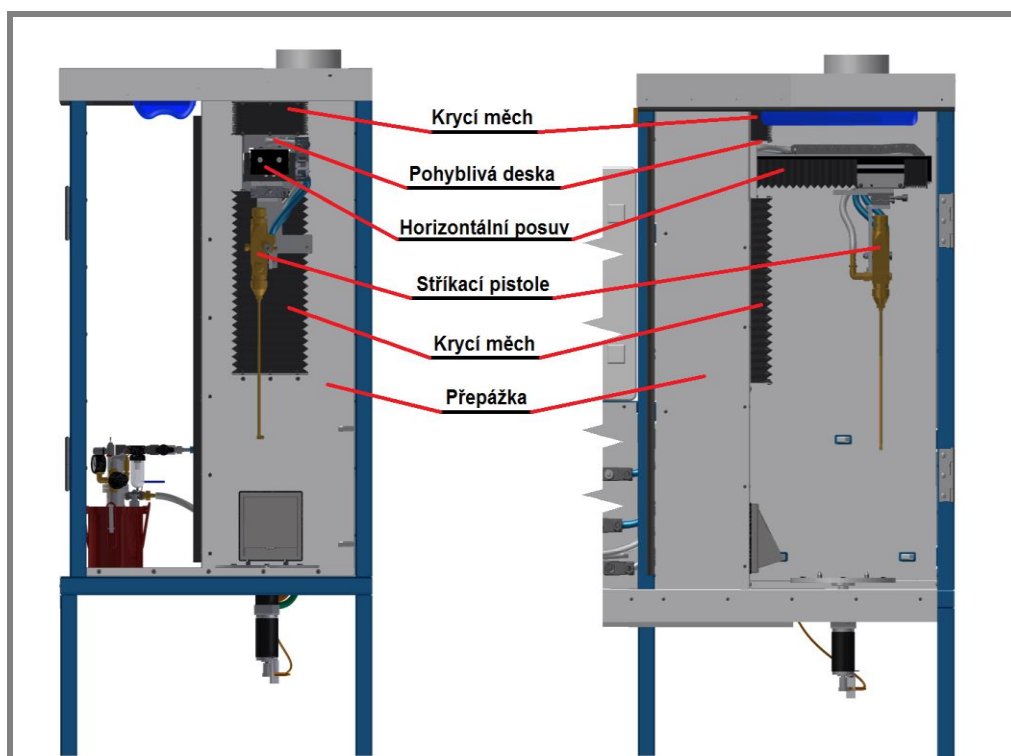


Obr. 5-20 Zkušební ostříkovaný terč.

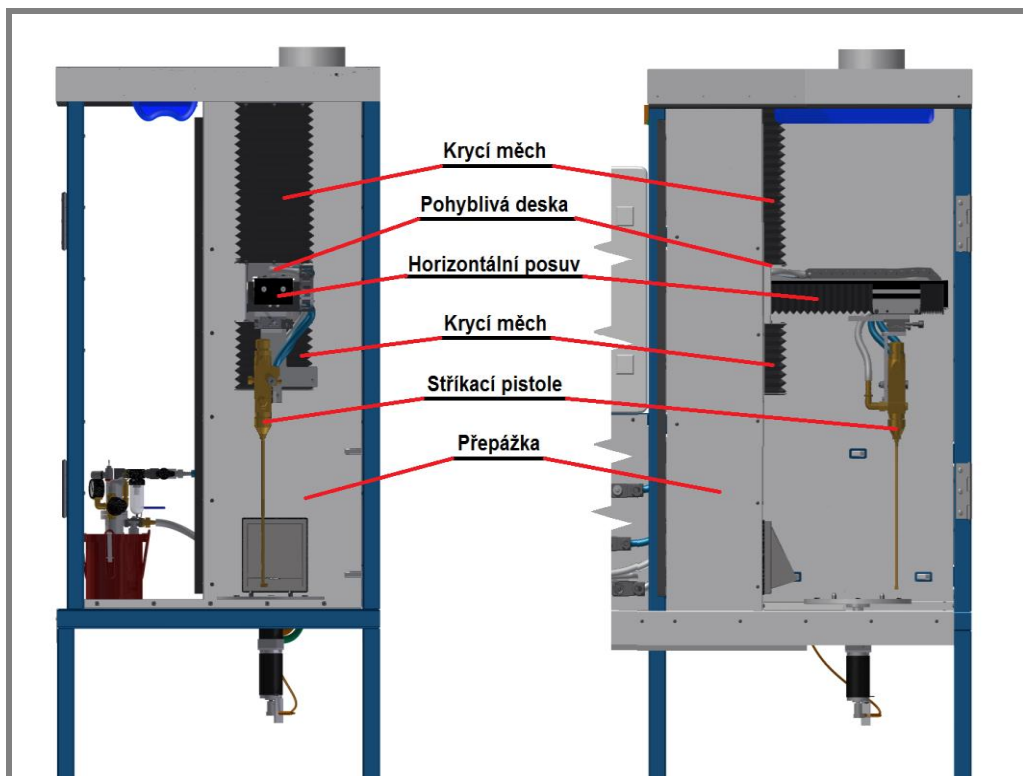
5.1.7 Oddělení elektrických prvků od pracovního prostoru

Bezpečnostní norma ČSN 60079 předepisující bezpečnostní požadavky pro prostory s nebezpečím výbuchu zakazuje umístění elektrických komponent bez příslušné atestace a kompatibility v těchto prostorách. V případě, že by lineární moduly včetně motorů byly umístěny přímo v pracovním prostoru, musely by motory splňovat příslušné požadavky. Náklady na pořízení motorů by však byly velmi vysoké a toto řešení nebylo realizováno. Zvolenou variantou řešení je umístění motorů všech pohonů mimo stříkací kabinu.

DC motor pro pohon karuselové desky je proto umístěn pod pracovním stolem, kde je zároveň chráněn před znečištěním z nástřikového procesu. Oba servomotory, pohánějící moduly lineárního vedení, jsou umístěny za přepážkou, která odděluje pracovní prostor stříkací kabiny. Přepážka je stejně jako ostatní krytovací plechy vyrobena z nerezové oceli. Pro umožnění vertikálního posuvu je v přepážce výřez, ve kterém se může pohybovat horizontální modul. Výřez je zakryt dvojicí krycích měchů, obdobně jako v případě rolen horizontálního posuvu. Měchy jsou pevně uchyceny v přepážce a v desce, která je připojena k horizontálnímu posuvu a roztahují se a stlačují dle pohybu modulu, aniž by omezovaly jeho pohyb. Aby nedocházelo k vybočování měchů při stlačování, jsou v přepážce vytvořeny drážky, ve kterých jsou měchy při pohybu vedeny. Princip funkce krycích měchů a pohled na přepážku v horní poloze lineárního vedení je uveden na obrázku 5-21, resp. 5-22.

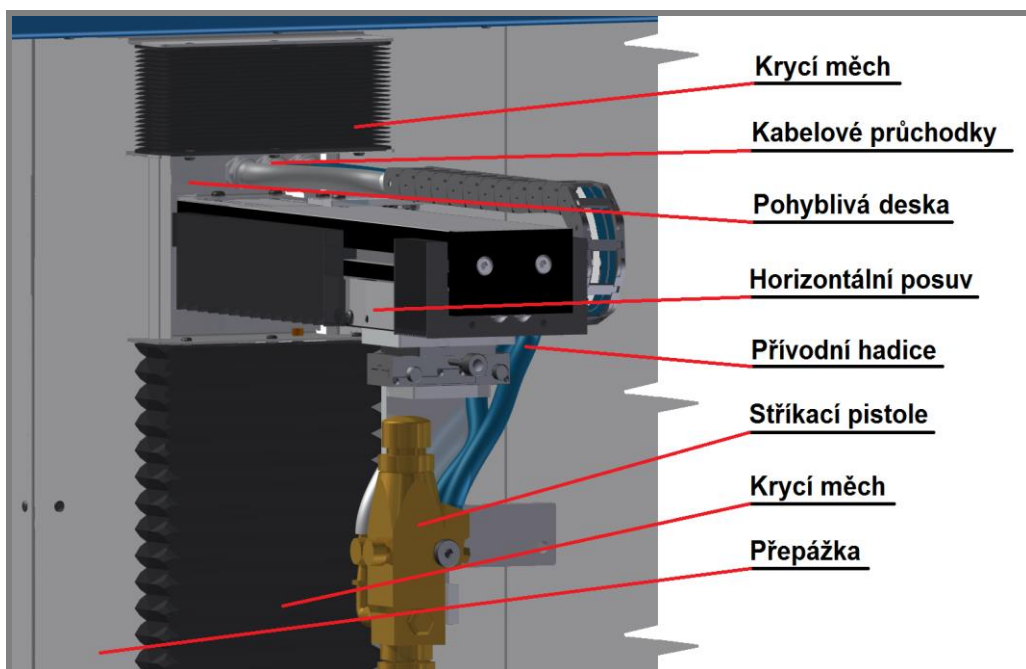


Obr. 5-21 Přepážka při horní poloze lineárního vedení – boční a čelní pohled.



Obr. 5-22 Přepážka při dolní poloze lineárního vedení – boční a čelní pohled.

Pro zajištění průchodu přívodních hadic ke stříkácí pistoli jsou v desce na horizontálním posuvu umístěny 3 kabelové průchody, přes které hadice vedou. Za průchodkami jsou hadice umístěny v energetickém řetězu a přivedeny až ke stříkácí pistoli. Detailní pohled na umístění průchodek s přívodními hadicemi v desce je na obrázku 5-23.



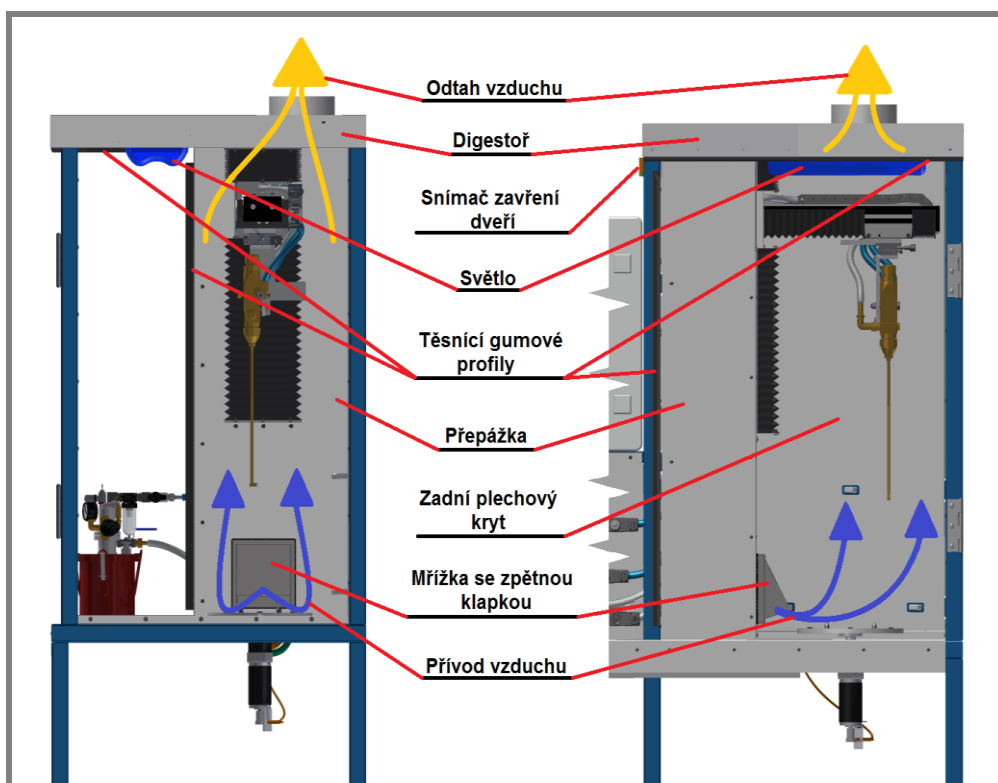
Obr. 5-23 Detail na průchod hadic stříkácí pistole v desce.

5.1.8 Krytování a zajištění bezpečnosti

Prostor stříkací kabiny je ze všech stran krytovaný nerezovými plechy. Přístup do kabiny je možný pouze z přední strany přes dveře. Poloha zavřených dveří je kontrolována snímačem a v případě, že dojde k otevření dveří během nástřiku, je nástřik ihned přerušen. Zároveň nejsou-li dveře řádně uzavřeny, není možné nástřik zahájit. Prostor stříkací kabiny je v okolí dveří těsněn pomocí gumových profilů.

Nástřikové zařízení je umístěno v samostatné laboratoři, která je mírně přetlakována. V horní části stříkací kabiny je umístěna digestoň, přes kterou je odsáván vzduch z pracovního prostoru. Rozdíl tlaku vzduchu mezi laboratoří a stříkací kabinou zajišťuje bezpečnost tak, že nemůže dojít k úniku vzduchu ze stříkací kabiny do okolního prostředí. Prostor laboratoře je navíc kontrolován senzory tlaku a koncentrace nebezpečných látek. V případě překročení nastavených limitů dojde ke spuštění alarmu a upozornění obsluhy.

V případě, že by bylo nutné zajistit řízenou cirkulaci vzduchu uvnitř stříkací kabiny nebo by byl vyžadován speciální přívod vzduchu, který by sloužil jako ochranná atmosféra po dobu nástřiku, je možné připojit přívod vzduchu do mřížky se zpětnou klapkou v dolní části stříkací kabiny. Přes tuto mřížku může vzduch proudit do pracovního prostoru. Při této konfiguraci je však důležité nastavit takové podmínky proudění, aby nebyl narušen tlakový rozdíl mezi prostředím laboratoře a stříkací kabinou. Pohled do stříkací kabiny s popisem bezpečnostních komponent a znázorněním proudění vzduchu je na obrázku 5-24. Pro přehlednost nejsou na obrázku 5-24 zobrazeny dveře a boční krycí plech.



Obr. 5-24 Proudění vzduchu ve stříkací kabině a bezpečnostní prvky.

Přístup světla do stříkací kabiny je kvůli krytování omezen. Proto je na digestoři umístěno světlo, které osvětluje celý pracovní prostor tak, aby byla zajištěna dobrá viditelnost a komfort pro obsluhu. Světlo je jediným elektrickým prvkem, který se nachází uvnitř stříkací kabiny, a proto je zvolen typ, který odpovídá standardům pro použití v prostorech s nebezpečím výbuchu EX kategorie 2, dle normy ČSN 60079. Světlo je navíc prachotěsné a odolné proti stříkající kapalině se stupněm krytí IP 66, dle normy EN 60529. Zároveň má zvýšenou chemickou odolnost a splňuje tak bezpečnostní požadavky na použití uvnitř stříkací kabiny nástřikového zařízení [37,38,39].

Součástí zajištění bezpečnosti jsou také ochranné pomůcky jako rukavice, brýle a respirační maska, které musí obsluha používat během manipulace s rozpouštědlem, při přípravě polymerní směsi a také během nástřiku.

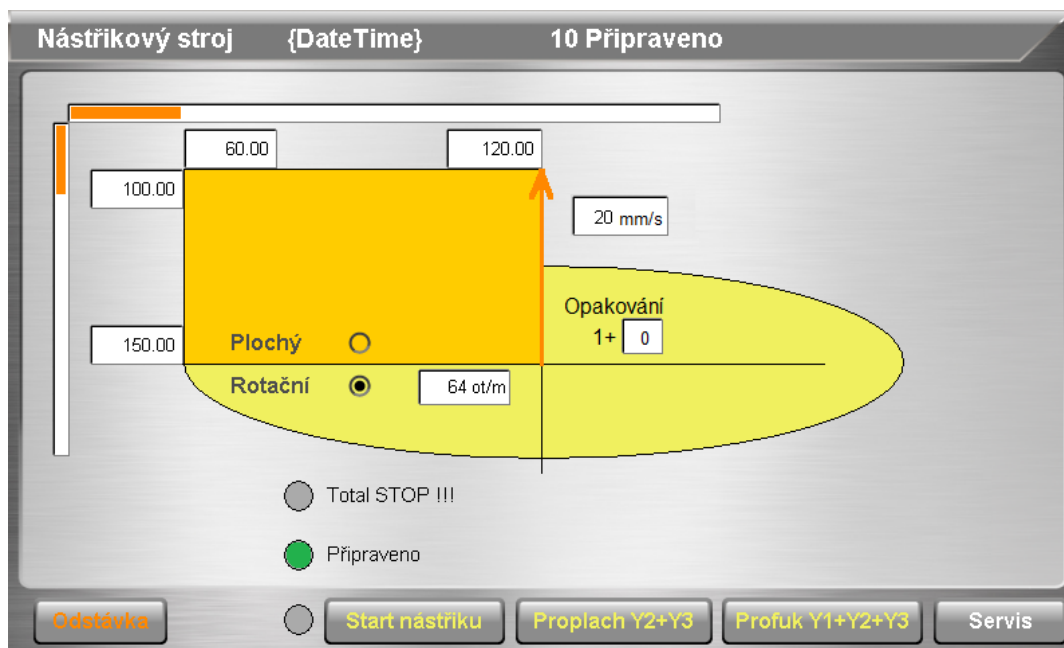
5.1.9 Ovládání zařízení

Celé zařízení je ovládáno řídicím programem. Rozhraním pro obsluhu a nastavení všech parametrů je 7“ dotykový display, který je umístěn v elektrickém rozvaděči. Obsluha může nastavovat všechny parametry nástřikového procesu, přímo zadáním na displeji a podle daného nastavení se poté provádí nástřik. Parametry, které může obsluha nastavit, se pro nástřik na kruhová a lineární ložiska liší.

V případě kruhových ložisek lze nastavit:

- délku dráhy nástřiku zadáním minimální a maximální výšky,
- rychlost pohybu stříkací pistole,
- počet otáček karuselové desky,
- počet opakování nanášecích cyklů.

Obrazovka nastavitelných parametrů pro kruhová ložiska s možnostmi nastavení je na obrázku 5-25.

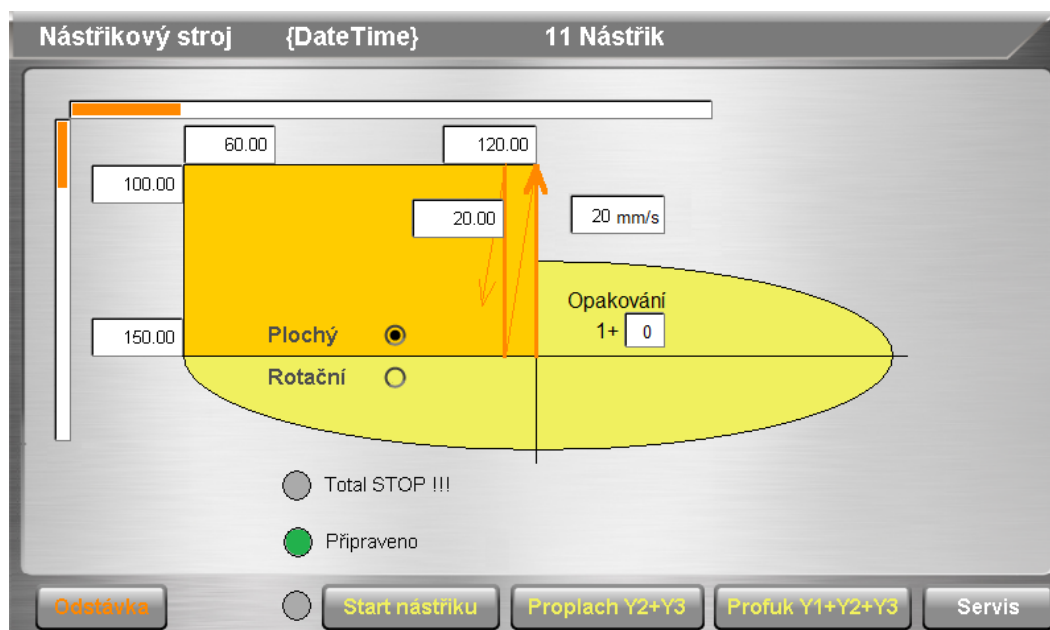


Obr. 5-25 Obrazovka nastavení parametrů nástřiku na kruhová ložiska.

V případě lineárních ložisek a vzorků lze nastavit:

- výšku nástřiku,
- délku nástřiku,
- strategii pohybu pistole a rozteč mezi jednotlivými přejezdy,
- rychlost pohybu stříkací pistole,
- počet opakování nanášecích cyklů.

Obrazovka nastavitelných parametrů pro lineární ložiska s možnostmi nastavení je na obrázku 5-26.

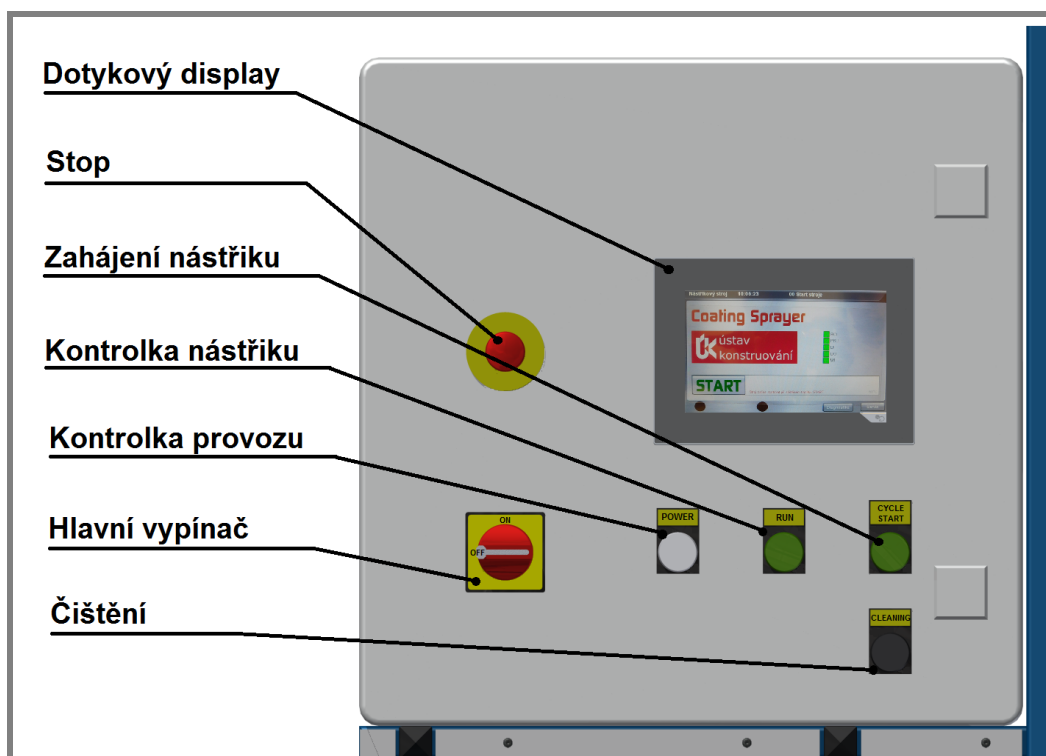


Obr. 5-26 Obrazovka nastavení parametrů nástřiku na lineární ložiska.

Kromě nastavení parametrů nástřiku umožňuje program definování maximálních rozsahů pohybu, najetí na požadovanou souřadnici, ruční ovládání posuvů a samostatné ovládání jednotlivých ventilů. Dále je možné přepnout program do servisního menu, kde jsou vypsány všechny provozní hlášky a aktuální stav zařízení.

Na elektrickém rozvaděči je umístěno tlačítko pro start nástřiku, kterým se spouští nástřik po nastavení všech parametrů na displeji. Pod tlačítkem zahájení nástřiku je umístěno tlačítko pro čištění nástřikového okruhu. Této funkce se využívá po provedení nástřiku, kdy je nutné odstranit z okruhu zbytky nastříkované směsi. Do zásobní nádoby se v tomto případě nalije pouze rozpouštědlo a na požadovanou dobu se stiskne tlačítko čištění. Tím se otevřou oba ventily a rozpouštědlem se propláchne celý okruh včetně stříkací pistole.

Vedle tlačítka zahájení nástřiku jsou umístěny 2 kontrolky. Zelená kontrolka svítí v případě nástřiku a označuje právě probíhající nástřikový proces. Bílá kontrolka svítí vždy, když je zařízení zapnuto, a označuje funkční provozní stav. Vlevo od kontrolky je umístěn hlavní vypínač, kterým se zařízení zapíná a vypíná. Nad hlavním vypínačem je nouzové tlačítko „Stop“, kterým je možné zařízení okamžitě vypnout v případě poruchy nebo nebezpečí. Rozmístění všech ovládacích prvků a kontrolky na elektrickém rozvaděči je uvedeno na obrázku 5-27.



Obr. 5-27 Rozmístění ovládacích prvků na elektrickém rozvaděči.

5.2 Výpočty a simulace

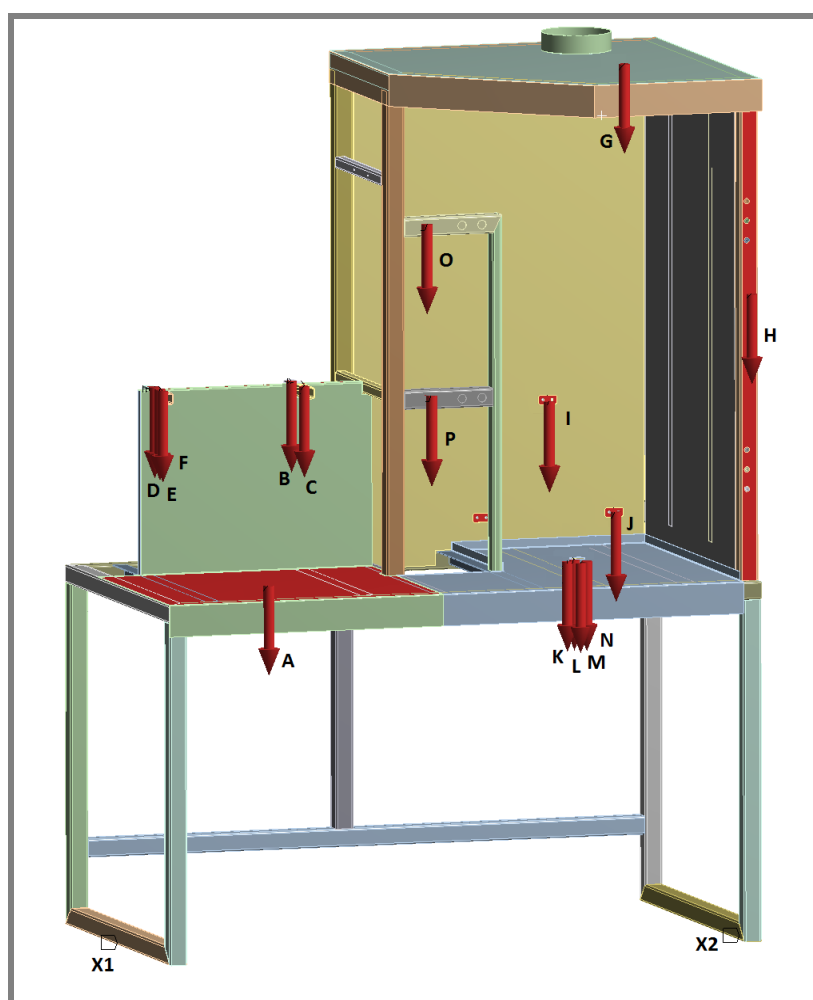
Pro výpočet tuhosti a zjištění deformací rámu zařízení je provedena deformačně-napěťová MKP analýza v kap. 5.1.1. V této analýze není uvažováno krytování stříkací kabiny, dveře ani desky pracovního stolu. Všechny tyto díly mají relativně velké rozměry a jsou vyrobeny z nerezových plechů o tloušťce 1 mm. Při polohování stříkací pistole nebo při rotaci karuselové upínací desky v průběhu nástřiku může docházet k vibracím plechů z důvodu jejich velkých rozměrů a malé tloušťky.

5.2.1 Modální analýza

Modální analýza pro zjištění vlastních frekvencí a rezonančních pásem, je provedena v zatíženém stavu, který odpovídá provozu zařízení. Definované zatížení a okrajové podmínky jsou stejné jako u deformačně-napěťové analýzy rámu i se započítáním 5 kg (50 N) rezervy. Pouze zatížení od tlakové nádoby a zatížení digestoře je přiřazeno na plochu plechů, aby více odpovídalo skutečnému stavu. Výpočtová síť je nastavena na jednotnou velikost prvků 20 mm. Zatížení a okrajové podmínky vazeb vetknutí v místech X1 a X2, definované pro modální analýzu, jsou uvedeny v tabulce 5-16 a na obrázku 5-28. Pro přehlednost jsou na obrázku 5-28 skryty dveře pro přístup do stříkací kabiny.

Tab. 5-16 Definované zatížení pro modální analýzu.

Komponenta	Hmotnost [kg]	Zatížení [N]	Označení sil
Tlakové nádoby	6	110	A
Elektrický rozvaděč	25	300	B,C,D,E,F
Digestoř	4	90	G
Dveře	9	140	H
Lineární upínací deska	3,5	85	I,J
Karuselová upínací deska	13	180	K,L,M,N
Lineární vedení	22	270	O,P



Obr. 5-28 Okrajové podmínky modální analýzy nástřikového zařízení.

Pro posouzení výsledků modální analýzy je nutné určit také provozní frekvence, ve kterých je nástřikové zařízení provozováno. Výpočet frekvence otáčení motorů pro pohon lineárních modulů a pro pohon karuselové upínací desky je proveden podle rovnice 5.20, resp. 5.21.

Provozní frekvence lineárních modulů:

$$f_1 = \frac{v_{\max}}{s} = \frac{100\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}}{4\text{mm}} = 25\text{s}^{-1} = 25\text{Hz} \quad (5.20)$$

kde: f_1 [Hz] - max. provozní frekvence motorů lineárních modulů,
 v_{\max} [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$] - max. rychlost posuvu lineárních modulů,
 s [mm] - stoupání šroubu lineárních modulů.

Provozní frekvence karuselové upínací desky:

$$f_2 = \frac{n_2}{60 \cdot i} = \frac{300 \text{ min}^{-1}}{60 \cdot \frac{1}{4}} = 20\text{s}^{-1} = 20\text{Hz} \quad (5.21)$$

kde: f_2 [Hz] - max. provozní frekvence motoru karuselové desky,
 n_2 [min^{-1}] - max. otáčky karuselové upínací desky,
 i [-] - převodový poměr planetové převodovky.

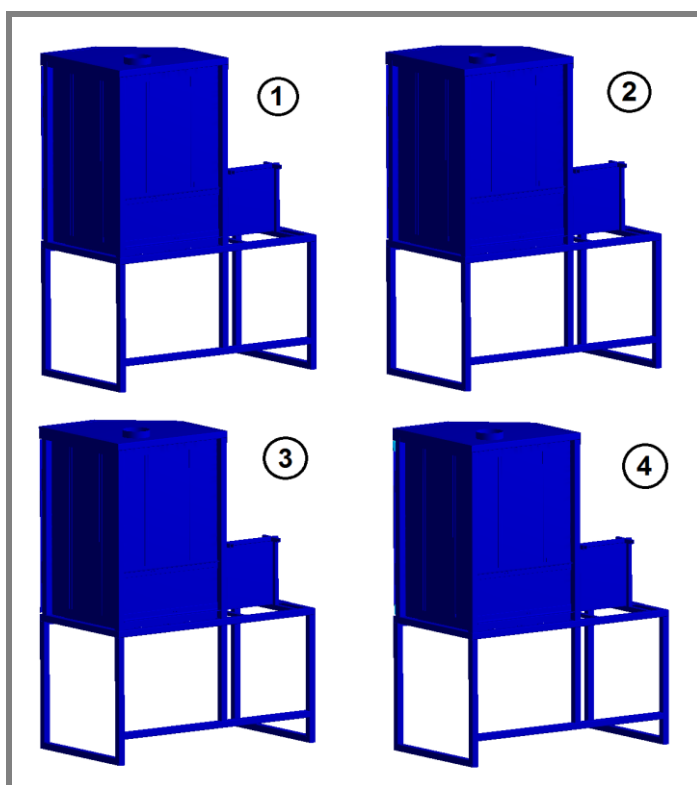
Výsledky modální analýzy jsou uvedeny v tabulce 5-17. Na obrázku 5-29 jsou vykresleny první 4 rezonanční frekvence zařízení při pohledu zezadu. Na obrázku 5-30 jsou tyto frekvence zobrazeny při pohledu na zařízení zepředu. Všechny rezonanční frekvence až do provozního maxima 25 Hz jsou uvedeny v příloze 4.

Tab. 5-17 Vlastní frekvence nástřikového zařízení.

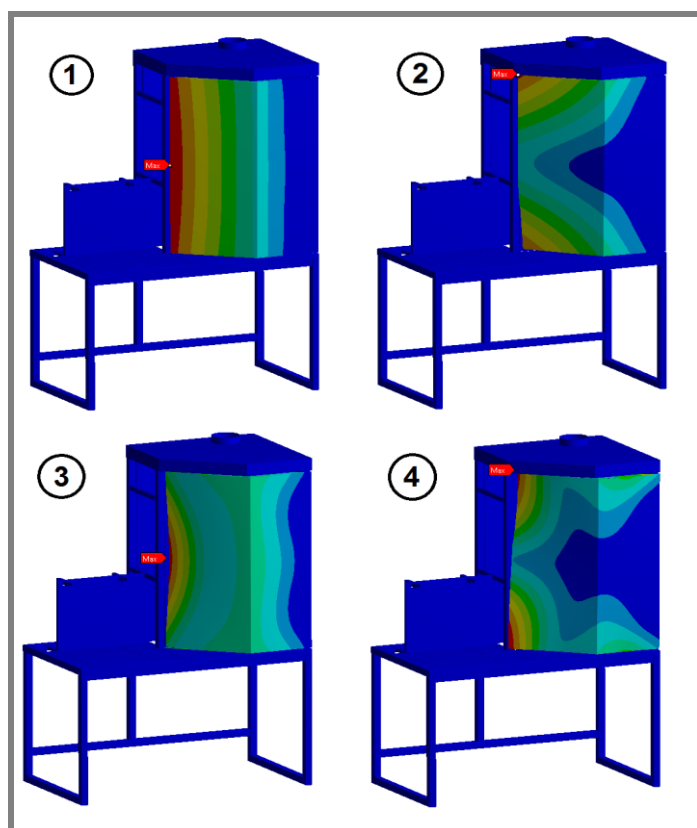
Mód	Frekvence [Hz]		Mód	Frekvence [Hz]
1	1,2		8	15,2
2	2,3		9	16,0
3	6,2		10	18,9
4	7,7		11	20,7
5	10,2		12	21,4
6	14,4		13	23,2
7	14,9		14	29,6

Pro zpevnění bočního a zadního plechu krytování stříkací kabiny jsou na jejich vnějších stranách přivařeny výztuhy pro zvýšení tuhosti. Z výsledků modální analýzy je vidět, že výztuhy tyto krycí plechy dostatečně zpevňují a nedochází zde k žádným vibracím.

Velkých výchylek naopak dosahují dveře pro přístup do stříkací kabiny. I na dveřích jsou přidělané vzpěry a výztuhy pro zvýšení torzní tuhosti a omezení vibrací. Navíc jsou dveře v zavřené poloze v horním i dolním rohu pevně přichyceny k rámu zařízení, aby nemohlo dojít k jejich samovolnému otevření, čímž by se přerušil kontakt se snímačem a zastavil nástřík. Resonanční frekvence dveří jsou tak potlačeny a při reálném provozu zařízení nedochází k vibracím velkých plechových dílů, což bylo ověřeno v průběhu testování.



Obr. 5-29 Zobrazení prvních 4 rezonančních frekvencí zařízení – pohled zezadu.



Obr. 5-30 Zobrazení prvních 4 rezonančních frekvencí zařízení – pohled zpredu.

5.3 Ověření funkčnosti

Po vyrobení jednotlivých součástí a dokončení montáže zařízení bylo nutné ověřit funkčnost jednotlivých komponent a zařízení jako celku. Ověřování a zkoušky byly rozděleny na několik etap:

- samostatné zkoušky jednotlivých dílů a celků,
- provedení zkušebních nástřiků,
- testování nástřiku na ložiska.

Před provedením zkušebních nástřiků bylo nutné nejprve ověřit funkčnost jednotlivých celků nezávisle na sobě. Testována byla rychlost posuvu lineárního vedení, přesnost a opakovatelnost polohování a dosažení požadovaného počtu otáček karuselové desky.

Přesnost a opakovatelnost polohování stříkací pistole byla ověřena opakovanými nájezdy na předem definovaný bod v pracovním prostoru. Tento bod byl vytvořen jako pevný doraz a zkoušení probíhalo v celém rozsahu pohybu stříkací pistole v rámci pracovního prostoru. Rychlost pohybu lineárních modulů byla ověřena pomocí stopek a sledován byl čas potřebný pro uražení definované vzdálenosti. Počet otáček karuselové desky byl ověřen pomocí otáčkoměru.

Testovací nástřiky probíhaly na malé desky a kruhové vzorky, které simulovaly podmínky nástřiku na reálná ložiska. Při těchto testech se sledoval jednak vliv nastavení různých tlaků vzduchu atomizace na vytvoření rovnoměrné vrstvy kluzného laku, dále pak vliv tlaku vzduchu v zásobní nádobě na zajištění dostatečné dodávky nástřikované směsi. V případě kruhových vzorků byla navíc ověřována možnost sladění rychlosti pohybu stříkací pistole s rychlostí otáčení karuselové desky tak, aby byla vytvořena rovnoměrná tloušťka vrstvy kluzného laku.

Závěrečným krokem testování bylo provedení nástřiku na skutečná ložiska. Testování probíhalo s rozdílnými polymerními materiály a s různými poměry smíchání polymeru s rozpouštědlem. Tím byla ověřena možnost používat zařízení pro více materiálů a rozdílné podmínky nástřiku. Zkušební nástřiky byly provedeny na několik sad ložisek a hlavními sledovanými parametry byla tloušťka a rovnoměrnost nástřikované vrstvy kluzného laku, a také opakovatelnost celého nástřikového procesu. Výsledkem testů jsou ložiska s kluzným lakem, která jsou zobrazena na obrázku 5-31.



Obr. 5-31 Ložiska po provedení zkušebních nástřiků.

Testování zařízení proběhlo úspěšně. Ověřena byla funkčnost všech součástí samostatně i v rámci celého zařízení. Při testovacích nástřicích byly vyzkoušeny různé parametry nástřiku, které se později doladily při testování na skutečných ložiscích. Výsledkem testů je několik sad ložisek, na jejichž pracovní povrch byl nanesen polymerní kluzný lak. Vytvořený kluzný lak splňuje požadavky na tloušťku a rovnoměrnost nanesené vrstvy, což jsou nejdůležitější požadované parametry. Provedením nástřiku na více sad ložisek s dosažením stejných výsledků byla ověřena opakovatelnost nástřikového procesu.

6 DISKUZE

Výsledkem práce je konstrukční návrh zařízení pro nanášení polymerních laků na kluzná ložiska klikových hřídelů. Zařízení slouží pro nanášení kluzných laků primárně na ložiska kruhového tvaru, ale je možné změnit jeho konfiguraci pro nástřik na lineární ložiska a malé rovinné vzorky. Tato změna se provádí pouze výměnou upínacích desek a není tak časově náročná. Obsluha má možnost kontrolovat všechny důležité parametry nástřiku nastavením v řídicím programu a pomocí regulačních prvků, které jsou součástí nástřikového okruhu.

V průběhu montáže zařízení se vyskytlo několik problémů s přesností dílů přepážky oddělující elektrické prvky od stříkací kabiny. Zde byly vytvořeny nedostatečné tolerance, které by zajistily bezproblémovou smontovatelnost tohoto konstrukčního uzlu. Tyto nedostatky se však odstranily dodatečnou úpravou součástí, aniž by byla ohrožena správná funkčnost zařízení nebo bezpečnost obsluhy. Všechny provedené úpravy a návrhy na zlepšení byly zpětně zaneseny do 3D modelu a výkresové dokumentace tak, aby se při případné výrobě dalšího zařízení těmto problémům zabránilo.

Původní návrh nástřikového okruhu počítal s použitím dvou tlakových nádob spojených Y-spojky a s výběrem přívodní cesty nastavením ručního kulového ventilu. Jedna nádoba obsahovala nastříkovanou polymerní směs a druhá rozpouštědlo pro čištění celého okruhu. Při testování v delším provozním čase se však toto řešení ukázalo jako nevýhodné, protože velmi často docházelo k zanášení a zpětnému zatékání polymerní směsi do přívodů pro rozpouštědlo a tlakový vzduch. Nebylo tak možné zajistit dokonalé vyčištění okruhu po ukončení nástřiku, a navíc docházelo vlivem rozdílných tlaků k vniknutí rozpouštědla až za elektromagnetický ventil, kde se poškozovaly přívodní vzduchové hadice. Proto byla nádoba na rozpouštědlo z obvodu odstraněna a využívá se pouze jedna tlaková nádoba. Do té se umísťuje polymerní směs pro nástřik a po ukončení nástřikového procesu také rozpouštědlo pro čištění. Navíc byla zjednodušena materiálová cesta zajištěním přímé dopravy směsi do stříkací pistole bez použití Y-spojek. Pro vyřešení problému a zachování konceptu vícecestného systému se dvěma tlakovými nádobami by bylo nutné použít trojcestný rozvaděč, který by zajistil plné uzavření nepoužívaných cest přímo v místě větvení. Použití pouze jedné nádoby se však ukázalo jako výhodnější a jednodušší z hlediska obsluhy, a proto byla zvolena tato varianta.

Velkým přínosem zkonstruovaného zařízení je, že jako zdroj nastříkované polymerní směsi je použita tlaková nádoba, která zajišťuje dodávku směsi v konstantním tlaku a ve stejném objemu. Tím je zaručen nástřik kluzné vrstvy o rovnoměrné tloušťce po celé ploše ložisek. Jelikož bylo zařízení navrženo primárně pro výzkumné účely s předpokladem časté změny nastříkovaných materiálů, je použití tlakové nádoby velmi výhodné a přináší výraznou úsporu materiálových nákladů tím, že objem směsi potřebný pro vytvoření kluzného laku je velmi malý v porovnání s použitím čerpadla nebo membránové pumpy.

Problémy, které se vyskytly v průběhu montáže nebo testování, byly odstraněny. Zařízení umožňuje nanášení kluzných laků na velký rozsah kruhových i lineárních ložisek v požadované kvalitě i při opakovaných cyklech. Navržený koncept a celé řešení se v reálném provozu osvědčilo a po odladění všech systémů zařízení bezproblémově funguje a plní požadované úkoly.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout a zkonstruovat zařízení pro nanášení polymerních kluzných laků na pracovní plochy motorových kluzných ložisek, včetně otestování a ověření jeho funkčnosti. Navržené zařízení umožňuje nanášení kluzných laků nejen na kruhová ložiska, ale také na lineární ložiska nebo malé laboratorní vzorky. Tyto vzorky slouží primárně pro tribologické zkoušky a testování různých druhů polymerních laků před jejich použitím v reálné aplikaci.

V přehledu současného stavu poznání jsou shrnuty nejdůležitější informace týkající se konstrukce kluzných ložisek, která se používají v automobilovém průmyslu. Jsou uvedeny nejpoužívanější typy povlaků a kluzných laků s přihlédnutím k jejich použití a popsány metody a technologie jejich nanášení. Uvedeny jsou také informace a poznatky související s konstrukcí stříkacích boxů a lakovacích kabin, ze kterých navržené zařízení vychází.

V kapitole koncepčních návrhů je zařízení rozděleno na jednotlivé konstrukční podskupiny a jsou popsány komponenty, ze kterých je zařízení navrženo. Diskutovány jsou možné varianty řešení konstrukčních uzlů a shrnuty výhody a nevýhody jednotlivých řešení. Dále je navržen koncept nanášení kluzného laku jak pro kruhová, tak pro lineární ložiska a vytvořeny 3 konstrukční návrhy celého zařízení. Ty řeší rozmístění jednotlivých komponent, ergonomii ovládání a také bezpečnost podle příslušných norem a požadavků. Z těchto návrhů pak vychází finální konstrukční varianta.

V části věnované samotnému konstrukčnímu řešení jsou popsány všechny zvolené komponenty, detailně vysvětlena jejich funkce v rámci celého zařízení a také odůvodněn jejich výběr. Součástí konstrukčního řešení bylo také vypracování kompletní výkresové dokumentace a následné zadání do výroby. Po výrobě bylo zařízení smontováno a byly provedeny první zkušební nástřiky. Poté probíhalo testování přímo u zadavatele a byly prováděny nástřiky na ložiska, které se testují v reálných provozních podmínkách. Provedené testy dopadly úspěšně a byla tak ověřena funkčnost jednotlivých částí i zařízení jako celku.

Nástřikové zařízení bylo navrženo dle požadavků zadání, bylo odzkoušeno a je připraveno pro další práci v rámci vývoje a testování nových materiálů pro kluzné laky motorových ložisek. Kromě výzkumné práce je možné zařízení použít také pro malosériovou výrobu, případně na základě vytvořené výkresové dokumentace vyrobit další stroje, které mohou být zařazeny do výrobního procesu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] NURSOY, M. ÖNER, C. a CAN, I. Wear behavior of a crankshaft journal bearing manufactured by powder spraying. In: *Materials and design* 29. [online] p. 2047-2051. 2008. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306908000964>
- [2] KOPELIOVICH, D. *pMaxBlack TM: Strengthened Tri-metal Bearing Materials for High Performance Bearings*. King Engine Bearings, Inc., USA. [online]. [cit 2017-04-02]. Dostupné z: http://www.kingbearings.com/wp-content/uploads/2014/10/Strengthened_tri-metal_bearing_material_for_high_performance_bearings.pdf
- [3] Maserati forum. *4.2 litre crankshaft*. [online]. [cit. 2015-11-20] Dostupné z: http://www.maseratilife.com/forums/attachments/modern-maserati/3610d1234504359-4-2-litre-crankshaft-360m_2.jpg
- [4] *Removal and instalation of engine block*. MMC-manuals.ru [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: http://mmc-manuals.ru/manuals/pajero_sport_iii/online/Service_Manual/2016/11/html/M111300870464001ENG.HTM
- [5] KOPELIOVICH, D. *Engine Bearing Materials*. King Engine Bearings, Inc., USA. [online]. [cit 2017-02-05]. Dostupné z: <http://www.kingbearings.com/wp-content/uploads/2014/10/Engine-Bearing-materials.pdf>
- [6] KOPELIOVICH, D. *Camshaft bearings*. Substances and Technologies-Knowledge source on Materials engineering. [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=camshaft_bearings
- [7] TARBET, A, M. *Babbitt: The other bearing lubrication*. Machinery Lubrication. 10/2014 [online]. [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: <http://www.machinerylubrication.com/Read/29898/babbitt-bearing-lubrication>
- [8] [Příspěvek v diskuzním fóru]. In: *Practical machinist: using babbitt*. [online]. 21. 11. 2010, 22:35. [cit. 2015-11-08]. Dostupné z: <http://www.practicalmachinist.com/vb/general/using-babbitt-214552/>
- [9] Engine Bearings Calatog 2017-2018, King Engine Bearings, Inc., USA. [online]. [cit 2017-03-12] Dostupné z: <http://www.kingbearings.com/wp-content/uploads/2017/03/King-catalog-201-2018-Europe-2.pdf>
- [10] *Coated engine bearings for boundary lubrication conditions*. Mahle GmbH. Stuttgart. Deutschland. [online]. [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.mahle.com/mahle/en/news-and-press/press-releases/coated-engine-bearings-for-boundary-lubrication-conditions.jsp>

- [11] *Engine bearings with polymer coating*. Kolbenschmidt MS Motorservice international GmbH. Neuenstadt. Deutschland. [online]. [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: https://cdn2.ms-motorservice.com/fileadmin/media/MAM/PDF_Assets/ks_pi_1575-02_web_475912.pdf
- [12] DIAHAM, S. LOCATELLI, L. LEBEY, T a DINCULESCU, S. Dielectric and thermal properties of polyamide-imide (PAI) films. In: *Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena*. 2009. p. 482-485. [online]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5377778>
- [13] QUAGLINI V. a DUBINI P., "Friction of Polymers Sliding on Smooth Surfaces," *Advances in Tribology*, vol. 2011, Article ID 178943, 8 pages, 2011. doi:10.1155/2011/178943. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/at/2011/178943/cta/>
- [14] Material information. *Polyamide/imide (PAI)*. Goodfellow international. [online]. [cit 2015-11-20]. Dostupné z: <http://www.goodfellow.com/E/Polyamide-imide.html>
- [15] King Racing, High Performance Bearings, pMaxKote TM. Polymer bearings. King Engine Bearings, Inc., USA. [online]. [cit 2017-03-12] Dostupné z: <http://www.kingbearings.com/wp-content/uploads/2016/12/pMaxKote%E2%84%A2-Flyer1.pdf>
- [16] SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R. a BUDYNAS, R. G. (2010): *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. VUTIUM, Brno. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [17] GÁBRIŠOVÁ, Z. a BRUSILOVÁ A., Prevádzkové podmienky a porušenie klzných ložísk. *Strojárstvo/Strojirenství*. [online]. [cit. 2015-06-28]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/clanky2/loiska/1558-prevadzko-ve-podmienky-a-poruenie-klznych-loisk>
- [18] DOLATABADI, A a kol, Effect of a cylindrical shroud on particle conditions in high velocity oxy-fuel (HVOF) spray process. In: *Journal of materials processing technology 137*. [online]. p. 214-224. 2003. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602010841>
- [19] DELLACORTE, C etc, Evaluation of Advanced Solid Lubricant Coatings for Foil Air Bearings Operating at 25° and 500°C In: *Tribology transactions 102*, [online]. p. 338-342. 2008. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402009908982226>
- [20] GRUJICIC, M. etc, Selection of the spraying technologies for over-coating of metal-stampings with thermo-plastics for use in direct-adhesion polymer metal hybrid load-bearing components. In: *Journal of materials processing technology 198*, [online]. p. 300-312. 2008. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360700684X>

- [21] An introduction to thermal spray. Oerlikon metco. [online]. Issue 5. October 2014. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/systems/>
- [22] KOIVULUOTO, Heli etc, High Pressure Cold Sprayed (HPCS) and Low Pressure Cold Sprayed (LPCS) Coatings Prepared from OFHC Cu Feedstock: Overview from Powder Characteristics to Coating Properties. In: *Journal of thermal spray technology 21*, [online]. p. 1065-1075. 2012. Dostupné z: http://www.researchgate.net/publication/257713893_High_Pressure_Cold_Sprayed_%28HPCS%29_and_Low_Pressure_Cold_Sprayed_%28LPCS%29_Coatings_Prepared_from_OFHC_Cu_Feedstock_Overview_from_Powder_Characteristics_to_Coating_Properties
- [23] *Gravity Feed vs Conventional Feed Spray Guns*. Autobodytoolmart. [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.autobodytoolmart.com/gravityvsconventionalfeed-t.aspx>
- [24] Stolové a podlahové lakovací kabiny s vodní clonou-Turbodynaclean Kovofiniš s.r.o. Leděč nad Sázavou. [online]. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.kovofinis.cz/souboryeditor/4cz.pdf>
- [25] Lakovací kabiny pro automobilový průmysl. STENG s.r.o. Praha. [online]. 2008. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.steng.cz/steng/lakovaci-kabiny-steng/pro-automobilovy-prusl/>
- [26] Stříkací kabiny kombinované. Lakovny Vomastek-LAVAMTECH s.r.o. Leděč nad Sázavou. [online]. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.lakovny-vomastek.cz/kombi.html>
- [27] Winday SX850WV. *High quality articulated robot arm for spraying and painting*. [online]. [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/high-quality-Articulated-robot-arm-for_60578315110.html
- [28] Application data. *N-methyl-2-pyrrolidone (NMP)*. LyondellBasel Industries Holdings, B. V. 2011. [online]. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <https://www.lyondellbasell.com/globalassets/documents/chemicals-technical-literature/lyondellbasell-chemicals-technical-literature-nmp-technical-datasheet-2313.pdf>
- [29] Spray gun-painting equipment. Meiji air compressor MFG. CO., Ltd. Yodivada-ku Osaka, Japan. [online]. [cit. 2015-03-25]. 110 s. Dostupné z: http://www.meiji-air.co.jp/e_home/html/gun/E_DiaphragmPaintPumps.htm
- [30] *Tlakové nádoby a stříkací pistole*. Stapak s.r.o. Staré Město. [online]. [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <http://www.stapak.cz/waltherpilot.html>
- [31] Automatic spray gun Lumina. Fuso Seiki CO., Ltd. Tokyo, Japan. [online]. [cit. 2017-05-15] 12 s. Dostupné z: <http://www.fusoseiki.co.jp/products/st-6-c8.html>

- [32] Automatic spray gun A11. Krautzberger GmbH. Eltvile am Rhein. Německo. [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.krautzberger.com/aoshow/cid=c92c9323882145655e500032f5280971/L=en>
- [33] Regulátory, úpravny vzduchu, ventily. Festo s.r.o. Praha. [online]. [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/products
- [34] Lineární jednotky MTV. Matis s.r.o. Brno. [online]. [cit. 2015-03-25]. 21 s. Dostupné z: <http://www.matis.cz/cs/produkt/mtv-s-pohonem-kulickov-sroubem>
- [35] Standard, X-Axis/Dovetail/Rack&Pinion/Rectangle/Low Profile. Misumi. [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/110302197330/>
- [36] HMI Power panel. B&R Automation. Eggelsberg, Rakousko. [online]. [cit. 2015-12-20]. Dostupné z: <http://www.br-automation.com/en/company/press-room/br-expanding-the-successful-power-panel-hmi-family/>
- [37] ČSN 60079, Elektrická zařízení pro výbušninu plynou atmosféru. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2010.
- [38] ČSN EN 12215, Bezpečnostní požadavky na lakovny a stříkací kabiny pro nanášení organických tekutých nátěrových hmot. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2010.
- [39] *Pointer-N-I*. Vyrtých a.s. Česká republika. [online]. [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: http://www.vyrtych.cz/Portals/0/download-2017/kat_listy/ks_cz/ks_cz_pointer-n.pdf

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

<i>PA6</i>	[-]	polyamide 6
<i>PVDF</i>	[-]	polyvinylidenfluorid
<i>UHMWPE</i>	[-]	vysoko pevnostní polyetylen
<i>PTFE</i>	[-]	teflon
<i>NiCr</i>	[-]	niklchrom
<i>ZrO₂</i>	[-]	oxid zirkoničitý (keramika)
<i>HVOF</i>	[-]	vysokorychlostní oxidační nástřik plamenem
<i>NMP</i>	[-]	rozpuštědlo methylpyrrolidon
v_{\max}	[mm · s ⁻¹]	maximální rychlost pohybu lineárních modulů
η	[Pa · s]	dynamická viskozita nastříkované polymerní směsi
h	[μm]	tloušťka nastříkované vrstvy kluzného laku
n_M	[min ⁻¹]	otáčky servomotoru
s	[mm]	stoupání pohybového šroubu
T_{L1}	[N · m]	kroučící moment od zátěže pro vertikální posuv
m_1	[kg]	hmotnost zátěže vertikálního modulu
g	[m · s ⁻²]	gravitační zrychlení
η_{ξ}	[-]	účinnost pohybového šroubu
μ	[-]	statický součinitel tření pohybového šroubu
F_P	[N]	předpětí pohybového šroubu
I_{Z1}	[kg · m ²]	moment setrvačnosti zátěže vertikálního posuvu
T_{A1}	[N · m]	kroučící moment od zátěže setrvačnými momenty
I_{ξ}	[kg · m ²]	moment setrvačnosti pohybového šroubu
t_M	[s]	čas pro dosažení maximální posuvové rychlosti
T_{MV}	[N · m]	kroučící moment servomotoru vertikálního modulu
k_1	[-]	návrhový součinitel
T_{L2}	[N · m]	kroučící moment od zátěže pro horizontální posuv
m_2	[kg]	hmotnost zátěže horizontálního modulu
I_{Z2}	[kg · m ²]	moment setrvačnosti zátěže horizontálního posuvu
T_{A2}	[N · m]	kroučící moment od zátěže setrvačnými momenty
$I_{\xi 2}$	[kg · m ²]	moment setrvačnosti pohybového šroubu
T_{MH}	[N · m]	kroučící moment servomotoru horizontálního modulu
k_2	[-]	návrhový součinitel
I_1	[kg · m ²]	moment setrvačnosti upínací desky
I_2	[kg · m ²]	moment setrvačnosti malé šablony
I_3	[kg · m ²]	moment setrvačnosti velké šablony
I_4	[kg · m ²]	moment setrvačnosti motoru a převodovky

I_{1C}	$[kg \cdot m^2]$	celkový moment setrvačnosti desky s malou šablonou
I_{2C}	$[kg \cdot m^2]$	celkový moment setrvačnosti desky s velkou šablonou
ε	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}]$	úhlové zrychlení
ϖ_1	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$	počáteční úhlová rychlost
ϖ_2	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$	koncová úhlová rychlost
t_1	[s]	počáteční čas
t_2	[s]	koncový čas
n_1	$[\text{min}^{-1}]$	počáteční otáčky desky
n_2	$[\text{min}^{-1}]$	požadované otáčky desky
M_3	$[\text{N} \cdot \text{m}]$	požadovaný kroutící moment motoru karuselové desky
P_3	[W]	požadovaný výkon motoru karuselové desky
η_P	[%]	účinnost převodovky
i	[-]	převodový poměr planetové převodovky
M_{K1}	$[\text{N} \cdot \text{m}]$	kroutící moment motoru
M_{K2}	$[\text{N} \cdot \text{m}]$	kroutící moment na výstupním hřídeli převodovky
F_O	[N]	obvodová síla
M_{K2}	$[\text{N} \cdot \text{m}]$	kroutící moment na výstupním hřídeli převodovky
d_H	[mm]	průměr výstupní hřídele převodovky
p	[MPa]	tlak mezi perem a nábojem
F_O	[N]	obvodová síla
t_1	[mm]	hloubka drážky pera v náboji
l	[mm]	délka pera
b	[mm]	šířka pera
p_D	[MPa]	dovolený tlak mezi perem a nábojem
k_3	[-]	součinitel pro jednosměrné, klidné zatížení
p_0	[MPa]	základní hodnota tlaku pro materiál EN AW-6061
f_1	[Hz]	max. provozní frekvence motorů lineárních modulů
f_2	[Hz]	max. provozní frekvence motoru karuselové desky

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Sestava klikového hřídele s ojnicemi a písty [3].	16
Obr. 2-2 Tvar pánví kluzného ložiska klikových hřídelů [4].	17
Obr. 2-3 Materiály a řazení vrstev motorových kluzných ložisek [2].	17
Obr. 2-4 Schéma vrstev bi a tri-metalového ložiska s babbítovým povlakem [6].	18
Obr. 2-5 Složení vrstev ložiska se stříbrným a babbítovým povlakem [9].	18
Obr. 2-6 Schéma vrstev bi-metalového ložiska s polymerním kluzným lakem [11].	19
Obr. 2-7 Řez ložiskem s polymerním kluzným lakem [15].	20
Obr. 2-8 Stribekova křivka a tloušťka mazacího filmu [17].	20
Obr. 2-9 Princip vysokorychlostního oxidačního nástřiku plamenem HVOF [20].	21
Obr. 2-10 Princip studeného nástřiku [20].	22
Obr. 2-11 Řez stříkáací pistolí [23].	23
Obr. 2-12 Princip elektrostatického nástřiku [20].	24
Obr. 2-13 Stolová stříkáací kabina [26].	25
Obr. 2-14 Schéma proudění vzduchu ve stříkáací kabině [26].	26
Obr. 2-15 Univerzální trojosé rameno pro stříkáací boxy [27].	26
Obr. 4-1 Schéma principu nástřiku laku na kruhová ložiska.	29
Obr. 4-2 Schéma principu nástřiku na lineární ložiska.	30
Obr. 4-3 Koncepční návrh zařízení se základními rozměry.	31
Obr. 4-4 Membránová pumpa firmy Meiji Co., typ PDP-05-SU [29].	32
Obr. 4-5 Tlakové nádoby MDG od firmy Walther-pilot [30].	33
Obr. 4-6 Stříkáací pistole Lumina ST-6-C8 [31].	33
Obr. 4-7 Stříkáací pistole WA 600 a prodloužení DV 80 [30].	34
Obr. 4-8 Stříkáací pistole Krautzberger A11 a detail trysky prodloužení [32].	34
Obr. 4-9 Pneumatické prvky firmy Festo [33].	35
Obr. 4-10 Krytovaný lineární modul MTV [34].	35
Obr. 4-11 Vozík Misumi XDTS90 [35].	36
Obr. 4-12 Dotykový display ATOM 7°C [36].	37
Obr. 4-13 Konstrukční varianta 1.	38
Obr. 4-14 3D pohled na variantu 1.	39
Obr. 4-15 Konstrukční varianta 2.	40
Obr. 4-16 3D pohled na variantu 2.	41
Obr. 4-17 Konstrukční varianta 3.	42
Obr. 4-18 3D pohled na variantu 3.	43
Obr. 5-1 Výsledné konstrukční řešení s rozměry a popisem hlavních částí.	44
Obr. 5-2 Pohled do stříkáací kabiny s popisem komponent.	45
Obr. 5-3 3D pohled na výsledné konstrukční řešení nástřikového zařízení.	46
Obr. 5-4 Rám zařízení.	47
Obr. 5-5 Okrajové podmínky deformačně-napěťové MKP analýzy rámu.	48
Obr. 5-6 Deformace rámu způsobené připojenými prvky.	49
Obr. 5-7 Nástřikový okruh s popisem jednotlivých komponent.	51
Obr. 5-8 Sestava lineárního vedení s popisem hlavních částí.	52
Obr. 5-9 Schéma a popis komponent vertikálního posuvu.	53
Obr. 5-10 Schéma a popis komponent horizontálního posuvu.	56
Obr. 5-11 Komponenty ručního přísuvu stříkáací pistole.	59
Obr. 5-12 Popis hlavních částí karuselové upínací desky a pohonu.	60
Obr. 5-13 Popis částí karuselové upínací desky.	60

Obr. 5-14	Popis hlavních částí poloviny upínací šablony pro kruhová ložiska.	64
Obr. 5-15	Složená šablona pro upínání ložisek.	65
Obr. 5-16	Schéma upínání šablon na karuselové desce – pohled shora.	65
Obr. 5-17	Zařízení při nástřiku na kruhová ložiska – boční pohled.	66
Obr. 5-18	Popis částí lineární upínací desky.	67
Obr. 5-19	Zařízení při nástřiku na lineární ložiska – boční pohled.	68
Obr. 5-20	Zkušební ostříkový terč.	68
Obr. 5-21	Přepážka při horní poloze lineárního vedení – boční a čelní pohled.	69
Obr. 5-22	Přepážka při dolní poloze lineárního vedení – boční a čelní pohled.	70
Obr. 5-23	Detail na průchod hadic stříkací pistole v desce.	70
Obr. 5-24	Proudění vzduchu ve stříkací kabině a bezpečnostní prvky.	71
Obr. 5-25	Obrazovka nastavení parametrů nástřiku na kruhová ložiska.	72
Obr. 5-26	Obrazovka nastavení parametrů nástřiku na lineární ložiska.	73
Obr. 5-27	Rozmístění ovládacích prvků na elektrickém rozvaděči.	74
Obr. 5-28	Okrajové podmínky modální analýzy nástřikového zařízení.	75
Obr. 5-29	Zobrazení prvních 4 rezonančních frekvencí zařízení – pohled zezadu.	77
Obr. 5-30	Zobrazení prvních 4 rezonančních frekvencí zařízení – pohled zepředu.	77
Obr. 5-31	Ložiska po provedení zkušebních nástřiků.	78
Obr. P-1	Původní zapojení nástřikového okruhu se dvěma tlakovými nádobami.	93
Obr. P-2	Výsledné zapojení nástřikového okruhu zařízení.	93
Obr. P-3	Detail sítě pro MKP analýzy.	94
Obr. P-4	Rezonanční frekvence nástřikového zařízení.	95
Obr. P-5	Fotografie nástřikového zařízení.	98

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 5-1 Finanční náklady na výrobu rámu.	46
Tab. 5-2 Hmotnosti komponent a definované zatížení pro MKP analýzu rámu.	48
Tab. 5-3 Výsledky deformačně-napěťové MKP analýzy rámu.	49
Tab. 5-4 Zvolené prvky nástřikového a pneumatického okruhu.	51
Tab. 5-5 Komponenty polohovacího systému.	52
Tab. 5-6 Komponenty vertikálního posuvu.	53
Tab. 5-7 Parametry zvoleného servomotoru pro vertikální posuv.	55
Tab. 5-8 Komponenty horizontálního posuvu.	56
Tab. 5-9 Parametry zvoleného servomotoru pro horizontální posuv.	58
Tab. 5-10 Komponenty ručního přísuvu.	58
Tab. 5-11 Komponenty karuselové upínací desky a pohonu.	59
Tab. 5-12 Parametry zvoleného motoru.	62
Tab. 5-13 Parametry zvolené převodovky.	62
Tab. 5-14 Části poloviny upínací šablony pro kruhová ložiska.	64
Tab. 5-15 Části lineární upínací desky.	67
Tab. 5-16 Definované zatížení pro modální analýzu.	75
Tab. 5-17 Vlastní frekvence nástřikového zařízení.	76

12 PŘÍLOHY

Příloha 1: Základní vlastnosti polymeru polyamid-imid [14].

General Description : Amorphous, strongly coloured, high performance polymers with linear predominantly aromatic molecules of high thermal stability. They are normally melt-processed but, after post-curing, are infusible in their fully finished form. If semi-fabricated items are machined, further post-curing is recommended if maximum properties are to be achieved. They have very good high temperature properties (approaching those of polyimides), good wear and radiation resistance, inherently low flammability and smoke emission and the highest strength of any unreinforced thermoplastic, but are very expensive and attacked by alkalis.

Applications include parts for internal combustion and jet engines, bearings and thrust washers and mechanical, electrical and electronic components.

Physical Properties

Density (g cm ⁻³)	1.42-1.46
Flammability	V0
Limiting oxygen index (%)	44-45
Radiation resistance	Good
Resistance to Ultra-violet	Good
Water absorption - equilibrium (%)	3-4
Water absorption - over 24 hours (%)	0.3

Thermal Properties

Coefficient of thermal expansion (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)	25-31
Heat-deflection temperature - 1.8MPa (C)	278-9
Lower working temperature (C)	=< -200
Specific heat (J K ⁻¹ kg ⁻¹)	1000
Thermal conductivity @23C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.26-0.54
Upper working temperature (C)	200-260

Mechanical Properties

Compressive strength (MPa)	170-220
Elongation at break (%)	7-15
Hardness - Rockwell	E72-86
Izod impact strength (J m ⁻¹)	60-140 - notched
Poisson's ratio	0.38
Tensile modulus (GPa)	4.5-6.8
Tensile strength (MPa)	110-190

Chemical Resistance

Acids - concentrated	Fair-Poor
Acids - dilute	Fair
Alcohols	Good-Poor
Alkalis	Poor
Aromatic hydrocarbons	Good
Greases and Oils	Good
Halogenated Hydrocarbons	Good-Poor
Halogens	Good-Poor
Ketones	Good

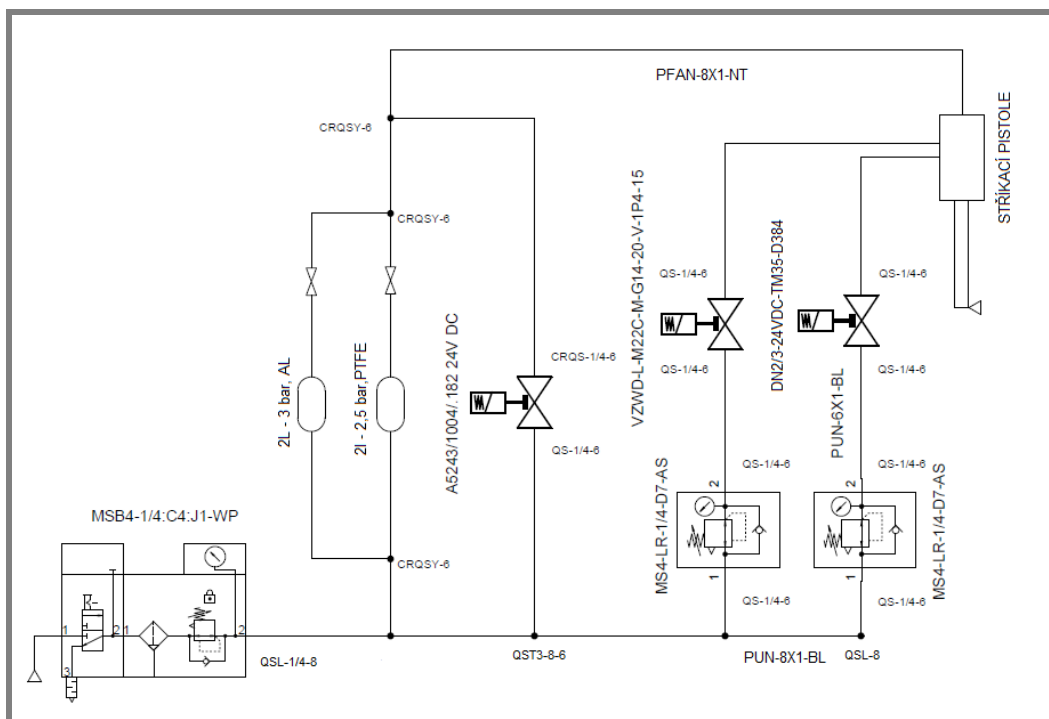
Electrical Properties

Dielectric constant @1MHz	3.9-5.4
Dielectric strength (kV mm ⁻¹)	23 at 1mm
Dissipation factor @ 1MHz	0.03-0.042
Surface resistivity (Ohm/sq)	8-50 x 10 ¹⁷
Volume resistivity (Ohmcm)	0.08-2 x 10 ¹⁷

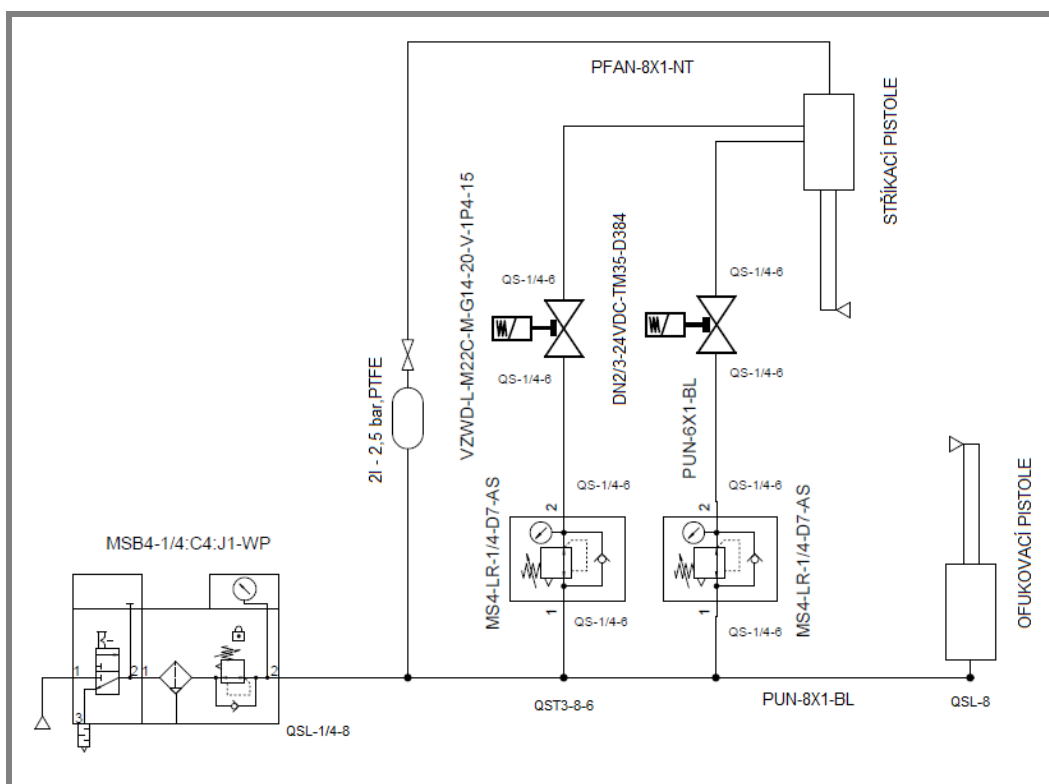
Příloha 2: Vlastnosti rozpouštědla methylpyrrolidon (NMP) [28].

Description	N-Methyl-2-Pyrrolidone (NMP) is a powerful, aprotic solvent with high solvency, and low volatility. This colorless, high boiling, high flash point and low vapor pressure liquid carries a mild amine-like odor. NMP has high chemical and thermal stability and is completely miscible with water at all temperatures. NMP can serve as a co-solvent with water, alcohols, glycol ethers, ketones, and aromatic/chlorinated hydrocarbons. NMP is both recyclable by distillation and readily biodegradable. NMP is not found on the Hazardous Air Pollutants (HAPs) list of the 1990 Clean Air Act Amendments.
Typical Properties	<ul style="list-style-type: none"> • Purity 99.8% minimum • Water 400 ppm maximum • Specific Gravity (25°C/4°C) 1.027 • Boiling Point (760 TORR) 202°C • Flash Point (SETA) 90°C • Color, APHA 40 maximum • Vapor Pressure (20°C) <0.3 mm Hg • Melting Point -25°C • CAS Number 872-50-4 <p>NMP is a versatile solvent for use in numerous applications including graffiti removal, automotive and industrial cleaning, water borne coatings, and photoresist stripping.</p> <p>Lyondell Chemical produces NMP in a proprietary process.</p>
Applications	<p>Electronics. NMP has been used in the electronics industry for many years as a photoresist stripper. Now, with the phase out of CFC's, NMP has gained widespread acceptance as a solvent in other electronic applications including semi-aqueous de-fluxing, degreasing, and coatings (polyamide, epoxy and polyurethane).</p> <p>Graffiti Removers. NMP-based graffiti removers combine high performance and biodegradability with low volatility and low flammability. NMP can be blended with glycol ethers or acetates such as Glycol Ether PMA, PEA, and DPMA; they are cost effective and improve performance on surfaces defaced by lipstick and crayon graffiti.</p> <p>Agricultural. The agricultural chemical industry takes advantage of NMP's solvency and handling properties in agricultural formulations.</p> <p>Consumer and Industrial Cleaners. NMP is an effective stripping agent used in floor stripping, oven cleaners, graffiti removers, and paint strippers. Due to its high solvency and low volatility, it is used in automotive and industrial cleaners with solvents such as hydrocarbons, terpenes, propylene carbonate and P-Series glycol ethers.</p> <p>Coatings Solvent. NMP is a powerful solvent for most commercial resins. Due to its high boiling point and excellent solvent power, NMP extends and improves the properties of high temperature bake coatings. For instance, high solid binders are more easily obtained with NMP as the solvent. Quite often, baked finishes yield coatings with outstanding mechanical and dielectric properties. NMP also aids rheological control: better flow and leveling -less cratering and pinholing. For these reasons, NMP has been shown to be highly effective in wire coating and other high temperature coating applications. NMP is also the preferred solvent for urethane dispersions and is an excellent coalescent for acrylic and styrene acrylic latexes.</p> <p>Petrochemical Processing. NMP has been shown to have a selective affinity for unsaturated hydrocarbons, aromatics and sulfur-bearing gases. Due to its relative non-reactivity and high solvency, NMP finds wide applicability as an extraction solvent in lube oil processing as well as in natural and synthetic gas purification's.</p> <p>Miscellaneous Solvent Applications. The excellent thermal and chemical stability of NMP enhances its utility as a solvent or co-solvent in many synthetic reaction systems. NMP shows selective affinity for unsaturated hydrocarbons, aromatics, and sulfur compounds. NMP can serve as a co-solvent with water, aromatic/chlorinated hydrocarbons, alcohols, glycol ethers, and ketones.</p>
Storage and Handling	NMP is hygroscopic (picks up moisture) but stable under normal conditions. It will violently react with strong oxidizers such as hydrogen peroxide, nitric acid, sulfuric acid, etc. The primary decomposition products produce carbon monoxide and nitrogen oxide fumes. Excessive exposure or spillage should be avoided as a matter of good practice. Lyondell Chemical Company recommends wearing butyl gloves when using NMP. NMP should be stored in clean, phenolic-lined mild steel or alloy drums. Teflon® ¹ and Kalrez® ¹ have been shown to be suitable gasket materials. Please review MSDS prior to handling.

Příloha 3: Pneumatické schéma zapojení nástřikového okruhu.

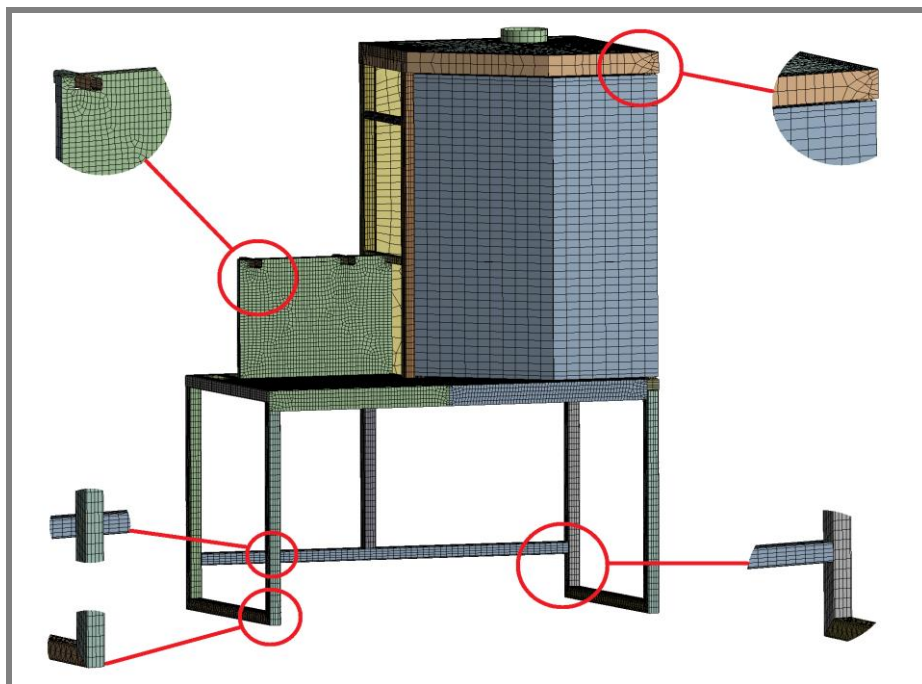


Obr. P-1 Původní zapojení nástřikového okruhu se dvěma tlakovými nádobami.

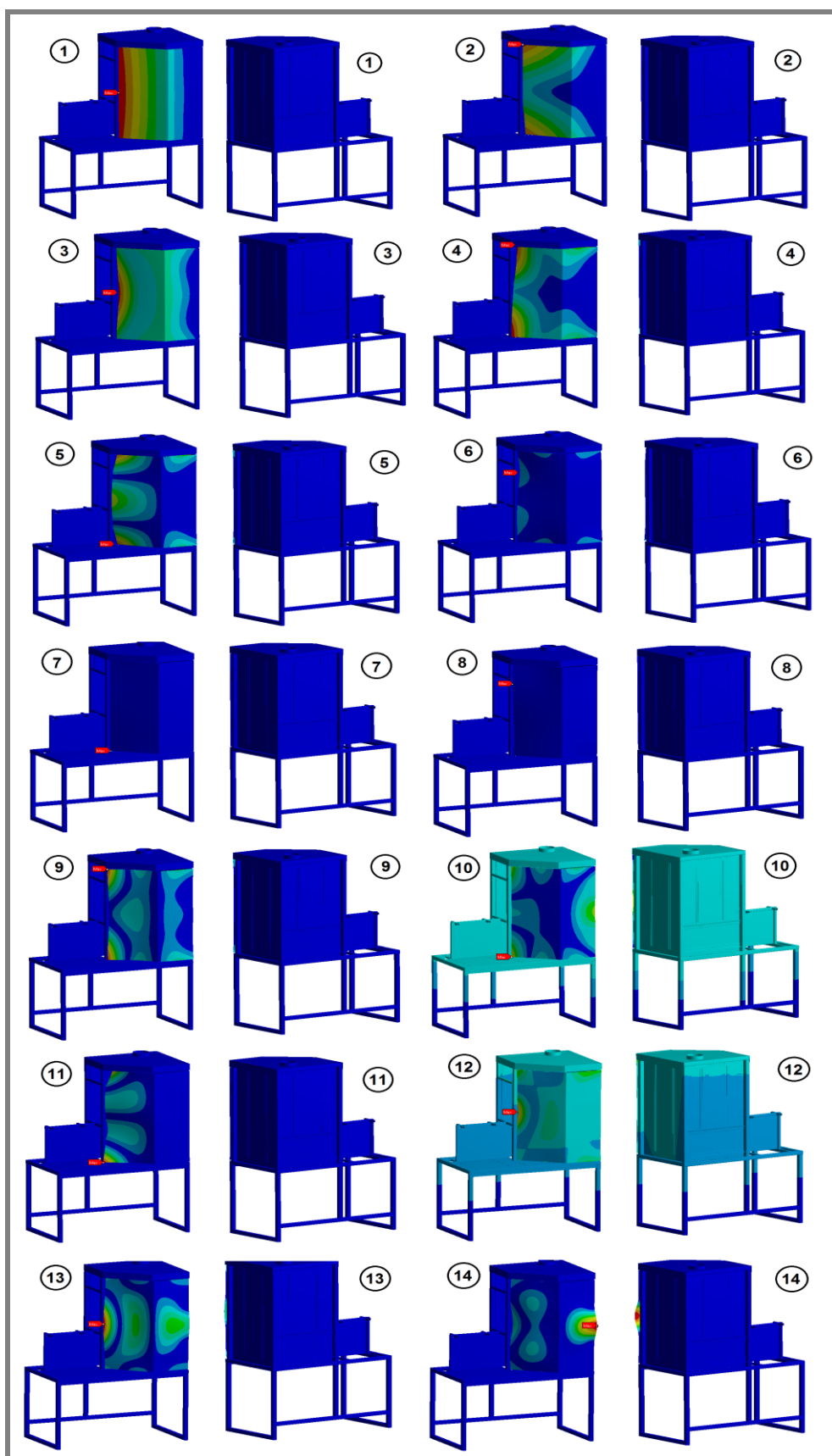


Obr. P-2 Výsledné zapojení nástřikového okruhu zařízení.

Příloha 4: Nastavené parametry MKP výpočtů a výsledky modální analýzy.



Obr. P-3 Detail sítě pro MKP analýzy.



Obr. P-4 Rezonanční frekvence nástřikového zařízení.

Příloha 5: Seznam výkresové dokumentace.

Číslo výkresu	Název	Číslo výkresu	Název
00-01-A0-00	nástříkové zařízení	04-01-A4-05	dveře-plech
01-01-A2-00	sestava rámu	04-01-A4-06	dveře-guma
01-01-A2-01-A	rám s krytováním	04-01-A4-06	dveře-guma rovná
01-01-A1-01	svařenec rámu	04-02-A2-00	bezrámové dveře-pl.sest.
01-01-A0-02	svařenec stůl	04-02-A2-01	bezrámové dveře-pl
01-01-A0-03	svařenec kabina	04-02-A2-02	dveře-plechové-přední
01-01-A2-04	svařenec-rozvaděč	04-02-A3-03	dveře plechové-výztuha
01-01-A3-05	svařenec-vedení	04-02-A4-04	dveře plechové-výztuha 2
01-01-A0-06	obrobený rám	04-02-A4-05	dveře plechové-plech
01-02-A4-01	profily 40x40x2	04-02-A4-06	dveře plechové-guma
01-02-A3-02	profily 40x40x2	04-02-A4-07	dveře plechové-plech
01-02-A3-03	profily 40x40x2	04-02-A4-08	dveře plechové-průzor
01-02-A4-04	profily 25x25x2	04-02-A3-09	dveře plechové-vzpěra 1
01-02-A4-05	profily 25x25x2	04-02-A3-10	dveře plechové-vzpěra 2
01-02-A4-06	profily L 40x40x3	04-02-A3-11	dveře plechové-vzpěra 3
01-02-A4-07	profily L 30x30x3	04-02-A4-12	dosedací kostka
01-02-A4-08	profil 40x20x2	04-02-A4-13	doraz dveří
01-03-A3-01	profil 1	05-01-A3-01	karusel-pohon sestava
01-03-A3-02	profil 2	05-01-A3-02	karusel-up.deska sestava
01-03-A4-03	profil 3	05-01-A3-03	karusel upínací deska
01-03-A4-04	profil 4	05-01-A3-04	karusel-příruba-převod.
01-03-A4-05	profil 5	05-01-A3-05	karusel příruba-motor
01-03-A4-06	profil 6	05-01-A4-06	karusel-palec otáček
01-03-A4-07	profil 7	05-01-A4-07	karusel-držák snímače
01-03-A4-08	profil 8	06-01-A3-00	karusel-šablona 1
01-03-A3-09	profil 9	06-01-A3-01	karusel-šablona 1-pol.
01-03-A3-10	profil 10	06-01-A3-02	karusel 1-kostka spodní
01-03-A4-11	profil 11	06-01-A4-03	karusel 1 plech
01-03-A3-12	profil 12	06-01-A4-04	karusel 1-plech malý
01-03-A4-13	profil 13	06-01-A4-05	karusel 1-tyč
01-03-A4-14	profil 14	06-01-A3-06	karusel 1-kostka horní
01-03-A4-15	profil 15	06-01-A4-07	karusel-šablona 1-upínka
01-03-A4-16	profil 16	06-01-A4-08	karusel-příložka
01-03-A4-17	profil 17	06-01-A4-09	karusel-destička proti otáčení
01-03-A4-18	profil 18	07-01-A3-00	karusel-šablona 2
01-03-A3-19	profil 19	07-01-A3-01	karusel-šablona 2-polovina
01-03-A3-20	profil 20	07-01-A2-02	karusel 2-kostka spodní
01-03-A3-21	profil 21	07-01-A4-03	karusel 2-plech
01-03-A3-22	profil 22	07-01-A4-04	karusel 2-tyč
01-03-A3-23	profil 23	07-01-A3-05	karusel -horní kostka
01-03-A4-24	profil 24	07-01-A4-06	karusel-šablona 2-upínka
01-03-A4-25	profil 25	07-01-A4-07	karusel-destička proti otáčení
01-03-A4-26	profil 26	08-01-A2-00	upínací deska-sestava
01-03-A3-27	profil 27	08-01-A3-01	upínací deska
01-03-A3-28	profil 28	08-01-A4-02	upínací deska-kostka deska
01-03-A4-29	profil 29	08-01-A4-03	upínací deska-kostka rám

01-03-A4-30	profil 30	08-01-A4-04	upínací deska-s drážkou
01-03-A3-31	profil 31	09-00-A2-00	lineární vedení-sestava
01-03-A4-32	profil 32	09-01-A2-00	lineární vedení-svislé-sestava
01-03-A3-33	profil 33	09-01-A3-01	lineární vedení-příruba NL208TR
01-03-A4-34	profil 34	09-01-A3-01-A	lineární vedení-příruba NL208TR-u
01-03-A4-35	profil 35	09-01-A4-02	lin. Vedení-kryt rolny-svislý
01-03-A4-36	profil 36	09-01-A4-03	lineární vedení-L80x40x4-úchyt
01-03-A4-37	profil 37	09-01-A3-04	lineární vedení-příruba sq3
01-03-A4-38	profil 38	09-01-A4-05	upínací deska stolku
01-03-A4-39	profil 39	09-01-A4-05-A	upínací deska stolku-prodloužená
01-03-A4-40	profil 40	09-01-A4-06	úchyt snímače-vertikální vedení
01-03-A4-41	profil 41	09-01-A4-07	příruba pod servomotor
01-03-A3-42	deska karuselu	09-01-A4-08	úchyt snímače-horizont.
02-00-A3-03	plech boční-svarek	09-02-A2-00	lineární vedení-podélné-sestava
02-00-A3-04	plech zadní-svarek	09-02-A3-01	lineární vedení-příruba NL106TR
02-00-A4-A1	c-profil-(950)	09-02-A3-01-A	lineární vedení-příruba NL106TRu
02-00-A4-A1	c-profil-(650)	09-02-A4-02	lin. vedení-kryt rolny-podélný
02-01-A2-01	plech-spodní levý	09-02-A4-03	lineární vedení-deska řetěz
02-01-A2-02	plech-spodní pravý	09-02-A4-04	lineární vedení-L50x25x3-úchyt
02-01-A2-03	plech boční pravý	09-02-A4-05	úchyt řetězu
02-01-A2-04	plech zadní	09-02-A4-06	příruba měchu
02-01-A2-05	plech přepážka	09-02-A4-07	jehla dorazu horizontální
02-00-A2-05	plech-přepážka šest.	09-02-A4-08	jehla dorazu vertikální
02-00-A2-05-A	sestava přepážky-rev. A	10-01-A3-01	přepážka-plech pohyblivý
02-01-A2-05-A	plech-přepážka-rev. A	11-01-A3-00	sestava trysky
02-01-A4-05-A1	plech přepážka-měchy	11-02-A3-00	upínání trysky-L profil
02-01-A2-06	plech-přepážka-víko	11-02-A4-01	tryska-upínání L
02-01-A4-07	plech--záslepka	11-03-A4-00	upínání trysky 2 polohové - šest.
02-01-A4-08	plech--záslepka 2	11-03-A4-01	upínání trysky 2 polohové - deska
03-00-A3-00	digestoř s těsněním	11-03-A4-02	upínání trysky 2 polohové - zákl.
03-01-A2-00	digestoř	11-03-A4-03	upínání trysky 2 polohové - doraz
03-01-A3-01	digestoř vrch	12-01-A3-00	plech-ostřikovaci-svařenec
03-01-A3-02	digestoř plášť	12-01-A3-01	plech-ostřikovací
03-01-A3-03	digestoř komín	12-01-A3-02	Plech ostřikovací-úchyt-elko
03-01-A3-04	digestoř plech malý	13-01-A3-01	měch-přepážka
03-01-A3-05	digestoř plech velký	13-01-A3-02	měch-lin.vedení-vertikální
04-01-A2-00	bezrámové dveře	13-01-A3-03	měch-lin.vedení-horizontální
04-01-A2-01	bezrámové dveře-lep.	14-01-A3-01	rozvaděč
04-01-A3-02	dveře-přední část celá	15-01-A4-01	vložka enkodéru
04-01-A3-04	dveře-výztuha	16-01-A3-00	upínací přípravek-sestava
04-01-A4-02	dveře-malé sklo	16-01-A3-01	upínací př.-základní deska
04-01-A4-03	dveře-velké sklo	16-01-A3-02	upínací př.-pohyblivá deska
		16-01-A4-03	upínací př.-madlo

Pozn.: Výkresy: 00-01-A0-00 – Sestava nástřikového zařízení

01-01-A1-01 – Svařenec rámu

05-01-A3-01 – Karusel – pohon, sestava

05-01-A3-02 – Karusel – upínací deska, sestava

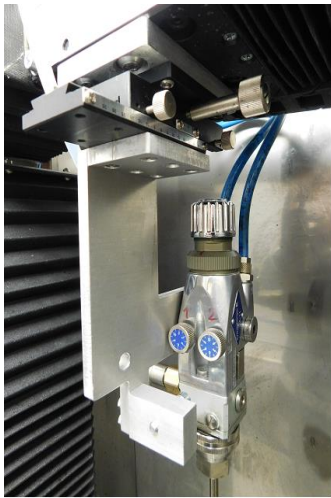
06-01-A3-00 – Karusel – šablona 1

09-00-A2-00 – Lineární vedení, sestava

jsou pro účely obhajoby diplomové práce přiloženy v tištěné formě.

Ostatní výkresy jsou odevzdány pouze v elektronické podobě.

Příloha 6: Fotografická dokumentace hotového zařízení.



Detail upínače stříkací pistole



Pohled do stříkací kabiny



Nástřikové zařízení



Detail přepážky pro oddělení elektrických součástí



Polovina upínací šablony



Upínací šablona

Obr. P-5 Fotografie nástřikového zařízení.