



# Nástrojová hlava pro frézku na výrobu desek plošných spojů

## Diplomová práce

*Studijní program:*

N2301 Strojní inženýrství

*Studijní obor:*

Konstrukce strojů a zařízení

*Autor práce:*

**Bc. Stanislav Aleshin**

*Vedoucí práce:*

Ing. Michal Moučka, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace





## Zadání diplomové práce

# Nástrojová hlava pro frézku na výrobu desek plošných spojů

*Jméno a příjmení:* **Bc. Stanislav Aleshin**  
*Osobní číslo:* S18000240  
*Studijní program:* N2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Konstrukce strojů a zařízení  
*Zadávací katedra:* Katedra výrobních systémů a automatizace  
*Akademický rok:* 2020/2021

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se se způsobem výroby desek plošných spojů technologií třískového obrábění.
2. Analyzujte konstrukci hlavy frézky LPKF Protomat E33, kterou katedra disponuje.
3. Navrhněte konstrukci nástrojové hlavy se zpětnovazebním řízením její vzdálenosti od obráběného materiálu tak, aby byla dosahována požadovaná hloubka vrtu v případě vrtání a požadovaná šířka izolačního kanálu v případě frézování. To stávající frézka neumožňuje. Zamyslete se také nad možností řízení otáček nástroje. V návrhu zohledněte požadavek na automatickou výměnu a identifikace nástroje, odsávání odebraného materiálu.
4. Specifikujte vhodné automatizační prostředky – motory, senzory, řídicí elektroniku atd. Výběr konzultujte s vedoucím diplomové práce.
5. Návrh namodelujte a vypracujte nezbytnou výkresovou dokumentaci.
6. V případě, že budou dostupné finanční a časové prostředky návrh zrealizujte.



*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

dle potřeby  
cca 45 stran plus přílohy  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] CHVÁLA B., NEDBAL J., DUNAY G. Automatizace. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00090-4.  
[2] KLOBOUČEK J. Snímače v průmyslu (skriptum). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-828-1.  
[3] MAREK J. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM Publishing, 2014. ISBN 978-80-260-6780-1.

*Vedoucí práce:*

Ing. Michal Moučka, Ph.D.  
Katedra výrobních systémů a automatizace

*Datum zadání práce:*

17. června 2021

*Předpokládaný termín odevzdání:* 17. prosince 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

L.S.

Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 17. června 2021

## Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

18. května 2022

Bc. Stanislav Aleshin

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu této diplomové práce panu doktoru Michalovi Moučkovi za vedení mé práce, a především za cenné rady, které mi během psaní této diplomové práce velmi pomohly. Pan doktor Moučka mi vždy vyšel vstříc, a to i v čase jeho osobního volna. Dále bych rád poděkoval své rodině a svým přátelům, kteří mi také pomáhali a podporovali mě.

Tato práce byla (částečně) podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci v rámci projektu Optimalizace v oblasti výrobních systémů, 3D technologií a automatizace č. SGS-2019-5011.

**TÉMA:** **NÁSTROJOVÁ HLAVA PRO FRÉZKU NA VÝROBU DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ**

**ANOTACE:** Diplomová práce se zabývá návrhem nástrojové hlavy pro frézku na výrobu desek plošných spojů (DPS) s automatickou výměnou nástroje (AVN) a řízením její vzdálenosti od obrobeneho materiálu. V první části se tato práce věnuje teorii desek plošných spojů, jejich konstrukci, materiálům, metodám výroby, existujícím řešením na trhu a servopohony. První polovina praktické části je věnována krátkému rozboru aktuálně využívané frézovací hlavy a následnému konstrukčnímu návrhu nové frézovací hlavy pro frézku LPKF ProtoMat E33, kterou disponuje katedra Technické univerzity v Liberci. Druhá polovina praktické části se věnuje návrhu zásobníku nástrojů a automatické výměnné nástrojů.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** desky plošných spojů, automatická výměna nástrojů, třískové obrábění, fréza.

**THEME:** **TOOL HEAD OF A MILLING MACHINE FOR PRINTED CIRCUIT BOARD**

**ABSTRACT:** This master thesis deals with a tool head design of a milling machine for printed circuit boards (PCB) with automatic tool change (ATC) and control of its distance to the machining materials. The first part focuses on the theoretical framework related to the printed circuit boards (PCB), specifically, their construction, production methods, existing solutions in the market, and servomotors. The first half of the practical part contains a brief analysis of the currently used tool head and subsequent new design of a milling for the LPKF ProtoMat E33 benchtop milling machine, which is available in the department of the Technical University in Liberec. The second half of the practical part suggests the design of the tool magazine and automatic tool change.

**KEY WORDS:** printed circuit boards, automatic tool change, machining, milling machine.

**POČET STRAN:** 83

**POČET PŘÍLOH:** 38

**POČET OBRÁZKŮ:** 55

## Obsah

I	Teoretická část.....	16
1	Úvod.....	16
2	Desky plošných spojů.....	17
2.1	Rozdělení DPS dle konstrukce .....	18
2.1.1	Ohebné DPS .....	18
2.2	Neohebné desky .....	18
2.2.1	Jednovrstvé DPS.....	18
2.2.2	Dvouvrstvé DPS .....	19
2.2.3	Vícevrstvé DPS .....	19
3	Základní materiály DPS .....	20
3.1	Organicky základní materiál .....	20
3.2	Kompozitní základní materiály.....	21
3.3	Anorganické základní materiály .....	21
3.3.1	Keramické materiály.....	21
4	Metody výroby DPS.....	23
4.1	Subtraktivní technologie .....	23
4.2	Aditivní technologie .....	23
4.3	Semiaditivní technologie .....	23
5	Řešení existující na trhu .....	24
5.1	Třískové obrábění .....	24
5.2	Vytváření vodivých struktur pomocí laseru.....	25
5.2.1	LPKF – LDS®.....	25
5.2.2	ADDIMID .....	27
5.2.3	MIPTEC .....	27
5.3	Vytváření struktur pomocí tisku .....	28

5.3.1	Aerozol-Jet® .....	28
5.3.2	Inkjet .....	30
5.4	Vytváření vodivých cest pomocí plazmy .....	31
5.4.1	Flamecon® .....	31
5.4.2	Plasmadust® .....	32
5.5	Použitá metoda výroby DPS .....	33
6	Servopohony .....	34
6.1	Rozdělení servopohonů podle funkce .....	34
6.2	Rozdělení servopohonů dle typu použitého motoru .....	34
II.	Praktická část .....	36
	Frézovací hlava .....	36
7	Analýza současně používané nástrojové hlavy .....	36
8	Postup při návrhu nové nástrojové hlavy .....	38
9	Volba servopohonu .....	39
10	Nalisování hřídele .....	41
10.1	Výpočet nalisovaného spoje a okrajových podmínek .....	41
11	Ložiska .....	46
11.1	Určení řezné síly .....	46
11.2	Určení optimální vzdálenosti ložisek .....	50
11.3	Kontrola životnosti ložisek .....	55
12	Upínací mechanismus .....	57
13	Rotační a odměřovací mechanismus .....	62
14	Posuvný mechanismus .....	64
15	Přítlačný mechanismus s odsávacím zařízením .....	65
16	Výsledný návrh frézovací hlavy .....	66
	Automatická výměna nástrojů .....	67
17	Automatická výměna nástrojů .....	67

17.1	Nosné zásobníky .....	68
17.2	Skladovací zásobníky .....	68
17.3	Návrhy konstrukčního řešení zásobníku nástrojů .....	69
	Lištový zásobník nástrojů.....	69
	Rotační zásobník nástrojů .....	70
	Lineární zásobník nástrojů .....	71
	Řetězový zásobník nástrojů.....	72
III.	Finální návrh sestavy.....	76
	Závěr.....	77
	Bibliografie.....	79

## Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Technologie pájení PHT [1].....	17
Obr. 2: Technologie pájení SMT [1] .....	17
Obr. 3: Ohebné plošné spoje [3].....	18
Obr. 4: Jednovrstvé plošné spoje [3] .....	18
Obr. 5: Dvouvrstvé plošné spoje [3].....	19
Obr. 6: Vícevrstvé plošné spoje [3].....	19
Obr. 7: Typy používaných vrtáků a fréz [14] .....	25
Obr. 8: Rozdělení aktuálně používaných materiálů [18].....	25
Obr. 9: Aditivní aktivace povrchu laserem [18].....	26
Obr. 10: Proces vytvoření vodivé cesty technologií ADDIMID - bez vrstvy SiO <sub>2</sub> , platí i pro LPKF-LDS® [19].....	27
Obr. 11: Možností výroby vodivých cest technologií MIPTEC [21].....	28
Obr. 12: Technologie Aerosol-Jet® s pneumatickým a ultrazvukovým atomizérem [24] .	29
Obr. 13: Kontinuální Inkjet a pulzní Inkjet [17].....	30
Obr. 14: Ukázka principu systému Inkjet využívající metodu řízeného dávkování inkoustu a) tepelný aktuátor b) piezoelektrický aktuátor [22] .....	31
Obr. 15: Princip technologie Plasmadust® [17].....	32
Obr. 16: Hlava frézky LPKF ProtoMat E33 [28] .....	36
Obr. 17: Technická specifikace LPKF ProtoMat E33 [28] .....	37
Obr. 18: Faulhaber Series 2264 024 BP4 [49] .....	39
Obr. 19: Charakteristika servopohonu Faulhaber Series 2264 024 BP4 [49] .....	40
Obr. 20: Funkční rozměry hřídele v místě nalisování .....	42
Obr. 21: Průběhy napětí v hřídeli a náboji po nalisování [30] .....	42
Obr. 22: Tolerance jmenovitých průměrů součástí spojených nalisováním [30].....	44
Obr. 23: Stržení povrchových nerovností při podélném lisování (za studena) [29].....	45
Obr. 24: Spirálový vrták s průměrem 3 mm [52] .....	47
Obr. 25: Stopková fréza s průměrem 2 mm [52].....	47
Obr. 26: Výpočtový model vřetene [32].....	51
Obr. 27: Průhyb vřetene zatíženého silou F za předpokladu, že ložiska jsou tuhá [32].....	51
Obr. 28: Průhyb vřetene za předpokladu, že ložiska jsou poddajná a vřeteno tuhé [32] ....	53
Obr. 29: Schéma výpočtu reakcí v ložiskách .....	55



Obr. 30: Silové a momentové poměry svěrného spoje s kuželovou stykovou plochou při montáži [30].....	57
Obr. 31: Talířová pružina číslo DIN 2093 [33] .....	59
Obr. 32: Výpočtová tabulka pro návrh s použitím talířových pružin [57] .....	59
Obr. 33: Parametry tlačné pružiny Sodemann C08500851750S [56] .....	60
Obr. 34: Tremba HMA-2622d.002-24VDC [34] .....	61
Obr. 35: Upínací mechanismus v řezu: 1 – Zdvihací elektromagnet, 2 – tlačná pružina – 1 ks .....	61
Obr. 36: Sensor OD-Mini B100C50114 [36] .....	62
Obr. 37: Držák na laser SICK.....	62
Obr. 38: Rotační a odměřovací mechanismus .....	63
Obr. 39: ST2018L0804-B Stepper motor NEMA 8 [35] .....	63
Obr. 40: CNC lineární pohon s krokovým motorem [40] .....	64
Obr. 41: Posuvná páka přivařená k tubusu .....	64
Obr. 42: Přítlačný mechanismus:1 – Tělo přítlačného mechanismu, 2 – Naváděcí prvek, 3 – Stabilizační kolík, 4 - Přítlačná deska, 5 – Odsávací zařízení, 6 - Tlačná pružina od společnosti Sodemann [44].....	65
Obr. 43: Odsávací zařízení v detailu .....	65
Obr. 44: Vlastní návrh hlavy s AVN a odměřováním vzdálenosti v reálném čase .....	66
Obr. 45: Rozdělení typů zásobníků z hlediska přenosu sil a výměny nástroje [25].....	67
Obr. 46: Lištový zásobník nástrojů.....	70
Obr. 47: Rotační zásobník nástrojů .....	71
Obr. 48: Lineární zásobník nástrojů .....	72
Obr. 49: Zásobník nástrojů s funkcí AVN.....	72
Obr. 50: Zásobník nástrojů s funkcí AVN bez horního krytu s vyznačenými montážními body. ....	73
Obr. 51: Konstrukce posuvného mechanismu:1- Ozubené kolo, 2 - Ložisko, 3 - Držák motoru, 4 - Krokový motor,.....	74
Obr. 52: Indukční čidlo.[46] .....	74
Obr. 53: Hallova sonda [48] .....	75
Obr. 54: Sestava frézovací hlavy a zásobníku s funkcí AVN .....	76
Obr. 55: Sestava frézovací hlavy a zásobníku s funkcí AVN bez horního krytu .....	76

## Seznam tabulek

Tab. 1: Přibližné hodnoty součinitele tření $f$ za klidu pro nalisovaný spoj [29].....	41
Tab. 2: Doporučený koeficient bezpečnosti pro tažné materiály založený na mezi kluzu. [43] .....	41
Tab. 3: Doporučené hodnoty středních aritmetických odchylek $R_a$ [29] .....	45
Tab. 4.: Parametry potřebné pro výpočet řezných sil .....	48
Tab. 5: Parametry ložiska typu S71906 ACE/P4A, potřebné pro výpočet optimální vzdálenosti ložisek [39].....	52
Tab. 6: Hodnoty deformace ložisek a vřetene, jejich součet v závislosti na vzdálenosti ložisek .....	54
Tab. 7: Parametry potřebné pro výpočet svěrného spoje.....	57
Tab. 8.: Talířové pružiny DIN 2093 [33] .....	59

## Seznam grafů

Graf. 1: Závislost deformace vřetene na vzdálenosti ložisek .....	54
---	----

## Seznam použitých veličin

$\Delta d_I^I$	Pružná deformace	[ $\mu\text{m}$ ]
$\Delta d_I^{II}$	Pružná deformace	[ $\mu\text{m}$ ]
$r_{1p}$	Průměr nalisování	[mm]
$\varepsilon_a$	Součinitel trvání záběru	[-]
$\sigma_{Dt}$	Dovolené napětí	[MPa]
$\tau_s$	Smykové napětí	[MPa]
$\Delta d_{\max}$	Maximální přesah	[mm]
$\Delta d_{\min}$	Minimální přesah	[mm]
$\mu$	Poissonovo konstanta	[-]
$A$	Integrační konstanta	[-]
$a_e$	Šířka záběru	[mm]
$a_p$	Hloubka záběru	[mm]
$B$	Integrační konstanta	[-]
$C$	Dynamická únosnost	[N]
$D, d$	Průměr řezné části nástroje	[mm]
$d_e$	Průměr vnější části	[mm]
$d_p$	Průměr kontaktní části	[mm]
$d_{p1}$	Průměr širší části kužele	[mm]
$d_{p2}$	Průměr užší části kužele	[mm]
$d_{ps}$	Střední průměr kužele	[mm]
$D_w$	Průměr valivého elementu	[mm]
$E$	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
$f$	Součinitel tření	[-]
$F_c$	Řezná síla	[N]
$F_L$	Lisovací síla při nalisování hřídele	[N]
$F_{M1}$	Síla ve stykové ploše	[N]
$F_{M2}$	Síla ve stykové ploše	[N]
$f_n$	Posuv na otáčku	[mm]
$F_r$	Zatížení ložiska v radiálním směru	[N]
$h$	Střední tloušťka třísky při vrtání	[mm]
$h_m$	Střední tloušťka třísky při frézování	[mm]
$i$	Počet řad valivých tělísek	[-]

$I_{1,2}$	Kvadratický moment	[cm <sup>4</sup> ]
$k_c$	Řezný odpor	[MPa]
$k_{c1.1}$	Měrný řezný odpor	[N/mm <sup>2</sup> ]
$k_w$	Koeficient bezpečnosti	[-]
$l$	Délka kužele	[m]
$L, l$	Délka	[mm]
$L_{h10}$	Životnost ložisek	[hod]
$m_c$	Nárůst měrné řezné síly	[-]
$M_k$	Krouticí moment	[Nm]
$n$	Otáčky	[ot/min]
$P_C$	Potřebný výkon při vrtání	[W]
$P_M$	Potřebný výkon při frézování	[W]
$p_{max}$	Potřebný maximální tlak	[MPa]
$p_{min}$	Potřebný minimální tlak	[MPa]
$Q$	Rychlost úběru materiálu při vrtání	[cm <sup>3</sup> /min]
$Q_{a,b}$	Sily v ložiskách A a B na valivý element	[N]
$R_{a,b}$	Sily v ložiskách A a B dle vzdáleností	[N]
$R_e$	Mez kluzu	[MPa]
$R_m$	Maximální pevnost v tahu	[MPa]
$S_z$	Posuv na zub	[mm]
$V_c$	Řezná rychlost	[m/min]
$V_f$	Rychlost posuvu při frézování	[m/min]
$w$	Minimální výrobní přesah	[μm]
$y_{a,b}$	Pružná deformace	[μm]
$y_c$	Optimální vzdálenost ložisek	[μm]
$y_N$	Deformace vřetene	[μm]
$y_p$	Deformace ložisek	[μm]
$z$	Počet valivých tělísek v jedné řadě	[-]
$Z$	Počet zubů	[-]
$\alpha$	Úhel styku ložiska	[°]
$\gamma$	Úhel kužele	[°]
$\kappa$	Úhel řezné části	[°]
$\sigma_r$	Radiální napětí	[MPa]
$\sigma_t$	Tečné napětí	[MPa]

## Seznam použitých zkratk

ATC	Automatic Tool Change
AVN	Automatická výměna nástrojů
CEM	Composite Epoxy Materials
CIJ	Kontinuální Inkjet
CNC	Computer Numerical Control
DoD	Pulzní Inkjet
DPS	Desky plošných spojů
FR	Fire Retardent
IR	Infračervené záření
LDS	Laser Direct Structuring
LED	Light-Emitting Diode
MID	Molded Interconnect Devices
Nd:YAG	Yttrium Aluminium Granátu, obohacený ionty neodymu
NEMA	National Electrical Manufactures Association
PA	Pneumatický atomizér
PCB	Printed Circuit Boards
PHT	Plated-Through Holes
PPA	Polyphthalamide
RTC	Robotic Tool Change
S	Shutter
SMT	Surface Mount Technology
T	Tryska
UA	Ultrazvukový atomizér
UV	Ultrafialové záření
VI	Virtuální Impactor
ZM	Základní materiál

# I Teoretická část

## 1 Úvod

Žijeme v době, ve které je náš každodenní život úzce spjat s moderními technologiemi a život bez nich, by pro nás byl již velmi nekomfortní a komplikovaný. Lidé, kteří žili před sto lety, si technologie dnešní doby ani nedovedli představit, což svědčí o neuvěřitelně rychlém vývoji. Elektronické přístroje nás obklopují naprosto všude. Doma, v autě, v práci a zkrátka jsou neodmyslitelnou součástí našeho života. Různá zařízení a jednotky jsou unikátní, nicméně mají jeden důležitý a společný základ a tím jsou desky plošných spojů neboli DPS. DPS jsou základním prvkem pro každý elektronický přístroj, protože díky nim můžeme vytvářet nové elektronické prvky. Na trhu existuje mnoho různých způsobů výroby DPS, které jsou také dále rozvedeny v této práci. Samotná výroba DPS je velmi náročná, jelikož musí být splněna řada vlastností ať už elektrických, mechanických nebo tepelných.

Hlavním cílem této diplomové práce je konstrukční návrh nástrojové hlavy s automatickou výměnou nástroje. Součástí tohoto návrhu je také systém odměřování skutečné vzdálenosti nástroje od povrchu obráběného materiálu, a to v reálném čase. Součástí tohoto návrhu je také systém pro odvod třísky, která při procesu obrábění vzniká. Celý konstrukční návrh by měl zároveň splňovat rozumnou ekonomickou náročnost, oproti existujícím řešením na trhu. Součástí této práce je také obecná teoretická rešerše na téma možností výroby DPS:

## 2 Desky plošných spojů

Desky plošných spojů (DPS, anglicky Printed Circuit Board – PCB), jsou základem všech elektronických přístrojů a jsou určeny k osazení elektronických komponent. Samotná deska je vyrobena z elektroizolačního materiálu nebo sklolaminátu s měděnými elektrickými spoji (cestami) a pájecími body, které jsou určeny pro montáž součástek. Vodivé cesty v DPS jsou vytvořeny za pomoci různých metod, které jsou detailněji rozebrány dále.

V dnešní době umožňují moderní technologie výrobu DPS z jedné, dvou, tří nebo i více vrstev. Při výrobě DPS musí být dosažena vysoká spolehlivost a funkčnost, která může být ovlivněna správným výběrem základního materiálu nebo technologickým procesem výroby.

Samotné komponenty lze umístit na desce v průchozích otvorech (technologie PTH) nebo na ploše desky (technologie SMT). Technologie umístění se od sebe liší jenom metodou pájení. U PTH technologie probíhá pájení na protilehlé straně, kdežto u SMT na straně umístění. [1]



*Obr. 1: Technologie pájení PHT [1]*

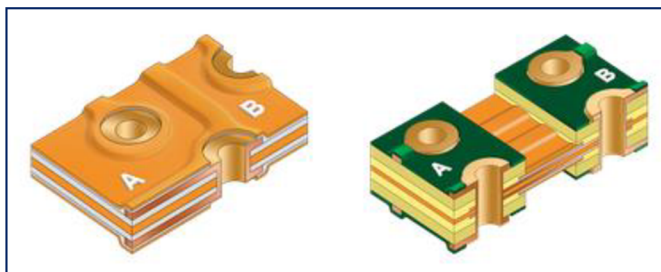


*Obr. 2: Technologie pájení SMT [1]*

## 2.1 Rozdělení DPS dle konstrukce

### 2.1.1 Ohebné DPS

Ohebné plošné spoje byly vyrobeny s cílem nahradit tradiční drátové kabeláže. Hlavní fundamentální výhodou těchto spojů je jejich ohebnost. Díky této základní vlastnosti umožňují ohebné spoje snadnější instalaci a servis, zvýšenou spolehlivost, úsporu hmotnosti a místa. Návrh ohebných spojů musí proběhnout s cílem zajistit vysokou spolehlivost bez poruch i při milionech ohybů, což je nezbytný předpoklad pro instalace v místech, kde nelze využít jiný typ DPS. Výhody ohebných desek byly poprvé využity v automobilovém průmyslu a nyní se využívají především jako náhrada za svazky vodičů nacházejícími se pod karoserií vozů. [2]

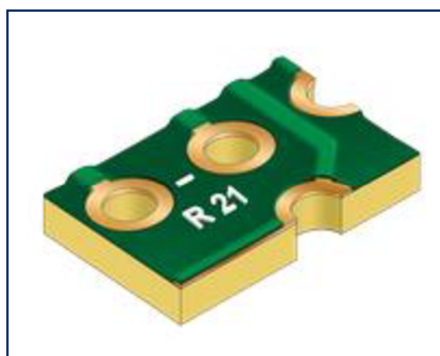


Obr. 3: Ohebné plošné spoje [3]

## 2.2 Neohebné desky

### 2.2.1 Jednovrstvé DPS

Nezákladnější plošné spoje, které mají elektronické součástky na jedné straně a na druhé straně mají vodivé cesty – spoje. Vzhledem k tomu, že je vodič jen na jedné straně nazývá se tento DPS jednostranný nebo jednovrstvý. Tento typ desky je vhodný pouze pro jednoduché obvody.[1]



Obr. 4: Jednovrstvé plošné spoje [3]



## 2.2.2 Dvouvrstvé DPS

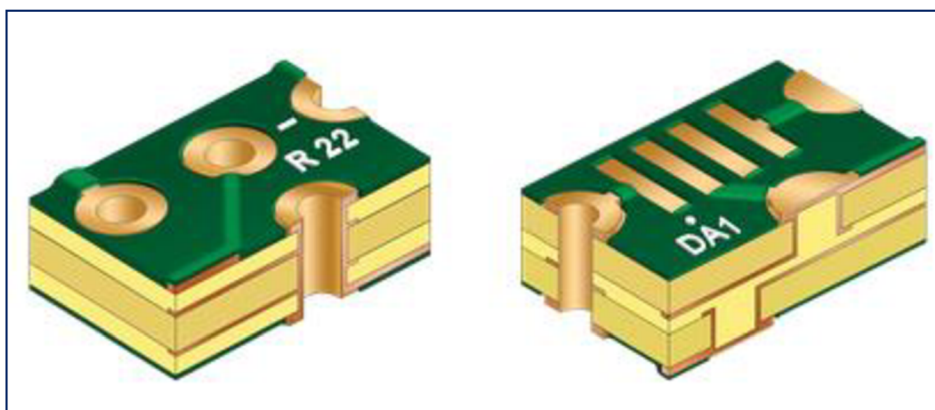
Dvouvrstvé (dvoustranné) plošné spoje jsou vhodnější pro náročnější obvody, protože mají dvojnásobnou plochu pro vedení spojů (cest) ve srovnání s jednovrstvými plošnými spoji. Dvouvrstvé desky mají vodiče na obou stranách a ty jsou spojené pokovenými otvory. [1]



Obr. 5: Dvouvrstvé plošné spoje [3]

## 2.2.3 Vícevrstvé DPS

Vícevrstvé plošné spoje mají jednu nebo více vnitřních vodivých vrstev. Toho je dosaženo slisováním jádra, měděných vrstev a izolačních prepregů. Počet vrstev se označuje jako počet všech motivů. Otvory ve vícevrstvěch deskách jsou oboustranné, a proniknou celou deskou. Slepé otvory (blind vias) spojují jednu z vnějších vrstev s jednou nebo více vnitřními vrstvy. Ke spojení pouze vnitřních vrstev je vhodné využít tzv. pohřbených otvorů (buried vias). [1]



Obr. 6: Vícevrstvé plošné spoje [3]

### 3 Základní materiály DPS

Základní materiál (ZM) je charakterizován podle normy NEMA (National Electrical Manufactures Association). Tato norma charakterizuje základní laminát podle použitého substrátu a použitého typu pryskyřice.

Jedná se o substrát, který se používá na zhotovení vodivého motivu, sloužícího k montáži elektronických součástek. Základní materiál může být různých rozměrů, tvaru a pružnosti. ZM pro desky plošných spojů můžeme rozdělit na organické, anorganické a kompozitní materiály.

DPS musí být odolné vůči teplotnímu, elektrickému, mechanickému a chemickému namáhání.

#### 3.1 Organicky základní materiál

Organické základní materiály mohou být na bázi papíru, případně skleněné tkaniny s reaktoplastovou pryskyřicí. V praxi se využívají také materiály na bázi epoxidové nebo fenolové pryskyřice, které nejsou pružné.

Mezi hlavní výhody organických substrátů je jejich hmotnost a dielektrická vlastnost. Mezi zápory patří malá tepelná vodivost, velký součinitel teplotní roztažnosti a občasná navlhavost.

**FR-1** a **FR-2** – obsahují jako základní složku celulósový papír nasycený fenol formaldehydovou pryskyřicí. Z angličtiny označení FR značí Fire Retardent, což znamená zpomalovač hoření. Rozdíl mezi deskami je v teplotě skleněného přechodu. Tyto materiály jsou určeny pro nenáročné aplikace. FR-1 a FR-2 jsou málo odolné proti vlhkosti a mají horší mechanické vlastnosti. [5]

**FR-3** – obsahuje opět jako základní složku celulósový papír, oproti FR-1 a FR-2 je však nasycený epoxidovou pryskyřicí. FR-3 je vhodný pro náročnější aplikace. Materiál má lepší mechanické, elektrické a tepelné vlastnosti. [5]

**FR-4** – základní složkou je skleněná tkanina nasycená epoxidovou pryskyřicí. Má dobré elektrické a mechanické vlastnosti, chemickou odolnost a je samo hasící. FR-4 lze použít pro teploty do 150 °C. [5]

**FR-5** - je podobný jako FR-4, ale má lepší vlastnosti a je možné jej používat do teploty 180 ° C. [5]

### **3.2 Kompozitní základní materiály**

Materiál pod názvem CEM1 (Composite Epoxy Materials) je kompozitní materiál, který je nejčastěji použit jako levnější náhrada za materiál FR4. Základ je tvořen z papíru nebo skleněné rohože CEM3, s přidavkem jedné vrstvy skleněné tkaniny. CEM1 nelze pokovovat. [4]

Desky vyrobené z kompozitních materiálu mají lepší elektrické a mechanické vlastnosti. V závislosti na tloušťce mají lepší odolnost v ohybu, lepší izolační vlastnosti a odolnost vůči vlhkosti. Mají vysoký izolační odpor a nízkou hořlavost. [5]

### **3.3 Anorganické základní materiály**

Oproti organickým materiálům mají vyšší teplotní odolnost, díky tomu vydrží i teplotu výpalu tlustých vrstev. Na druhou stranu má tento typ nižší koeficient teplotní roztažnosti. Desky z anorganického materiálu jsou dražší, mají větší hmotnost, jsou křehké a mají rozměrová omezení. Některé materiály mohou být i toxické.

#### **3.3.1 Keramické materiály**

Tento typ materiálů se používá při výrobě zvláštních typů DPS se specifickými vlastnostmi. Nejčastěji jsou použity jako podložky pro tlusté vrstvy, jelikož mají vysokou teplotní odolnost a vydrží tedy výpal tlustých vrstev. Keramické materiály jsou velmi křehké, na druhou stranu mají však vysokou chemickou odolnost. V elektrotechnice se keramické materiály dělí na dvě skupiny podle relativní permitivity. Jestliže je hodnota vyšší než 12, používá se tento typ pro výrobu kondenzátorového dielektrika. Jestliže je nižší, používá se jako substrát. [4][6]

Keramické substráty můžeme rozdělit na 3 skupiny:

**Korundová keramika** – vyrábí se z oxidu hlinitého litím nebo válcováním jemných prášku oxidů kovů a skla. Korundové substráty mají poměrně vysokou tepelnou odolnost (přibližně 25 W/mK), dobrou mechanickou odolnost, tepelnou stabilitu a dielektrické vlastnosti. [4][6][7]

**Beryliová keramika** – vyrábí se z oxidu berylnatého. Tento typ materiálu má nejvyšší tepelnou vodivost (250 W/mK) a je proto vhodný pro výkonové obvody. Hlavní nevýhodou tohoto materiálu je jeho toxicita při výrobě. Má menší pevnost a je dražší než korundová keramika. [7]

**Aluminium** – nitridová keramika (AlN) – používá se jako substrát k beryliovému substrátu, pro použití ve výkonových obvodech. Materiál má vyšší teplotní vodivost než korundová keramika (170 W/mK), má nízký koeficient teplotní roztažnosti, není toxický, má dobré elektrické a mechanické vlastnosti a je levný. [7][8]

## 4 Metody výroby DPS

V dnešní době se k výrobě desek plošných spojů používají tři druhy výrobních postupů.

- **Subtraktivní** – metoda spočívá v odstraňování přebytečné mědi leptáním
- **Aditivní** – metoda spočívá v nanášení vodivých cest
- **Semiaditivní** – kombinovaný postup subtraktivní a aditivní

### 4.1 Subtraktivní technologie

Subtraktivní metoda převládá, díky své nízké ceně, ve světové výrobě DPS. Tento metoda funguje na principu odebrání přebytečné mědi leptáním ze substrátu, přičemž vodivý motiv je chráněn leptuvzdorným rezistem. Subtraktivní technologie můžeme rozdělit na dva druhy:

- **Pattern platin (pokovení motivu)** – tato technologie je nejrozšířenější. Využívá se zde Sn, Sn/Pb nebo Al jako leptuodolné vrstvy. [9]
- **Panel plating (pokovení desky)** – před vyleptáním jsou otvory a vodivé cesty kryty fotorezistem. [9]

### 4.2 Aditivní technologie

Aditivní technologie je založena pouze na chemickém procesu a nevyužívá elektrického proudu. Proces leptání se v této technologii vůbec nevyužívá a odpadají tedy i veškeré nevýhody s ním spojené. Nejvíce se zde využívá tvrzený papír nebo sklolaminát, materiály jsou bez krycí vrstvy a jsou napuštěny palladiem. Hlavním rozdílem mezi aditivní a subtraktivní technologií je, že základní materiál je zpracován bez použití měděné fólie. Díky tomu nedochází k mechanické deformaci vyvolané vnitřním pnutím. [10]

### 4.3 Semiaditivní technologie

Semiaditivní technologie kombinuje subtraktivní a aditivní technologie. Je založena na principu pokovení vyvrtných otvorů i celého povrchu desky mědí. Následně dojde k vyleptání vodivého motivu za použití leptuodolné masky. Semiaditivní technologií lze vyrábět jednovrstvé, dvouvrtvé a vícevrstvé DPS. [11]

## 5 Řešení existující na trhu

Plošné spoje lze v dnešní době vytvořit jak ve formě desek (2D), tak i ve formě tvarovaného povrchu (3D). Molded Interconnect Devices (MID), neboli 3D plošné spoje, postupně nahrazují spoje deskové, a to z důvodů zmenšování rozměrů, snižování hmotnosti a z důvodu lepšího prostorového využití. Technologie pro výrobu MID lze využít také na výrobu DPS. Díky tomu lze říci, že na trhu existují 4 druhy metod výroby vodivých struktur.

- Třískovým obráběním
- Laserem (LPKF-LDP®, ADDIMID, MIPTEC)
- 3D tiskem (Aerosol-Jet®, Inkjet)
- Plazmou (Flamecon®, Plasmadust®)

### 5.1 Třískové obrábění

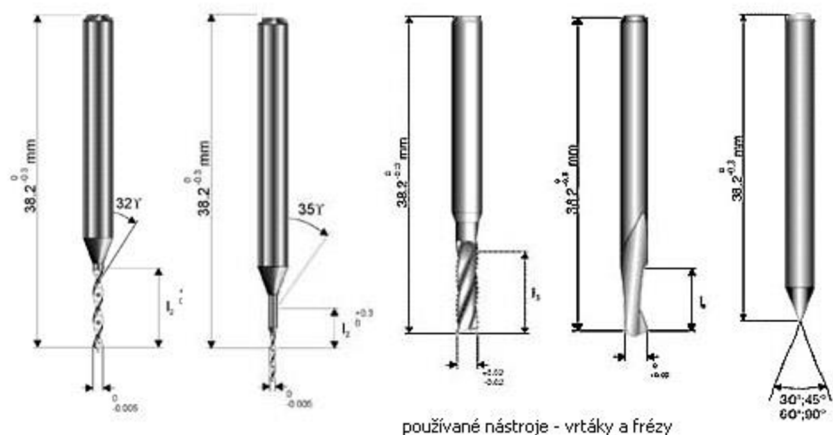
Frézka je ideální pro rychlou tvorbu prototypu desek plošných spojů. Stolní frézka na plošné spoje výrazně snižuje čas návrhu a vývojáři mohou desky vytvářet přímo na svém pracovišti. Díky tomu je možné projekty rychle dokončit a produkt uvést na trh. [12]

Hlavní výhoda stolní frézky oproti ostatním druhům je její cena, na druhou stranu je občas nezbytné po třískovém obrábění využít chemického procesu leptání ke zlepšení kvality povrchu DPS:

Optimální podmínky při třískovém obrábění jsou dány výrobcem nástrojů. V závislosti na typu materiálu, průměru drážky nebo otvoru, musí být správně zvolena rychlost posuvu a otáčky, které výrobce nástrojů uvádí v rozmezí od 3000 do 100000 ot/min. Obecně platí pravidlo, že vrstva mědi by měla být odebrána během jedné otáčky. [13]

Při obrábění materiálu vznikají ořepky z obou stran DPS, tomu se dá zabránit použitím dalšího materiálu přiloženého k desce. Díky tomu, že jsou materiály dobře stlačeny k sobě, se minimalizuje riziko ořepu vrchních a spodních stran.

K nejnáročnějším operacím se používají nástroje z rychlořezné oceli, za podmínky, že známe parametry nastavení. Také je možné použít nástroje ze slinutého karbidu wolframu, které jsou méně citlivé na nesprávné nastavení. [13]

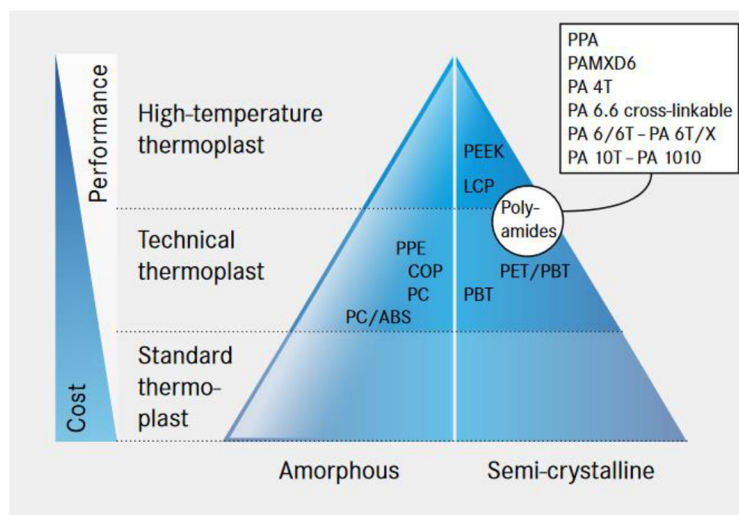


Obr. 7: Typy používaných vrtáků a fréz [14]

## 5.2 Vytváření vodivých struktur pomocí laseru

### 5.2.1 LPKF – LDS®

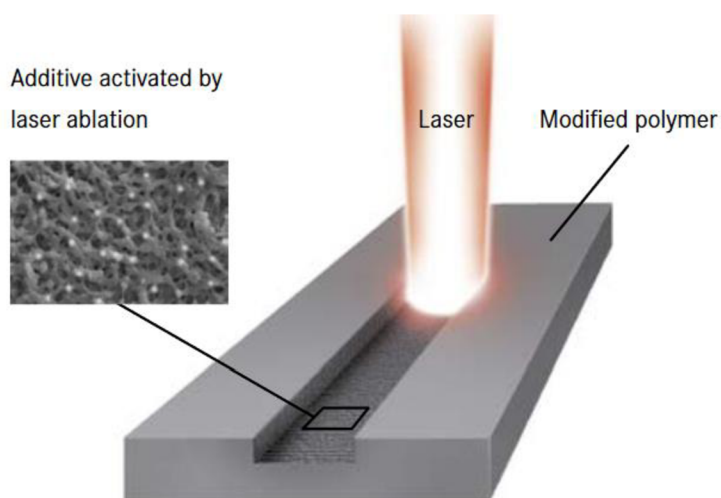
Jedná se o nejpoužívanější metodu na trhu pro výrobu vodivých vrstev. Tato metoda pokrývá téměř 50 % trhu. Díky její univerzálnosti je vhodná jak pro výrobu prototypů, tak i pro sériovou výrobu. Umožňuje vytváření jemných struktur s velkým stupněm volnosti při projektování ve 3D. [15]. Technologie je vhodná pro velkosériovou výrobu díky nízké ceně za kus.



Obr. 8: Rozdělení aktuálně používaných materiálů [18]

Laser Direct Structuring (LDS) je aditivní metoda, která je šetrná k životnímu prostředí, což je v dnešní době významné pozitivum. Výrobní proces probíhá bez procesu leptání, a substrát je tvořen z recyklovatelného materiálu.

Materiály používané pro LDS obsahují jako aditivum organokovy, které jsou rozprostřeny v celém objemu materiálu. Materiály, které neobsahují aditivum, lze ošetřit pomocí spreje LPKF ProtoPaint [15][16]. Díky teplotní roztažnosti organokovů nedochází k aktivaci aditiva během procesu lisování základního substrátu, kdy je materiál zahříván na vysokou teplotu. Je to dáno tím, že aditivum tvoří zhruba 4-10 % celkové hmotnostní výlisků a jeho vliv na mechanické vlastnosti je zanedbatelný [17]. Přímé laserové strukturování je založeno na principu ozáření a následné aktivace jader pod paprskem. Pro strukturování se obvykle používá laser Nd:YAG s vlnovou délkou 1064 nm [15]. Po ozáření laserem dochází k rozkmitání molekul polymeru a následnému rozrušení jejich struktury [17]. Během ozáření laserem dochází k odpaření vrstvy o tloušťce 1 až 2  $\mu\text{m}$ , důsledkem toho se na povrchu vytvoří mikroskopická drsná struktura, která poskytuje dostatek adheze a zároveň odkryje částičky aditiva [16]. Finálním krokem je chemické pokovení částí, které byly zasaženy laserem.



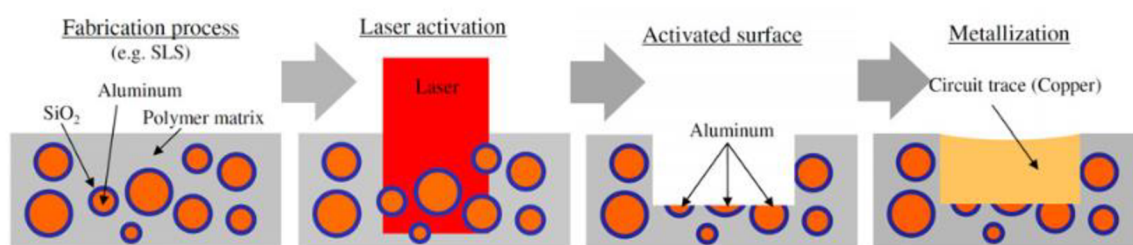
Obr. 9: Aditivní aktivace povrchu laserem [18]

Standardně se nyní dodržuje minimální šířka vodivé cesty zhruba 150  $\mu\text{m}$  při minimálním intervalu 200  $\mu\text{m}$ . Z technologického hlediska lze vyrobit i vodivé cesty s šířkou 100  $\mu\text{m}$  a méně, musí být nicméně předem upraven technologický proces. V dnešní době je technologický limit šířky vodivé cesty zhruba 50 až 55  $\mu\text{m}$ . Rychlost opotřebení vodivých cest může dosáhnout 4000 mm/s, závisí to však na tvaru. Čím je tvar složitější, tím se rychlost opotřebení snižuje.



## 5.2.2 ADDIMID

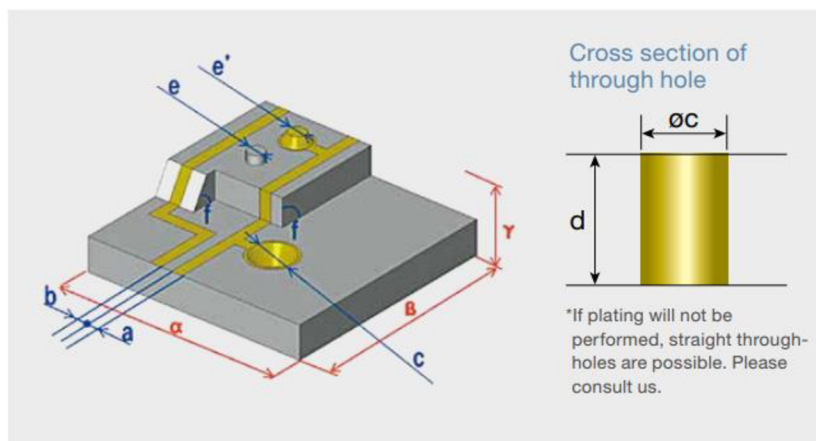
Technologie ADDIMID využívá materiálu obohaceného aditivu podobně jako při technologii LPKF-LDS®, avšak jako aditivum se využívá kovových prášku Cu, Al nebo Ni. [15] Velikost zrnka musí být v rozmezí od 0,5 do 1,2  $\mu\text{m}$ . [19] Vytváření vodivých cest probíhá obdobně jako u LPKF-LDS® a to za pomoci laseru. Druhy použitého laseru jsou buď Nd:YAG s vlnovou délkou 1064 nm nebo laser na základě CO<sub>2</sub> s vlnovou délkou 10,6  $\mu\text{m}$  [15]. Zrnka, která se nachází na povrchu, jsou obalena ve vrstvě izolačního materiálu, aby se předešlo jejich metalizaci. [19] Minimální šířka vodivých cest je obdobně jako u LPKF – LDS® přibližně 50  $\mu\text{m}$ . [20] Díky nízké ceně hliníku lze využít velké množství ne příliš drahých ale poměrně kvalitních polymerů, což zvyšuje ekonomický potenciál technologie. Tato technologie je momentálně ve stádiu vývoje. [15]



Obr. 10: Proces vytvoření vodivé cesty technologií ADDIMID - bez vrstvy SiO<sub>2</sub>, platí i pro LPKF-LDS® [19]

## 5.2.3 MIPTEC

Semiaditivní metoda strukturování od společnosti Panasonic MIPTEC se zásadně liší od metody výroby u technologií LPKF-LDS® a ADDIMID. Po vytvarování dochází ihned k chemickému pokovení mědi po celé části povrchu. Dále dochází k odstranění materiálu pomocí UV nebo IR záření. Jako další krok je galvanické zesílení mědi, přičemž se nežádoucí měď následně odleptá. Díky tomu je možné dosáhnout šířky vodivých cest 50  $\mu\text{m}$ . Úhel dopadu laseru při vytváření cest může být i 90 stupňů. Moderní je využití materiálu PPA (polyphthalamide), přičemž jako základní substrát jsou použity keramické materiály Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nebo AlN, a to především pro jejich dobrou tepelnou vodivost a rozměrovou stabilitu. [15][21]



Obr. 11: Možnosti výroby vodivých cest technologií MIPTEC [21]

## 5.3 Vytváření struktur pomocí tisku

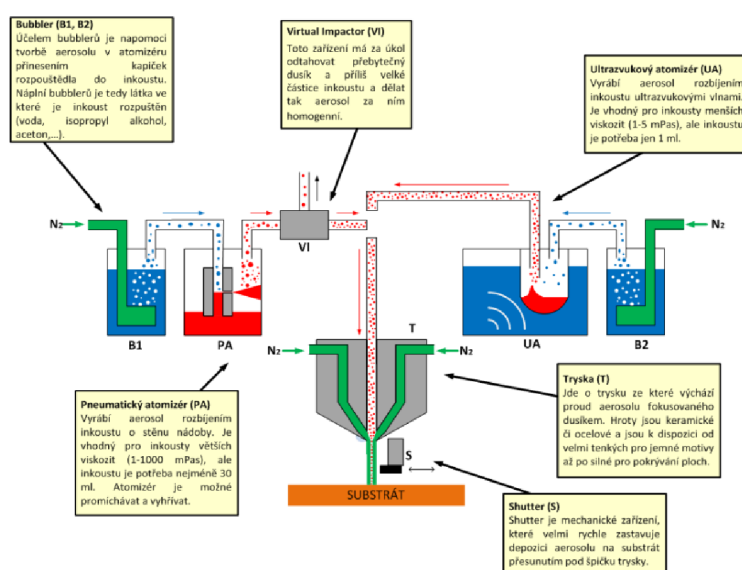
Tisková elektronika má v porovnání s konvenční elektronikou obrovský ekonomický přínos, neboť přináší nová a efektivní řešení při její výrobě. [22] Proces vytváření plošných spojů sestává z natisknutí materiálu na 3D substrát a následného sintrování. [17] Jedná se o funkční tisk, na který jsou kladeny jiné nároky než na běžný grafický tisk, který je tvořen homogenní vrstvou. [23] Proces tiskového vytváření můžeme rozdělit na kontaktní a bezkontaktní.

### 5.3.1 Aerosol-Jet®

Technologie Aerosol-Jet® je bezkontaktní metoda. Tištění probíhá bez použití šablony a nanášený materiál vstupuje ve formě koloidní disperze. [15][17] Koloidní disperze je mikroheterogenní látka obsahující částice velké od 1 nm do 500 nm (pro Aerosol-Jet® zhruba 50 nm), s obsahem pevných částic od 60 do 70 %. [15][17]

První část, do které inkoust vstupuje, se nazývá bubbler. Bubbler obsahuje rozpouštědlo (voda, izopropylalkohol, aceton) a napomáhá k přeměně inkoustu v aerosol v atomizéru, který je vyplněn inertním plynem N<sub>2</sub>. [17][24] Existují dva typy atomizérů – pneumatický a ultrazvukový. Odlišují se způsobem vzniku aerosolu. Pneumatický atomizér je založen na rozbíjení inkoustu o stěny nádoby, kdežto ultrazvukový rozbíjí inkoust pomocí ultrazvukových vln. [24]

Pneumatický atomizér (PA) je vhodný pro inkousty o viskozitě 1-1000 mPa·s, kdežto ultrazvukový atomizér (UA) je vhodný pro inkousty o viskozitě 1-5 mPa·s. Velkou výhodou UA je minimální použitelné množství inkoustu – přibližně 1 ml, oproti 30 ml u PA. [22] U PA prochází směs na výstupu přes Virtuální Impactor (VI), který má za úkol odlučovat přebytečný dusík a příliš velké částice inkoustu. Po výstupu z VI má aerosol homogenní strukturu. Následně je aerosol vháněn do trysky (T) s keramickými nebo ocelovými hroty. Z trysky vychází proud aerosolu usměrněný dusíkem. V blízkosti hlavy se nachází také tzv. Shutter (S), což je zařízení, které velmi rychle dokáže zastavit proud dopadajícího aerosolu na substrát tím, že se přesune pod špičku trysky. [24]

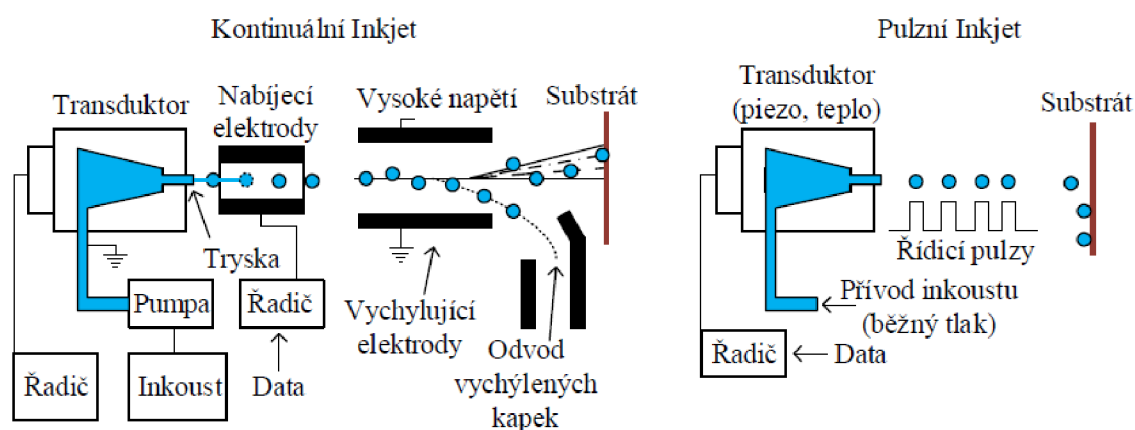


Obr. 12: Technologie Aerosol-Jet® s pneumatickým a ultrazvukovým atomizérem [24]

Vytvrzování je proces oddělení tekutých částí inkoustu od pevných částic. Existuje několik způsobů vytvrzování komponent vytištěných aerosolem. Standardně se používá sušicí pec nebo pájecí pec. Doba vydržení je přímo navázána na teplotou vytvrzování. Při malých teplotách je doba vydržení větší, to má vliv na elektrickou vodivost, která má tendenci se zvětšovat se zvětšující se teplotou spékání. Dalším způsobem vytvrzování je za použití laseru s IR zářením nebo světelným paprskem z UV světla. Jako zdroj světla se používá LED modré barvy, který je zaostřen pomocí skleněné čočky. Pro lepší pájení za pomoci UV je nutné vzít v úvahu jeho vlnovou délku a intenzitu. [15]

### 5.3.2 Inkjet

Inkjet je selektivní aditivní technologie tisku struktur. [17] Elektrické vodivé inkousty musí obsahovat pevné nanočástice, aby nedošlo k ucpání tiskové hlavy. Pro lepší výstup z této hlavy by viskozita částic neměla přesáhnout  $20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ . Povrchové napětí, které je odpovědné za kulatý tvar inkoustu, musí být v rozsahu od 28 do  $350 \text{ mN/m}$ . Běžně se používají částice o velikosti 50 nm. Koncentrace atomů na povrchu je vyšší, proto je potřeba menší energie na rozbití mřížky. Problémem je, že pevné nanočástice mají tendenci k aglomeraci (spojení do větších celků). Aby k tomu nedocházelo, obalují se částice tenkou organickou vrstvou, která je odděluje. Obalené částice mají nižší hustotu, díky čemuž se nanočástice neusazují na dně nádoby s inkoustem. [15]



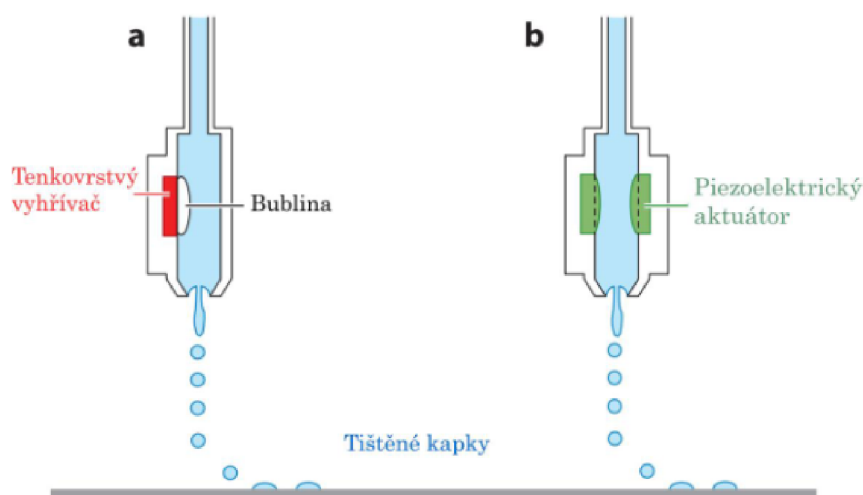
Obr. 13: Kontinuální Inkjet a pulzní Inkjet [17]

Dávkování kapek z tiskové hlavy může být nepřetržité (CIJ – Kontinuální Inkjet) nebo na vyžádání (DoD – Pulzní Inkjet). Při kontinuálním tisku se svázané struktury vytváří za pomoci rovnoměrně dodaného inkoustu. Tento režim se používá pro rychlý tisk s tloušťkou vodivých cest  $2 \mu\text{m}$  a šířkou mezi 50 až  $150 \mu\text{m}$ . Zesílení vodivých cest lze provést například natisknutím dalších vrstev na povrch předchozích vrstev. Nevýhodou metody CIJ je především to, že tisk probíhá také na místech, které k tomu nejsou určeny, což je způsobeno nepřetržitým dávkováním inkoustu. Kapky se musí tedy elektricky odklonit. [15]

DoD umožňuje na rozdíl od CIJ dávkování kapek. Metoda má větší přesnost ale menší rychlost tisku. Tištění je založeno na principu řízení tlaku v komoře, díky čemuž je možné řídit objem i rychlost kapek. Uvnitř tiskové hlavy je umístěn transduktor, který je založen na tepelném nebo piezoelektrickém principu, a který řídí množství kapek

dopadajících na substrát. [17] V případě tepelného Inkjetu je uvnitř komory vedoucí do trysky umístěn malý tenkovrstvý ohřivač, který ohřívá kapalinu v jeho těsné blízkosti nad teplotu varu, čímž se vytváří malé bubliny výparů. [22]

Piezoelektrický inkjet využívá přímé mechanické dávkování, které působí na membránu komory s inkoustem. Piezo krystal se pod napětím deformuje, díky čemuž se mění objem komory. [4] Vytvrzování probíhá stejně jak u procesu Aerosol-Jet®. [15]



Obr. 14: Ukázka principu systému Inkjet využívající metodu řízeného dávkování inkoustu a) tepelný aktuátor b) piezoelektrický aktuátor [22]

## 5.4 Vytváření vodivých cest pomocí plazmy

Plazma neboli vysokoenergetický plynový paprsek, se používá pro roztavení metalického prášku obsahujícího nanočástice. Tímto způsobem je možné nanášet materiál přímo na substrát. Největší výhodou je krátký výrobní proces, současné strukturování a metalizace, ale také možnost formování vrstev s velkou tloušťkou a jejich rychlé nanášení. Díky tomu má plazmová technologie veliký potenciál. [15]

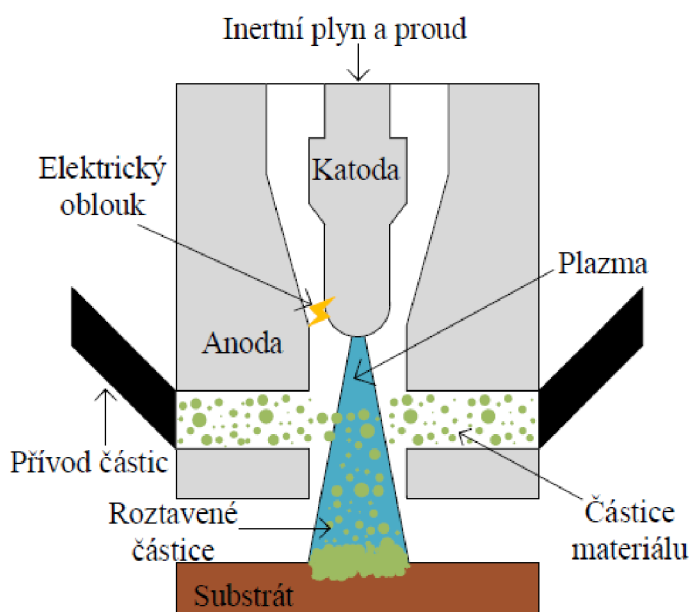
### 5.4.1 Flamecon®

Jedná se o automatizovaný termokinetický aditivní proces metalizace, který umožňuje nanášet tenké metalické vrstvy na velké spektrum substrátů. Před použitím této metody musí být substrát očištěn a zdrsňen některou z dostupných metod, například laserem nebo pískováním. Při procesu Flamecon® jsou metalické nanočástice požadovaného materiálu vstřikovány do horké komory za pomoci vysoce přesného dávkovače. Následně jsou částice roztaveny a skrz trysku s nosným plynem dopraveny na povrch substrátu. [15]

Největší výhodou procesu je možnost nanášení vodivých vrstev s vysokou proudovou zatížeností za krátký čas. Při každém kroku nanášení může být vytvořena vrstva o tloušťce 20 až 100  $\mu\text{m}$ , opakovaným vrstvením lze dosáhnout tloušťky až 1000  $\mu\text{m}$ . Díky pórovitosti a dalším faktorům lze u materiálů v pevném stavu dosáhnout vodivosti struktur až 50 %. Adheze struktur k substrátu závisí na diametru, vlastnostech částic, a také na termické energii a rychlosti při dopadu. Jako substrát lze použít plasty, dřevo, keramiku či kovy. Tato technologii se nachází ve fázi vývoje. [15]

### 5.4.2 Plasmadust®

Plasmadust® je patentovaná technologie od společnosti Reinhausen Plasma GmbH. Jedná se o technologii fungující na principu studené plazmy. Teplota studené plazmy se pohybuje v rozmezí 10 až 150  $^{\circ}\text{C}$ . Díky tomu může být tato technologie použita pro substráty, které mají vysokou teplotní náchylnost, jako je papír nebo karton. Z kazet je prášek přes hadici pomocí nosného plynu vháněn do tiskové hlavy, tzv. trysky plazmy. Díky vibračnímu přístroji, který brání aglomeraci prášku a umožňuje nanášení homogenních vrstev, je zaručena vysoká přesnost dávkování prášku. Tisková hlava se skládá z duté katody, skrze kterou prochází inertní plyn a také z anody, která katodu obklopuje. Při použití vysokofrekvenčního proudu, vzniká mezi katodou a anodou impulsní oblouk, který ionizuje plyn a vytváří tak nízkoteplotní nestabilní plazmu dopadající na povrch substrátu. Před dopadem na substrát jsou částice ochlazovány na teplotu, při které substrát nedegraduje. [15]



Obr. 15: Princip technologie Plasmadust® [17]

Moderní technologie umožňují vyrobit vodivé cesty o šířce od 2 do 5 mm. Za použití krycí masky lze dosáhnout šířky 200  $\mu\text{m}$ , nicméně tato maska zpomaluje celý proces. V závislosti na počtu průchodů jedním bodem lze vytvářet vrstvy o tloušťce 1 až 100  $\mu\text{m}$  při maximální rychlosti 50 m/min.[15]

Prášek musí být možné roztavit ve studené plazmě. Substrátem zde může být kov, plast, papír, karton, sklo, keramika, či například textilie.

Plasmadust® je technologie šetrná k životnímu prostředí, jelikož pracuje bez pomoci jakýchkoliv škodlivých látek, bez procesu aktivace, vysušení a očištění.[15]

## **5.5 Použitá metoda výroby DPS**

Třískové obrábění je metodou výroby DPS používanou v současné době také u stroje LPKF, který je k dispozici na katedře, a ke kterému se váže také následující praktická část. Tato metoda je nejvhodnější zejména díky rychlému prototypování. Nevýhodou této metody je, že neumožňuje výrobu vícevrstevných desek, ale pouze desek jednovrstevných a dvouvrstevných. U vícevrstevných desek jsou problémy s prokovením a bylo by nutné použití nýtovačky, nebo prokovovačky, do kterých je ale nezbytné používat náplň, která je finančně nákladná a její maximální použitelnost je zhruba 1 rok.



## **6 Servopohony**

Servopohony jsou použity v praktické části této diplomové práce jako hnací jednotky frézovací hlavy a zásobníku nástrojů. Frézovací hlava je osazena centrálním servopohonem, který pohání hřídel s kleštinou a nástrojem, a jedním krokovým motorem, který zajišťuje otočný pohyb snímače výšky nástroje od obráběného povrchu. Zásobník nástrojů zahrnuje dva krokové motory, které umožňují automatické posouvání nástrojů uvnitř zásobníku.

Elektrický servopohon je regulační pohon, sestávající se z motoru, přímo napájeného nebo polovodičového měniče, řídicích a regulačních obvodů. Pohon musí umožňovat oba směry točení a momentu. Výhoda servopohonu je v tom, že vždy pracuje v uzavřené regulační smyčce se zpětnou vazbou. Součástí motoru bývají obvykle snímače polohy a rychlosti.

### **6.1 Rozdělení servopohonů podle funkce**

Rychlostní (otáčkový) servopohon – má pouze otáčkovou zpětnou vazbu a umožňuje sledovat zadávané rychlosti. [27]

Polohový servopohon – je určen pro řízení polohy (úhel natočení nebo posuvné dráhy). Polohové servopohony lze rozdělit z hlediska aplikace na dvě skupiny: cílové a sledovací. Při cílové regulaci je možné optimální nastavení polohy. Sledovací regulace umožňuje sledovat zadávání trajektorií, to umožňuje přesné zadávání rychlosti. [27]

### **6.2 Rozdělení servopohonů dle typu použitého motoru**

#### **Stejnoseměrný motor**

Jedná se o jeden z nejstarších typů motorů, v kterých je použit stejnosměrný proud, který byl v dřívějších dobách hojně využíván. Ve stejnosměrném motoru lze plynule měnit otáčky změnou přidávaného napětí. Pro servopohony se používá zejména stejnosměrných motorů s buzením permanentních magnetů ve statoru. Magnety se nejčastěji vyrábí z anizotropního feritu, Al-Ni-Co, Samarium-Kobaltu nebo neodým-železo-boru.



Aktivními částmi motoru jsou stator s permanentními magnety a kovovými nástavci z měkkého železa pro koncentraci magnetického toku do vzduchové mezery. Dále pak rotor (kotva) s vinutím, tvořeným jednotlivými cívkami, uloženými v drážkách a vyvedenými na komutátor, který spolu s uhlíkovými kartáči a kartáčovými držáky tvoří tzv. sběrací ústrojí. Pro větší výkon se používají motory s cizím buzením, v nichž se magnetické pole vytváří proudem budícího vinutí. Nevýhoda stejnosměrného motoru je Jouleova ztráta. [27]

### **Krokový motor**

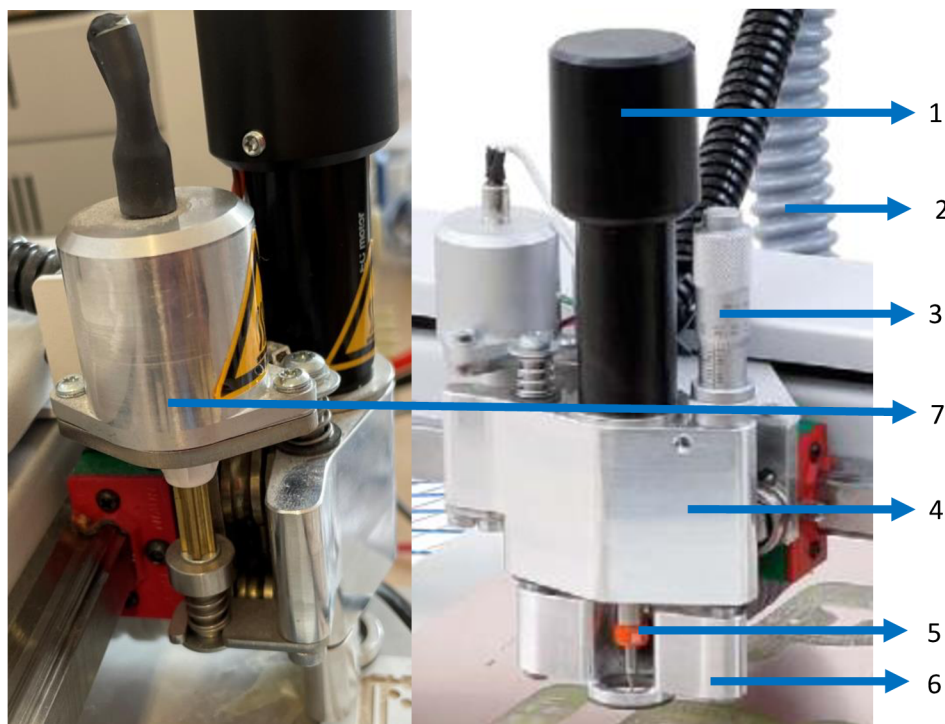
Jedná se o nejjednodušší akční člen pro převedení digitálního signálu na pohon, za účelem natočení rotoru. Krokový motor si můžeme představit jako synchronní motor, v němž je postupným napájením jednotlivých pólových dvojic stejnosměrným proudem generováno namísto točivého pole tzv. „poskakující“ magnetické pole. Počet stabilních poloh rotoru je dán počtem kroků motoru na jednu otáčku. [27]. Tento typ motoru je v této práci použit nejčastěji díky jejich možnosti přesně nastavit úhel natočení.

## II. Praktická část

### Frézovací hlava

#### 7 Analýza současně používané nástrojové hlavy

Cílem této diplomové práce je provést návrh nástrojové hlavy s automatickou výměnou nástrojů a skutečným měřením vzdálenosti od obrobeného materiálu. Tato nově navrhovaná nástrojová hlava má za cíl odstranit nevýhody současně používané nástrojové hlavy a zároveň by měla být ekonomicky výhodnější než dostupná řešení na trhu. Nejdříve je nutné provést konstrukční analýzu současné nástrojové hlavy u frézky LPKF ProtoMat E33, kterou katedra disponuje.



Obr. 16: Hlava frézky LPKF ProtoMat E33 [28]

- 1 – Motor (33 000 ot/min)
- 2 – Hadice pro odvod třísky
- 3 – Ruční regulace šířky frézování (mikrometrická hlava)
- 4 – Tělo nástrojové hlavy
- 5 – Nástroj (fréza/vrták)
- 6 – Přítlačný mechanismus
- 7 – Posuvný elektromagnet

Frézka LPKF ProtoMat E33, kterou katedra disponuje, slouží pro výrobu plošných spojů. Na základě několika nevýhod vzniklo téma pro tuto diplomovou práci, jejímž cílem je návrh dokonalejší nástrojové hlavy, která tyto nedostatky eliminuje. Hlavní nevýhodou této frézy je absence automatické výměny nástrojů. Pro výměnu nástroje je tedy nutné celý proces pozastavit a provést ruční výměnu nástroje. Nástroj upnutý do kleštiny je poháněn elektromotorem s otáčkami 33 000 ot/min. [28] Šířka frézované drážky je nastavena pomocí mikrometrické hlavy a přítlačného mechanismu. Součástí této nástrojové hlavy je také hadice pro odvod třísky, která vzniká při procesu obrábění. Toto odsávání třísky probíhá za provozu a zamezuje zanášení bezprostředního okolí nástroje.

Další zásadní nevýhodou současně používané frézky je neschopnost měřit vzdálenost od povrchu materiálu v reálném čase. Kvůli tomu, že materiál nebývá dokonale rovný, může nastat situace, kdy fréza bude operovat příliš hluboko v materiálu. Poté musí některý ze zaměstnanců katedry přenastavit výšku frézovací hlavy ručně. Nebo naopak může nastat situace, kdy hloubka řezné drážky je nedostatečná a materiál se tedy neobrobí dle očekávání a proces obrábění se musí tedy zopakovat nebo dokončit ručně.

Technical Specifications: LPKF ProtoMat E33	
Part no.	127687
Max. material size and layout area (X/Y/Z)	229 mm x 305 mm x 10 mm (9" x 12" x 0.4")
Resolution (X/Y)	0.8 μm (0.04 mil)
Repeatability	± 0.005 mm (± 0.02 mil)
Precision of front-to-back alignment	± 0.02 mm (± 0.8 mil)
Milling spindle	Max. 33,000 rpm, software controlled
Tool change	Manual
Milling width adjustment	Manual
Tool holder	3.175 mm (1/8")
Drilling speed	100 holes/min
Travel speed (X/Y)	Max. 60 mm/s (2"/s)
X/Y-drive	2-phase stepper motor
Z-drive	2-phase stepper motor
Dimensions (W x H x D)	370 mm x 300 mm x 450 mm (14.6" x 11.8" x 17.7")
Weight	15 kg (33 lbs)
Operating conditions	
Power supply	90–240 V, 50/60 Hz, 150 W
Required accessories	Exhaust

Obr. 17: Technická specifikace LPKF ProtoMat E33 [28]

## 8 Postup při návrhu nové nástrojové hlavy

Celý konstrukční návrh nové nástrojové hlavy se skládá z několika jednotlivých úkonů, které jsou blíže popsány v kapitolách uvedených dále v této praktické části „Frézovací hlava“.

Prvním úkolem byla volba motoru dle požadavků pana vedoucího diplomové práce. Jako hnací centrální motor byl zvolen servopohon, a to z důvodu jeho schopnosti poskytovat data v reálném čase, zejména otáček a kroutícího momentu a také díky možnosti jejich snadné regulace. Konkrétní model zvoleného motoru je blíže uveden v příslušné kapitole.

Dále byl proveden výpočet nalisování hřídele a kleštiny, ve které je upnutý nástroj. Spoj nalisováním byl vybrán především proto, že je jednoduchý, spolehlivý a hospodárný.

Na základě maximálních otáček motoru byla následně vybrána ložiska od společnosti SKF. Součástí návrhu ložisek je přibližný výpočet řezných sil a s tím dále související optimální uložení ložisek. Výpočet je uveden spíše pro názornost a samotné síly vznikající při těchto podmínkách nemají příliš velký vliv.

Následně byl řešen upínací mechanismus, který byl navržen jako svěrný spoj s kuželovou stykovou plochou. Součástí návrhu upínacího mechanismu je také volba elektromagnetu a pružin, které slouží k výměně nástroje.

Pro odměřování výšky nástroje od povrchu obráběného materiálu byl navrhnout rotační a odměřovací mechanismus. Tento odměřovací mechanismus používá laserový snímač společnosti SICK. Z konstrukčních důvodů je tento mechanismus omezen v rotaci od 0° do 180°. Odměřovací mechanismus je poháněn krokovým motorem, který je součástí rotačního mechanismu a je blíže popsán v příslušné kapitole.

Nakonec bylo nutné vyřešit problematiku odsávání třísek a prachu vznikajícího při obrábění a také možnosti vertikálního pohybu celé frézovací hlavy. Důvodem návrhu nového řešení odsávání třísky je to, že původní odsávací mechanismus nelze připojit k novému modelu frézovací hlavy.

V praktické části „Automatická výměna nástrojů“ je detailně popsáno řešení AVN včetně návrhu zásobníku.

## 9 Volba servopohonu

Jako hnací centrální motor byl zvolen servopohon. Tento servopohon byl vybrán dle otáček, které jsou uvedeny výrobcem stroje LPKF ProtoMat E33. LPKF uvádí maximální otáčky jsou 33 000 ot/min, avšak krouticí moment výrobce neuvádí. Tento motor byl zvolen především na základě předpokládaného dostatečujícího krouticího momentu, který je detailněji popsán v 11.1, která se věnuje přibližným výpočtům řezné síly. Bylo tedy nezbytné vybrat takový servopohon, u kterého je předpoklad, že krouticího moment je dostatečně velký, a to včetně rezervy. Zvolen byl servopohon s maximálními otáčkami 21 000 ot/min a krouticím momentem  $M_k$  - 0,059 Nm. Výrobcem servopohonu je společnost Faulhaber a jedná se konkrétně o typ Series 2264 024 BP4.[49]



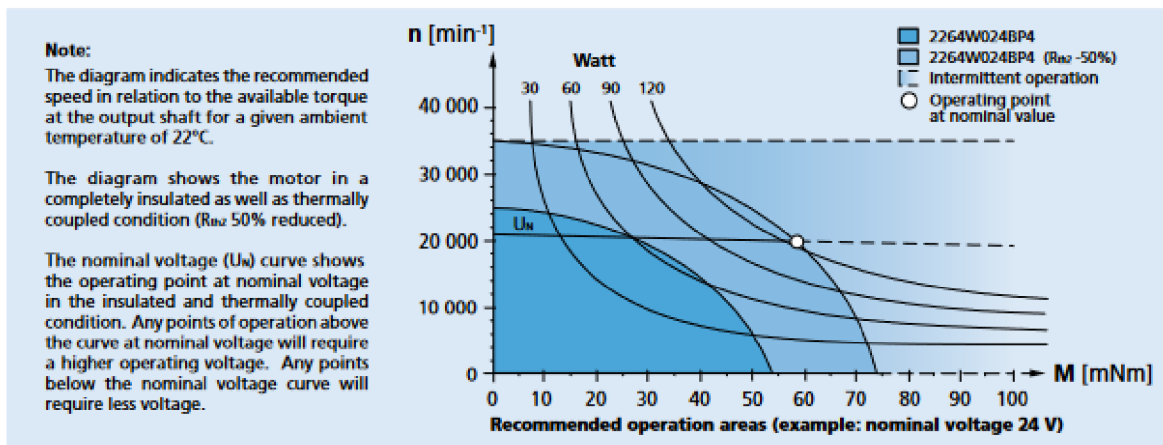
*Obr. 18: Faulhaber Series 2264 024 BP4 [49]*

Na základě nedostatku vstupních parametrů pro volbu servopohonu, konkrétně neznalosti parametrů původního pohonu a materiálových vlastností DPS, které výrobci DPS neuvádějí z důvodu komerčního tajemství. Nebylo tedy možné přesně určit potřebný krouticí moment. Lze však předpokládat, že zvolený servopohon bude dostatečující.

## Series 2264 ... BP4

Values at 22°C and nominal voltage		2264 W	012 BP4	024 BP4	048 BP4	
1	Nominal voltage	$U_N$	12	24	48	V
2	Terminal resistance, phase-phase	$R$	0,05	0,22	0,881	$\Omega$
3	Efficiency, max.	$\eta_{max}$	91	91	90	%
4	No-load speed	$n_0$	21 000	21 100	21 100	$\text{min}^{-1}$
5	No-load current, typ. (with shaft $\varnothing$ 4 mm)	$I_0$	0,521	0,261	0,13	A
6	Stall torque	$M_{lv}$	1 311	1 311	1 280	mNm
7	Friction torque, static	$C_0$	0,41	0,41	0,407	mNm
8	Friction torque, dynamic	$C_v$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$\text{mNm}/\text{min}^{-1}$
9	Speed constant	$k_n$	1 618	809	404	$\text{min}^{-1}/\text{V}$
10	Back-EMF constant	$k_e$	0,618	1,236	2,48	$\text{mV}/\text{min}^{-1}$
11	Torque constant	$k_M$	5,9	11,8	23,6	$\text{mNm}/\text{A}$
12	Current constant	$k_i$	0,169	0,085	0,0423	$\text{A}/\text{mNm}$
13	Slope of n-M curve	$\Delta n / \Delta M$	14,8	14,8	15,1	$\text{min}^{-1}/\text{mNm}$
14	Terminal inductance, phase-phase	$L$	6	24	91,3	$\mu\text{H}$
15	Mechanical time constant	$\tau_m$	1,4	1,4	1,45	ms
16	Rotor inertia	$J$	9,2	9,2	9,21	$\text{gcm}^2$
17	Angular acceleration	$\alpha_{max}$	1 424	1 424	1 400	$10^3 \text{rad}/\text{s}^2$
18	Thermal resistance	$R_{th1} / R_{th2}$	1,2 / 12			K/W
19	Thermal time constant	$\tau_{th1} / \tau_{th2}$	7 / 693			s
20	Operating temperature range:					
	– motor		-40 ... +125			$^{\circ}\text{C}$
	– winding, max. permissible		+150			$^{\circ}\text{C}$
21	Shaft bearings		ball bearings, preloaded			
22	Shaft load max.:					
	– with shaft diameter		4			mm
	– radial at 3 000 $\text{min}^{-1}$ (3 mm from mounting flange)		20			N
	– axial at 3 000 $\text{min}^{-1}$ (push / pull)		2			N
	– axial at standstill (push / pull)		20			N
23	Shaft play:					
	– radial	$\leq$	0,015			mm
	– axial	$=$	0			mm
24	Housing material		stainless steel			
25	Mass		140			g
26	Direction of rotation		electronically reversible			
27	Speed up to	$n_{max}$	34 500			$\text{min}^{-1}$
28	Number of pole pairs		2			
29	Hall sensors		digital			
30	Magnet material		NdFeB			
<b>Rated values for continuous operation</b>						
31	Rated torque	$M_N$	59	59	57,9	mNm
32	Rated current (thermal limit)	$I_N$	11,9	6	2,94	A
33	Rated speed	$n_N$	20 460	20 490	20 500	$\text{min}^{-1}$

**Note:** Rated values are calculated with nominal voltage and at a 22°C ambient temperature. The  $R_{th2}$  value has been reduced by 50%.



Obr. 19: Charakteristika servopohonu Faulhaber Series 2264 024 BP4 [49]

Rotační odměřovací mechanismus a zásobník nástrojů je poháněn krokovými motory. Jedním z důvodů zvolení tohoto typu motoru je možnost nastavit potřebný úhel natočení. Aplikace v tomto konstrukčním návrhu nevyžadují žádné velké nároky a krokové motory byly tedy zvoleny také na základě dostupnosti a ekonomičnosti. V kapitole (č.13) rotační a odměřovací mechanismus a v kapitole (č. Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.) z zásobník nástrojů jsou uvedeny i další důvody, proč byl zvolen tento typ motoru.

## 10 Nalisování hřídele

Ke spojení hřídele s kleštinou bylo zvoleno řešení pomocí lisovaného spoje. Spoj nalisováním je jednoduchý, spolehlivý a hospodárný. Z hlediska pevnosti má výhodu v tom, že nezmenšuje nosný průřez hřídele. Uvažováno je konkrétně nalisování za tepla, jelikož při nalisování za studena dochází k poškození stykových ploch a část přesahu by se tedy strhla.

Základním materiálem kleštiny byla zvolena ocel typu ČSN 16532.4, která má maximální pevnost v tahu  $R_m$  1570 MPa a mez kluzu  $R_e$  1370 MPa [53]. Tento typ oceli je dobře obrobitelný, vhodný k povrchovému kalení a má vysokou pevnost. Pro následující výpočty je dalším důležitým parametrem součinitel tření  $f$ . Hodnota součinitele tření je zvolena na základě níže uvedené tabulky. Pro nalisování za studena jsou zvoleny hodnoty jednotlivých veličin následovně: součinitel tření  $f = 0,12$  poissonovo číslo  $\mu = 0,15$  a koeficient bezpečnosti  $k_w = 1,5$

Tab. 1: Přibližné hodnoty součinitele tření  $f$  za klidu pro nalisovaný spoj [29]

<i>materiál součástí, způsob výroby a lisování</i>	<i>f</i>
obě součásti z oceli, kalené a broušené, lisováno za studena	0,10 až 0,15
stejné materiály, plochy hladce obrobené, lisováno za studena	0,12 až 0,20
náboj z litiny, čep z oceli, lisováno za studena	0,10 až 0,16
obě součásti z oceli, plochy hladce obrobené, lisováno za tepla	0,15 až 0,25

Tab. 2: Doporučený koeficient bezpečnosti pro tažné materiály založený na mezi kluzu. [43]

Koeficient bezpečnosti	Znalost zatížení	Znalost dovoleného napětí	Znalost vlastností materiálu	Znalost prostředí
1.2-1.5	přesná	přesná	velmi dobrá	plně pod kontrolou
1.5-2.0	dobrá	dobrá	velmi dobrá	neměnná
2.0-2.5	dobrá	dobrá	průměrná	běžná
2.5-3.0	průměrná	průměrná	náhodně testovaná	běžná
3.0-4.0	průměrná	průměrná	nezkoušená	běžná
3.0-4.0	neurčitá	neurčitá		neurčitá

### 10.1 Výpočet nalisovaného spoje a okrajových podmínek

Pro výpočtový návrh nalisování hřídele do kleštiny lze použít postup pro návrh plného hřídele a náboje. Nejprve je nutné určit potřebný tlak  $p_{min}$ , který vznikne ve stykové ploše po nalisování v důsledku pružných deformací. Pro určení tohoto tlaku byl využit vztah uvedený níže. [30] Průměr hřídele v místě nalisování je  $d_p - 5$  mm. Pro výpočet byl použit vnější průměr kleštiny  $d_e - 9$  mm.



$$p_{min} = \frac{2 * k_w * M_k}{\pi * f * l * d_p^2} = \frac{2 * 1,5 * 0,059}{\pi * 0,12 * 0,005 * 0,005^2} = 3,75 \text{ [MPa]} \quad (1)$$



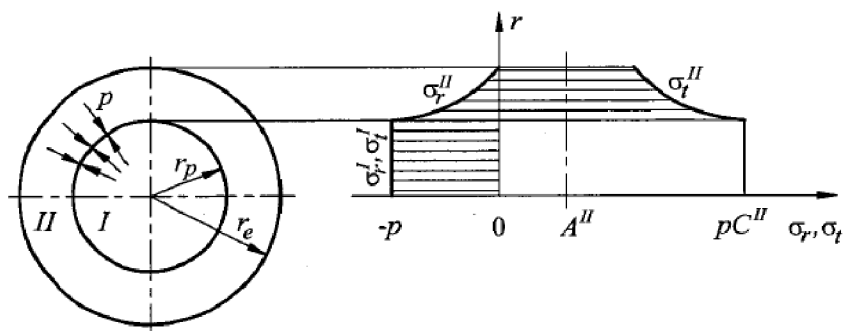
Obr. 20: Funkční rozměry hřídele v místě nalisování

Dalším krokem návrhu nalisovaného spoje je určení hlavních napětí, tedy radiálního  $\sigma_r$  a tečného  $\sigma_t$ . Pro tato napětí platí vztahy uvedené níže, kde A a B jsou integrační konstanty, které lze určit z okrajových podmínek. [30]

$$\sigma_r(r) = A - \frac{B}{r^2} \quad (2)$$

$$\sigma_t(r) = A + \frac{B}{r^2} \quad (3)$$

Pro určení přesahu na průměru nalisování, resp. poloměru  $r_{1p}$ , je nutné stanovit již zmíněná napětí. To však není možné bez stanovení okrajových podmínek. Pro případ nalisování plného hřídele a náboje jsou okrajové podmínky dány následujícími vztahy. [30]



Obr. 21: Průběhy napětí v hřídeli a náboji po nalisování [30]



Pro náboj:[30]

$$\sigma_r^{II}(r_{1P}) = -p_{min} \quad (4)$$

$$\sigma_r^{II}(r_e) = 0 \quad (5)$$

Pro hřídel:[30]

$$\sigma_r^I(r_{1P}) = -p_{min} \quad (6)$$

$$\sigma_r^I(0) = \sigma_t^I(0) \quad (7)$$

Po dosažení a úpravě vznikne vztah:[30]

$$\sigma_r^{II}(r_{1P}) = -p_{min} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_t^{II}(r_{1P}) &= p_{min} * \frac{r_e^2 + r_{1P}^2}{r_e^2 - r_{1P}^2} = 3,75 * \frac{0,0045^2 + 0,0025^2}{0,0045^2 - 0,0025^2} \\ &= p_{min} * C^{II} = 7,1 \text{ [MPa]} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sigma_r^I(r_{1P}) = -p_{min} \quad (10)$$

$$\sigma_t^I(r_{1P}) = -p_{min} \quad (11)$$

Díky zjištěným hodnotám radiálního a tečného napětí na průměru nalisování  $r_{1p}$  lze následně dopočítat také pružné deformace  $\Delta d_I^I$  a  $\Delta d_I^{II}$ , které vznikají při montáži spoje na průměru nalisování. Vztahy pro výpočet těchto deformací jsou uvedeny níže.[30]

$$\begin{aligned} \Delta d_I^I &= \frac{d_I}{E} * [\sigma_t^I(r_{1P}) - \mu * \sigma_r^I(r_{1P})] = \frac{d_1}{E} [-p_{min} + \mu * p_{min}] \\ &= \frac{5}{2,1 * 10^5} * [-3,75 + 0,3 * 3,75] \\ &= \mathbf{-0,0000626 \text{ [m]}} \end{aligned} \quad (12)$$

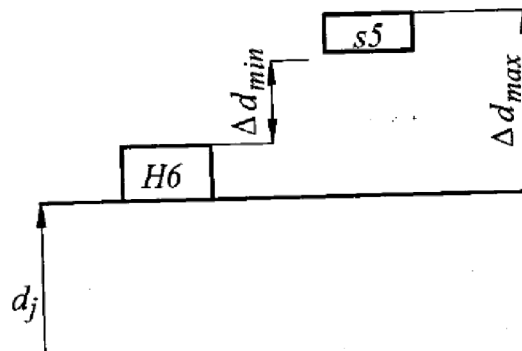
$$\begin{aligned} \Delta d_I^{II} &= \frac{d_I}{E} * [\sigma_t^{II}(r_{1P}) - \mu * \sigma_r^{II}(r_{1P})] = \frac{d_1}{E} [p_{min} * C^{II} + \mu * p_{min}] \\ &= \frac{5}{2,1 * 10^5} * [3,75 * 1,89 + 0,3 * 3,75] \\ &= \mathbf{0,0001961 \text{ [m]}} \end{aligned} \quad (13)$$

Následně je nezbytné dopočítat minimální přesah  $\Delta d_{min}$ , který způsobí ve stykové ploše minimální tlak  $p_{min}$ . Minimální přesah lze určit ze vztahu pro případ nalisování plného hřídele a náboje, který je uveden níže.[30]

$$C^{II} = \frac{\sigma_t^{II}(r_{1P})}{p_{min}} = \frac{7,1}{3,75} = \mathbf{1,89} [-] \quad (14)$$

$$\Delta d_{min} = \frac{d_I}{E} * p_{min} * (1 + C^{II}) = \frac{5}{2,1 * 10^5} * 3,75 * (1 + 1,89) = \mathbf{0,0002070 [m] = 0,2174 [\mu m]} \quad (15)$$

Nakonec bylo zvoleno toleranční pole H6 s tolerancí 0  $\mu\text{m}$  až 8  $\mu\text{m}$ . Minimální rozměr hřídele se následně určí přičtením minimálního přesahu k větší z hodnot tolerance H6. Výsledkem je tedy minimální průměr hřídele  $d_{min} = 5,0082 \text{ mm}$ . Toleranční pole hřídele bylo zvoleno r5, pro které platí rozmezí 15  $\mu\text{m}$  až 20  $\mu\text{m}$ . Jedná se o uložení s přesahem v rozmezí 7  $\mu\text{m}$  až 20  $\mu\text{m}$ .



Obr. 22: Tolerance jmenovitých průměrů součástí spojených nalisováním [30]

Pro maximální hodnotu přesahu musí z hlediska pevnostní kontroly náboje platit, že:[30]

$$\sigma_{Dt} = \frac{R_e}{k_w} = \frac{1370}{1,5} = \mathbf{913,3 [MPa]} \quad (16)$$

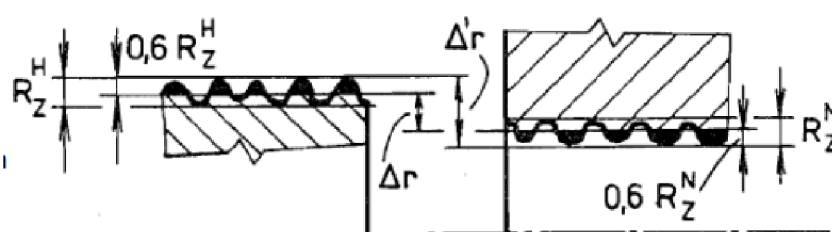
$$\Delta d_{max} \leq \frac{d_p}{E} * \sigma_{Dt} = \frac{5}{210000} * 913,3 = \mathbf{21,7 [\mu m]} \quad (17)$$

Což je splněno, protože pravá strana nerovnosti  $\Delta d_{max}$  má hodnotu 21,7  $\mu\text{m}$ .

Při nalisování za studena dochází k poškození styčných ploch, přičemž se část přesahu strhne. Je tedy nutně určit také minimální výrobní přesah  $w$ . [29]

Tab. 3: Doporučené hodnoty středních aritmetických odchylek  $R_a$  [29]

d [mm]	Ra [μm]		
	hřídel	náboj	
< 50	0,1	0,2	Za studena
	0,4	0,8	
	0,8	1,6	
50 + 120	0,8	1,6	Za tepla
120 + více	1,6	1,6	
0 + 250	1,6	1,6	
250 + více	1,6	3,2	



Obr. 23: Stržení povrchových nerovností při podélném lisování (za studena) [29]

$$w = 1,2 * (R_z^H + R_z^N) = 5,5 * (R_a^H + R_a^N) = 5,5 * (0,1 + 0,2) \quad (18)$$

$$= 0,00165 [\mu m]$$

Stanovení maximálního tlaku  $p_{max}$ . ve spoji. [29]

$$p_{max} = \frac{\Delta d_{max} - w}{d_p * \frac{1}{E} * (1 + C^H)} = \frac{0,02 - 0,00165}{5 * \frac{1}{210000} * (1 + 1,89)} \quad (19)$$

$$= 266,4 [MPa]$$

Nakonec je nutné spočítat velikost lisovací síly při nalisování za studena. [29]

$$F_L = F_T = F_N * f = \pi * d_p * L_L * p_{max} * f = \pi * 5 * 266,4 * 0,12 \quad (20)$$

$$= 2,5 [kN]$$

Z výpočtů uvedených výše vyplývá, že potřebná lisovací síla při nalisování hřídele do kleštiny za studena je 2,5 kN.

## 11 Ložiska

Na základě požadavků na kompaktnost celého návrhu byla zvolena vysoce přesná kuličková ložiska s kosoúhlým stykem. Tento typ byl zvolen, pro jeho schopnost přenášet velké otáčky. Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem se vyznačují vysokou přesností chodu, výkonností při vysokých otáčkách a vysokou tuhostí systému. Jsou ideální pro aplikace s velkými požadavky na přesnost, dále minimalizují hlučnost, vibrace a generování tepla.

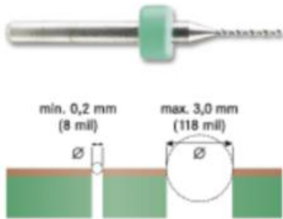
Tento typ ložisek umožňuje díky působení axiálních sil vymezit vůli mezi kroužky a valivými elementy. Dále lze nastavit vhodné předpětí a dosáhnout vyšší přesnosti při obrábění. Tento typ ložisek se instaluje v páru a jsou montována do „O“.

Na základě maximálních otáček servopohonu byl zvolen typ ložisek S71906 ACE/P4A od výrobce SKF. [39] Dále musí být dokoupena matice KM6 a pojistný kroužek MB6.[40][41]

### 11.1 Určení řezné síly

Standartně jsou materiály pro výrobu DPS složeny s více vrstev – elektricky vodivé vrstvy a sklolaminátu nebo tvrzeného papíru. Pro účely návrhu byl zjednodušeně uvažován jako materiál určený k obrábění slitina hliníku s křemíkem AlSi, ve které je obsah křemíku menší než 10 %. Je to z toho důvodu, že výrobce materiálů pro DPS neuvádí veřejně některé vlastnosti ostatních materiálů (tvrzený papír, sklolaminát), především měrný řezný odpor, nárůst měrné řezné síly a posuv na zub. Zároveň je tato slitina AlSi nejtvrdějším předpokládaným materiálem, který bude tato frézka obrábět. Standartní tloušťka DPS je 1,57 mm a pro tyto výpočty byla tedy uvažovaná stejně tlustá vzorová deska tvořená touto slitinou. Veškeré parametry potřebné k výpočtu jsou shrnuty v následující tabulce: Výpočty byly provedeny pro dvě obráběcí operace, a to frézování a vrtání, a to z toho důvodu, že je potřebné určit největší působící sílu pro následující podkapitolu. Největší síla bude při frézování 38.57 N. V rámci výpočtu byly uvažovány nástroje pro vrtání i frézování o průměru 3 mm.

**Spiral Drill 3 mm**



min. 0,2 mm  
(8 mil)

max. 3,0 mm  
(118 mil)

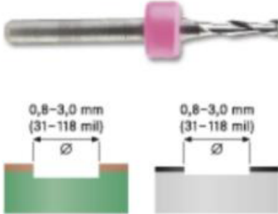
For drilling reference holes in base material.

AL (EN AW-5083)- Genuine LPKF material

Rotation Speed [rpm]: 25000  
 Z Speed [mm/s]: 1  
 Max Tool Life [strokes]: 900  
 Max penetration depth[mm]: 10  
 Z penetration step [mm]: 0,5  
 Diameter [mm]: 3

Obr. 24: Spirálový vrták s průměrem 3 mm [52]

**End Mill 2 mm**



0,8-3,0 mm  
(31-118 mil)

0,8-3,0 mm  
(31-118 mil)

For engraving aluminium front panels, for rub-out areas and wider isolation tracks.

AL (EN AW-5083)- Genuine LPKF material

Feed Speed [mm/s]: 3  
 Rotation Speed [rpm]: 25000  
 Max Tool Life [mm]: 7000  
 Max penetration depth[mm]: 7  
 Z penetration step [mm]: 0,3  
 Diameter [mm]: 2

Obr. 25: Stopková fréza s průměrem 2 mm [52]

Tab. 4.: Parametry potřebné pro výpočet řezných sil

Materiál	Značení	Frézování		Vrtání	
		AlSi <10%	Jednotky	AlSi <10%	Jednotky
Měrný řezný odpor [54]	$k_{c1.1}$	500	N/mm <sup>2</sup>	550	N/mm <sup>2</sup>
Nárůst měrné řezné síly [54]	$m_c$	0,25	-	0,25	-
Průměr nástroje	$D$	3	mm	3	mm
Počet zubů	$Z$	2	-	2	-
Posuv na zub	$s_z$	0,018	mm	-	-
Hloubka záběru	$a_p$	1,57	mm	-	-
Šířka záběru	$a_e$	1,5	mm	-	-
Otáčky	$n$	21000	ot/min	21000	ot/min
Posuv na otáčku	$f_n$	-	-	0,025	mm
Úhel	$\kappa$	-	-	45	°

### Určení řezných podmínek pro frézování zadaných hodnot [50]:

Řezná rychlost

$$V_c = \frac{n * \pi * D}{1000} = \frac{\pi * 21000 * 3}{1000} = \mathbf{197,9 \text{ [m/min]}} \quad (18)$$

Rychlost posuvu při frézování

$$V_f = s_z * z * n = 0,018 * 2 * 21000 = \mathbf{756 \text{ [m/min]}} \quad (19)$$

Střední tloušťka třísky při frézování

$$h_m = s_z * \sqrt{\frac{a_e}{D}} = 0,018 * \sqrt{\frac{1,5}{3}} = \mathbf{0,018 \text{ [mm]}} \quad (20)$$

Řezný odpor

$$k_c = k_{c1.1} * s_z^{-m_c} = 500 * 0,018^{-0,25} = \mathbf{1365 \text{ [MPa]}} \quad (21)$$

Potřebný výkon

$$P_M = \frac{a_p * a_e * V_f * k_c}{60 * 10^6} = \frac{1,57 * 1,5 * 756 * 1365}{60 * 10^6} = \mathbf{0,081 \text{ [W]}} \quad (22)$$

Řezná síla na zub

$$F_c = k_c * a_p * s_z = 1365 * 1,57 * 0,018 = \mathbf{38,57 \text{ [N]}} \quad (23)$$

Krouticí moment

$$M_k = F_c * \frac{D}{2 * 1000} = 38,57 * \frac{3}{2 * 1000} = \mathbf{0,0578 \text{ [Nm]}} \quad (25)$$

**Určení řezných podmínek pro vrtání ze zadaných hodnot [51]:**

Řezná rychlost

$$V_c = \frac{D_c * \pi * n}{1000} = \frac{3 * \pi * 21000}{1000} = \mathbf{197,9 \text{ [m/min]}} \quad (27)$$

Rychlost posuvu při vrtání

$$V_f = f_n * n = 0,025 * 21000 = \mathbf{525 \text{ [m/min]}} \quad (28)$$

Střední tloušťka třísky při vrtání

$$\begin{aligned} h &= f_z * \sin \kappa = \frac{f_n}{z} * \sin 45^\circ = \frac{0,025}{2} * \sin 45^\circ \\ &= \mathbf{0,0008839 \text{ [mm]}} \end{aligned} \quad (29)$$

Rychlost úběru materiálu

$$Q = \frac{D_c * f_n * V_c}{4} = \frac{3 * 0,025 * 197,8}{4} = \mathbf{3,71 \text{ [cm}^3\text{/min]}} \quad (30)$$

Řezný odpor

$$k_c = k_{c1.1} * (f_z * \sin \kappa)^{-m_c} = 500 * 0,008839^{-0,25} \\ = \mathbf{1630,7 \text{ [MPa]}} \quad (31)$$

Potřebný výkon

$$P_c = \frac{f_n * V_c * D_c * k_c}{240 * 10^3} = \frac{0,025 * 197,9 * 3 * 1630,7}{240 * 10^3} = \mathbf{0,101 \text{ [W]}} \quad (32)$$

Síla posuvu

$$F_t = 0,5 * k_c * \frac{D}{2} * f_n * \sin \kappa = 0,5 * 1630,7 * \frac{3}{2} * 0,025 * \sin 45^\circ = \\ \mathbf{21,62 \text{ [N]}} \quad (33)$$

Krouticí moment

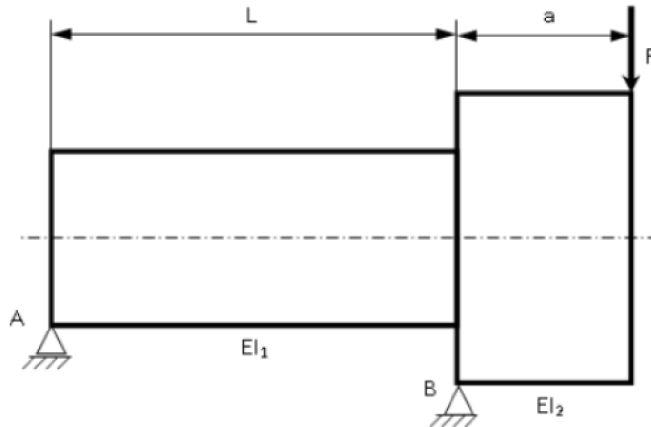
$$M_k = \frac{P_c * 30 * 10^3}{\pi * n} = \frac{0,096 * 30 * 10^3}{\pi * 21000} = \mathbf{0,04586 \text{ [Nm]}} \quad (34)$$

## 11.2 Určení optimální vzdálenosti ložisek

Pro dosažení co nejlepší přesnosti obrábění je nezbytné stanovit správnou vzdálenost mezi ložisky. Tato vzdálenost přímo ovlivňuje deformaci a průhyb vřetene. Čím větší je vzdálenost mezi ložisky tím menší síly působí v ložiskách, ale roste průhyb vřetene a naopak. Z tohoto důvodu je nutné spočítat optimální vzdálenost mezi ložisky, kterou lze určit z celkové deformace, která je daná součtem deformace vřetene a ložisek.

Samotný výpočet se skládá z dvou částí. Nejprve je nutné stanovit průhyb vřetene, v případě, že ložiska jsou uvažována jako tuhá. V druhé části je určena deformace ložisek a průhyb vřetene, které je považováno za tuhé. Pro kompletní výpočet je nutné využít parametrického vyjádření průhybové čáry, z tohoto důvodu byl pro výpočet vytvořen zjednodušený model.



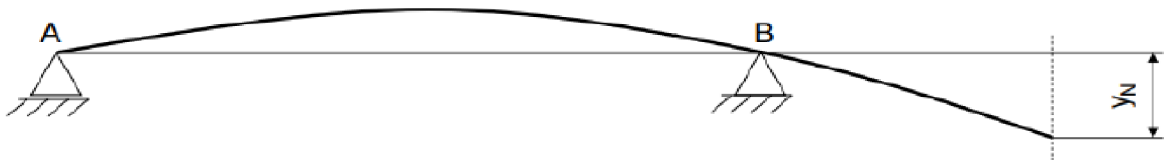


Obr. 26: Výpočtový model vřetene [32]

V prvním kroku je nutné spočítat kvadratický moment výpočtového modelu. Konkrétně se jedná o kvadratický moment v ohybu na obou koncích vřetene.[32]

$$I_1 = \frac{\pi * (D^4 - d_1^4)}{64} = \frac{\pi * (30^4 - 21^4)}{64} = 30214 \text{ [mm}^4\text{]} \quad (35)$$

$$I_1 = \frac{\pi * (D^4 - d_2^4)}{64} = \frac{\pi * (30^4 - 14^4)}{64} = 37875 \text{ [mm}^4\text{]} \quad (36)$$



Obr. 27: Průhyb vřetene zatíženého silou F za předpokladu, že ložiska jsou tuhá [32]

Dále je možné určit deformaci vřetene v závislosti na vzdálenosti L mezi ložisky, za použití vztahu uvedeného níže. Pro všechny následující výpočty v této kapitole byla použita vzdálenosti L- 81 mm.[32]

$$\begin{aligned} y_N &= \frac{F * a^2 * L}{3 * E * I_1} + \frac{F * a^3}{3 * E * I_2} \\ &= \frac{38,57 * 27^2 * 81}{3 * 2,1 * 10^5 * 30214} + \frac{38,57 * 27^3}{3 * 2,1 * 10^5 * 37875} \\ &= 0,1515 \text{ [}\mu\text{m]} \end{aligned} \quad (37)$$

Následně je možné spočítat deformaci obou ložisek a jejich vliv na průhyb vřetene. Ve výpočtu se vřeteno považuje za dokonale tuhé a je brána v úvahu pouze deformace

ložisek. Parametry potřebné pro výpočet deformace obou ložisek jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 5: Parametry ložiska typu S71906 ACE/P4A, potřebné pro výpočet optimální vzdálenosti ložisek [39]

Zkratka	Parametry	Název
$\alpha$	25 [°]	Úhel styku ložiska
$D_w$	4,762 [mm]	Průměr valivého elementu
$F_r$	[N]	Zatížení ložiska v radiálním směru
$i$	1 [-]	Počet řad valivých tělísek
$z$	18 [-]	Počet valivých tělísek v jedné řadě

Výpočet síly v ložiskách A a B, která působí na valivý element při zatížení. [32]

$$Q_a = \frac{5 * F_a}{i * z * \cos \alpha} = \frac{5 * 12,85}{1 * 18 * \cos 25} = \mathbf{3,94 [N]} \quad (38)$$

$$Q_b = \frac{5 * F_b}{z * \cos \alpha} = \frac{5 * 51,43}{18 * \cos 25} = \mathbf{15,76 [N]} \quad (39)$$

Síly působící v jednotlivých ložiskách A a B při určité vzdálenosti. [32].

$$R_a = \frac{a * F}{L} = \frac{27 * 38,57}{81} = \mathbf{12,85 [N]} \quad (40)$$

$$R_b = \frac{F * (a + L)}{L} = \frac{38,57 * (27 + 81)}{81} = \mathbf{51,43 [N]} \quad (41)$$

Pružnou deformaci vysoce přesných kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem lze určit ze vztahu.[32]

$$y_a = \left( \frac{44 * 10^{-5}}{\cos \alpha} * \sqrt[3]{\frac{Q_a^2}{D_w}} \right) * 1000$$

$$= \left( \frac{44 * 10^{-5}}{\cos 25} * \sqrt[3]{\frac{3,94^2}{4,762}} \right) * 1000 = \mathbf{0,7200 [\mu m]} \quad (42)$$

$$\begin{aligned}
 y_b &= \left( \frac{44 * 10^{-5}}{\cos \alpha} * \sqrt[3]{\frac{Q_b^2}{D_w}} \right) * 1000 \\
 &= \left( \frac{44 * 10^{-5}}{\cos 25} * \sqrt[3]{\frac{15,76^2}{4,762}} \right) * 1000 = \mathbf{1,8143 [\mu m]}
 \end{aligned}
 \tag{43}$$

Výslednou deformaci lze určit z podobnosti trojúhelníku.[32]



Obr. 28: Průhyb vřetene za předpokladu, že ložiska jsou poddajná a vřeteno tuhé [32]

$$\begin{aligned}
 y_P &= \frac{(y_a + y_b) * (a + L)}{L} - y_a \\
 &= \frac{(0,7200 + 1,8143) * (27 + 81)}{81} - 0,7200 \\
 &= \mathbf{2,659 [\mu m]}
 \end{aligned}
 \tag{44}$$

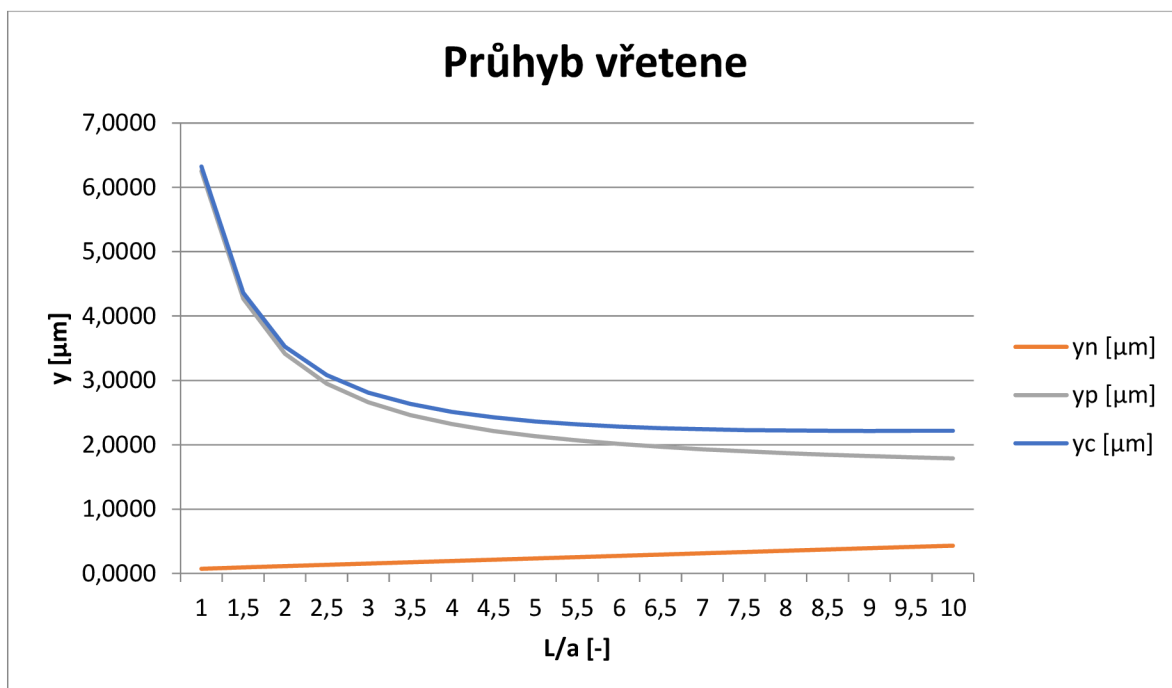
Optimální vzdálenost ložisek vřetene se určí jako nejmenší součet deformací ložisek a vřetene. Toto lze určit graficky v závislosti na hledané vzdálenosti ložisek L nebo poměru L/a. [32]

$$y_C = y_N + y_P = 2,659 + 0,1515 = \mathbf{2,8105 [\mu m]}
 \tag{45}$$

Z výše uvedených vztahů a hodnot je vytvořená tabulka a graf, ve kterých je uvedena a znázorněna deformace vřetene, ložisek a jejich součet.

Tab. 6: Hodnoty deformace ložisek a vřetene, jejich součet v závislosti na vzdálenosti ložisek

L/a [-]	L [mm]	$\gamma_n$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\gamma_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\gamma_b$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\gamma_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\gamma_c$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	27	0,0690	1,4592	2,3163	6,0918	6,1608
1,5	40,5	0,0881	1,1136	2,0512	4,1611	4,2492
2	54	0,1073	0,9192	1,9121	3,3277	3,4351
2,5	67,5	0,1265	0,7922	1,8261	2,8734	2,9999
3	81	0,1457	0,7015	1,7677	2,5907	2,7364
3,5	94,5	0,1649	0,6330	1,7253	2,3991	2,5640
4	108	0,1841	0,5791	1,6932	2,2613	2,4454
4,5	121,5	0,2032	0,5353	1,6681	2,1577	2,3609
5	135	0,2224	0,4990	1,6478	2,0771	2,2996
5,5	148,5	0,2416	0,4683	1,6311	2,0128	2,2544
6	162	0,2608	0,4419	1,6171	1,9603	2,2211
6,5	175,5	0,2800	0,4190	1,6053	1,9167	2,1966
7	189	0,2991	0,3988	1,5950	1,8799	2,1790
7,5	202,5	0,3183	0,3808	1,5862	1,8484	2,1668
8	216	0,3375	0,3648	1,5784	1,8213	2,1588
8,5	229,5	0,3567	0,3503	1,5715	1,7976	2,1543
9	243	0,3759	0,3372	1,5654	1,7768	2,1526
9,5	256,5	0,3951	0,3253	1,5599	1,7583	2,1534
10	270	0,4142	0,3144	1,5549	1,7418	2,1561



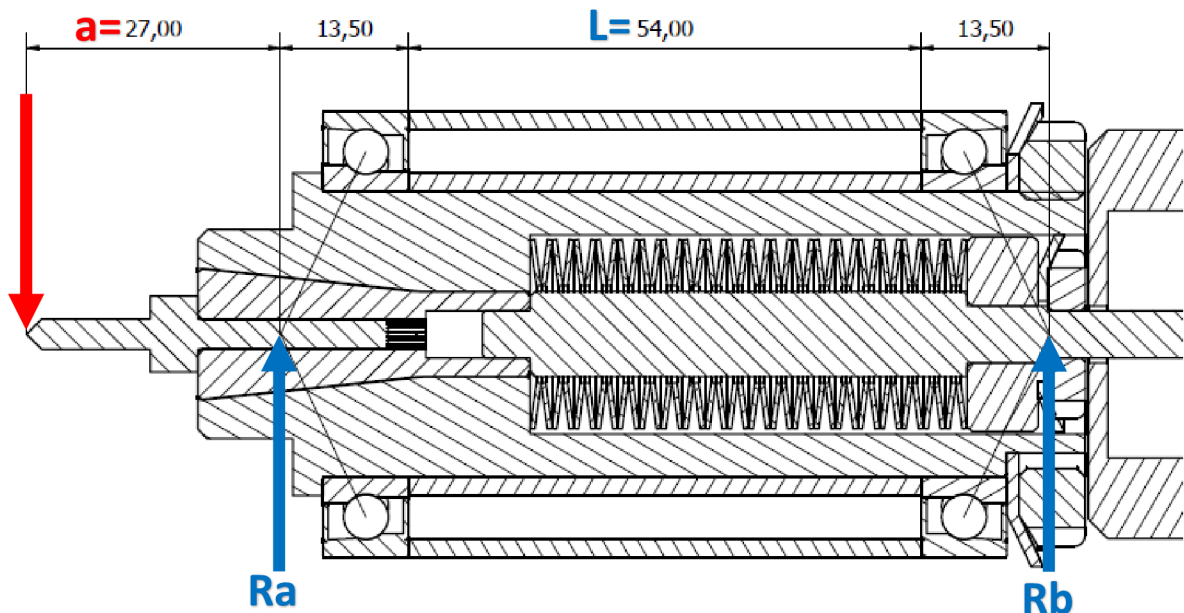
Graf. 1: Závislost deformace vřetene na vzdálenosti ložisek

Z vypočtených hodnot lze usoudit, že vhodná vzdálenost ložisek  $L$  je až 9 násobek vzdálenosti  $a$ , čemuž odpovídá  $L=243$  mm. S ohledem na co nejmenší rozměry celého konstrukčního řešení byla zvolena nejmenší možná vzdálenost  $L=81$  mm.

Samotný výpočet optimálního uložení ložisek je v této práci spíše informativní a není pro samotný návrh až tolik podstatný, a to kvůli tomu, že zjednodušeně určené síly, které při obrábění s uvažovanými parametry vznikají, jsou velmi malé.

### 11.3 Kontrola životnosti ložisek

U ložisek je důležité zkontrolovat jejich životnost, která je dána jejich dynamickou únosností a zatížením na jednotlivá ložiska. Řezná síla ( $F = 38,57$  N) působí na konci nástroje.[32]



Obr. 29: Schéma výpočtu reakcí v ložiskách

$$R_a + R_b = F \quad (46)$$

$$R_a * a = F * (a + L) \quad (47)$$

$$R_b = \frac{F * (a + L)}{L} = \frac{38,57 * (27 + 81)}{81} = 51,43 \text{ [N]} \quad (48)$$

$$R_a = F - R_b = 38,57 - 51,43 = -12,85 \text{ [N]} \quad (49)$$

$R_a$ , a  $R_b$  jsou síly působící v jednotlivých ložiskách. Po určení velikosti sil na jednotlivá ložiska, je možné spočítat jejich životnost za pomoci vztahu uvedeného níže. Díky tomu, že obě ložiska jsou totožná, postačí kontrola pouze více zatěžovaného ložiska. Dynamická únosnost zvoleného ložiska je dle katalogu  $C=5400$  N [39].  $p$  je exponent trvanlivosti který má hodnotu 3 pro kuličkové ložiska [30]. Otáčky vřetena jsou totožné s optimálními katalogovými otáčkami motoru. V tomto případě je ekvivalentní zatížení dáno vztahem  $P = R_b$ , protože není počítáno s axiálními silami.[30]

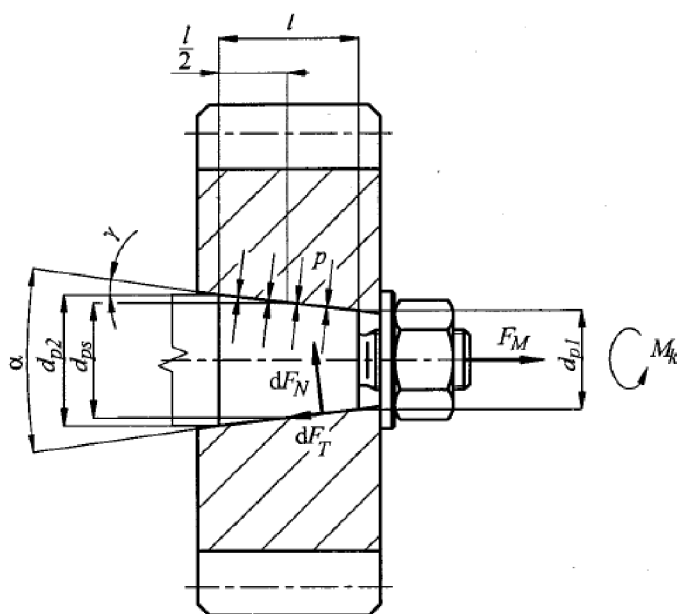
$$L_{h10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p * \frac{10^6}{60 * n} = \left(\frac{5400}{51,43}\right)^3 * \frac{10^6}{60 * 21100} = \mathbf{914027 \text{ [hod]}} \quad (50)$$

V případě provozu servopohonu v blízkosti maximálních otáček, jejichž hodnota je  $n_{max} = 34500$  ot/min, se životnost ložisek sníží zhruba na  $L_{h10} = \mathbf{559013 \text{ [hod]}}$ .

## 12 Upínací mechanismus

V praxi se pro upínání nástroje obvykle používá normovaný kužel. S ohledem na požadavky na kompaktnost nástrojové hlavy, nebylo v tomto případě použito existující řešení, které lze na trhu najít, ale byl použit vlastní návrh s využitím talířových pružin a zdvihacího elektromagnetu. Tento navržený upínací mechanismus je důkladněji popsán dále v této kapitole.

Navrhovaná kleština má kuželovou a válcovou část, avšak z výpočtového hlediska je podstatná především část kuželová, kde dochází k přenosu veškerého výkonu.



Obr. 30: Silové a momentové poměry svěrného spoje s kuželovou stykovou plochou při montáži [30]

Tab. 7: Parametry potřebné pro výpočet svěrného spoje

Značení	Parametry	Název
$d_{p1}$	0,0139 [m]	Průměr širší části kužele
$d_{p2}$	0,009 [m]	Průměr užší části kužele
$l$	0,0235 [m]	Délka kužele
$\gamma$	6 [°]	Úhel kužele
$f$	0,05 [-]	Třecí koeficient
$k_w$	1,5 [-]	Koeficient bezpečnosti
$M_k$	0,059 [Nm]	Krouticí moment servopohonu
$d_{ps}$	0,01145 [m]	Střední průměr kužele

K výpočtu jsou využity vzorce pro výpočet svěrného spoje s kuželovou stykovou plochou.[30]

$$p_{min} = \frac{2 * k_w * M_k * \cos \gamma}{\pi * f * l * d_{ps}^2} = \frac{2 * 0,059 * 1,5 * \cos 6}{\pi * 0,05 * 0,0235 * 0,01145^2} \quad (51)$$

$$= \mathbf{0,363 \text{ [MPa]}}$$

$$F_{M2} = \int_0^{2\pi} p_{min} (\sin \gamma + f \cos \gamma) \frac{l}{\cos \gamma} \frac{d_{ps}}{2} d\alpha \quad (52)$$

$$= \pi * p_{min} * (\tan \gamma + f) * l * d_{ps}$$

$$= \pi * 0,363 * (\tan 6 + 0,05) * 0,0235 * 0,01145$$

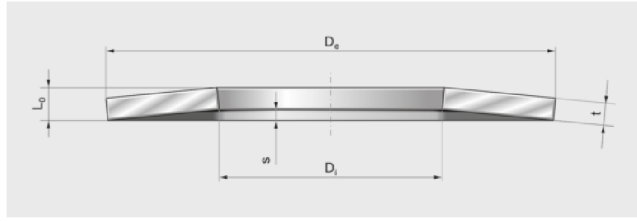
$$= \mathbf{48 \text{ [N]}}$$

Na základě těchto výpočtů bylo možné vybrat vhodnou pružinu. Pro návrh byly uvažovány dvě varianty. První variantou je použití talířových pružin od výrobce Hennlich. Pro dimenzování těchto talířových pružin byl využit software MITCALC. Druhou uvažovanou variantou je použití tlačné pružiny od společnosti Sodemann. Na základě výpočtů obou variant se jeví jako vhodnější použití tlačné pružiny. Hlavním důvodem je jednoduchost jejího použití a její cena.

### **Výpočet pro užití talířové pružiny**

Pro tuto variantu byla vybrána talířová pružina číslo 0195 od výrobce Hennlich [33] o parametrech uvedených v tabulce. Zvolena byla pružina s nejmenší nutnou silou pro její stlačení. Zvolenou pružinu lze stlačit o 0,1 mm při použití přitlačné síly 59 N. Při použití 72 takovýchto pružin lze dosáhnout maximálního zdvihu 3 mm. Pro výpočet byl použit software MITCALC a výsledky jsou shrnuty na Obr. 32: Výpočtová tabulka pro návrh s použitím talířových pružin .





Obr. 31: Talířová pružina číslo DIN 2093 [33]

Tab. 8: Talířové pružiny DIN 2093 [33]

D <sub>e</sub> [mm]	D <sub>i</sub> [mm]	t [mm]	l <sub>0</sub> [mm]	S <sub>1</sub> [mm]	F <sub>1</sub> [N]	S <sub>2</sub> [mm]	F <sub>2</sub> [N]	S <sub>3</sub> [mm]	F <sub>3</sub> [N]	F <sub>c</sub> [N]	M [g]	Číslo zboží
20,0	8,2	0,60	1,30	0,18	214	0,35	342	0,53	412	453	1,23	0190
	8,2	0,70	1,35	0,16	262	0,33	442	0,49	569	668	1,44	0191
	8,2	0,80	1,40	0,15	315	0,30	557	0,45	751	921	1,64	0192
	8,2	0,90	1,45	0,14	374	0,28	685	0,41	954	1201	1,85	0193
	8,2	1,00	1,55	0,14	494	0,28	917	0,41	1294	1648	2,05	0194
	10,2	0,50	0,90	0,10	59	0,20	102	0,30	136	165	0,91	0195
	10,2	0,50	1,15	0,16	141	0,33	219	0,49	254	268	0,91	C 0200
	10,2	0,80	1,35	0,14	304	0,28	547	0,41	748	929	1,46	B 0200
	10,2	0,90	1,45	0,14	412	0,28	754	0,41	1050	1323	1,64	0196
	10,2	1,00	1,55	0,14	544	0,28	1010	0,41	1425	1815	1,82	0197
	10,2	1,10	1,55	0,11	548	0,23	1050	0,34	1521	1976	2,01	A 0200
	10,2	1,25	1,75	0,13	890	0,25	1708	0,38	2477	3222	2,28	0198
	10,2	1,50	1,80	0,07	857	0,15	1695	0,23	2521	3340	2,74	0199

### Výpočet pružin

Mezní zatížení	—
Provozní zatížení	—
Plné stlačení	—

---

**6.1 Návrh pružiny**

6.2 Minimální pracovní zatížení F1 = 48,00 [N]

6.3 Maximální pracovní zatížení F8 = 165,00 [N]

6.4 Pracovní zdvih pružiny H = 0,1000 [mm]

6.5 Max. dovolené stlačení pružiny s8/s5 = 0,3

6.6 Počet paralelně uložených disků v sadě n = 3

6.7 Počet sériově uspořádaných sad (disků) i = 24

6.8 Vnější průměr disku De = 20,0000 [mm]

6.9 Vnitřní průměr disku Di = 10,2000 [mm]

6.10 Tloušťka materiálu t = 0,5000 [mm]

6.11 Výška disku h = 0,9000 [mm]

6.12 Vnitřní výška disku h0 = 0,4000 [mm]

**6.16 Kontrolní údaje**

6.17 Poměr průměrů De/Di = 1,96

6.18 Poměrná výška disku h0/t = 0,80

6.19 Maximální (plné) stlačení pružiny s5 = 9,6 [mm]

6.20 Poměrné stlačení pružiny s8/s5 = 0,24

6.21 Síla plně stlačené pružiny Fs = 477,4 [N]

6.22 Max. dovolené zatížení pružiny F8<sub>max</sub> = 197,7 [N]

6.23 Celková hmotnost pružiny m = 0,066 [kg]

**6.24 Konstrukční parametry**

6.25 Celkový počet disků v pružině = 72

6.26 Volná délka pružiny L0 = 45,60 [mm]

6.27 Délka plně stlačené pružiny Ls = 36,00 [mm]

6.28 Deformační energie pružiny W8 = 0,201 [J]

**Předběžný návrh**

159	<
56	<
1,7	<

**6.13 Výpočet**

158,851992	<	230,94%
55,5499189	<	-66,33%
1,715625	<	1615,63%

Vypočítat

**6.14 Výběr pružiny** 61/242

20 x 10,2 x 0,5 x 1,15 \*

**6.15 Vyhledání pružiny**

ΔH [%]	n <sub>max</sub>	i <sub>max</sub>
-5	+5	3

Vyhledat

Hledat další

**6.29 Pevnostní kontrola (statické zatížení)**

6.30 Dovolené napětí v tlaku σ <sub>pD</sub>	1965	[MPa]
6.31 Max. tlakové napětí σ <sub>p8</sub>	341,5	[MPa]
6.32 Max. tahové napětí σ <sub>T8</sub>	191	[MPa]
6.33 Doporučená míra bezpečnosti	1,00	
6.34 Míra bezpečnosti	5,75	

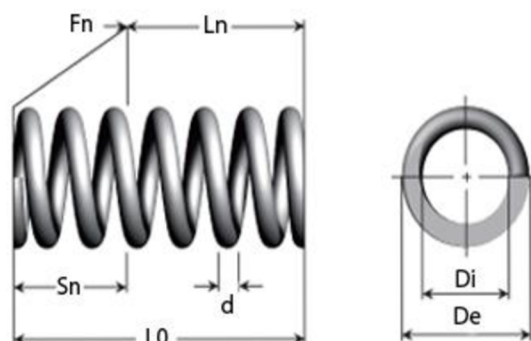
**6.35 Parametry pracovního cyklu**

	1	8	9	
Síla F <sub>i</sub>	48,0	165,0	477,4	[N]
Stlačení s <sub>i</sub>	0,61	2,33	9,6	[mm]
Délka L <sub>i</sub>	44,99	43,27	36	[mm]
Napětí σ <sub>pi</sub>	93,2	341,5	1175,5	[MPa]
Tuhost k <sub>i</sub>	75,67	61,21	33,81	[N/mm]

Obr. 32: Výpočtová tabulka pro návrh s použitím talířových pružin [57]

## Výpočet pro užití tlačné pružiny

Na základě tohoto výpočtu byla vybrána tlačná pružina C08500851750S, jejíž maximální síla je 75,55 N a tuhost pružiny je 4,35 N/mm. Aby byla vyvinuta síla 47,8 N, pružina se musí předeprnout.[42]



Materiál	Nerezová ocel 302
d - Průměr drátu (mm)	2.16
De - Vnější průměr (mm)	21.59
Di - Vnitřní průměr (mm)	17.27
L0 - Délka bez zatížení (mm)	44.45
Ln - Max. délka při zatížení (mm)	27.10
Sn - Maximální zdvih (mm)	17.35
F <sub>n</sub> - Maximální zatížení při Ln (N)	75.55
R - Tuhost pružiny (N/mm)	4.35
Řada	B

Obr. 33: Parametry tlačné pružiny Sodemann C08500851750S [56]

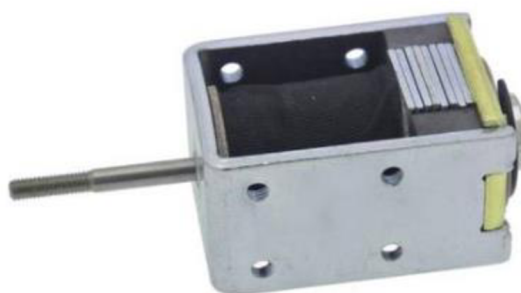
$$y = \frac{F_M}{R} = \frac{47,7}{4,35} = 10,9 \text{ mm} \quad (53)$$

Aby byla vyvozena dostatečná síla k přenosu kroutícího momentu na nástroj, musí být pružina stlačena o 10,9 mm. Při uvolnění nástroje z vřetene musí být pružina stlačena ještě o další 3 mm. Výsledná síla působící na pružiny k uvolnění nástroje bude:[42]

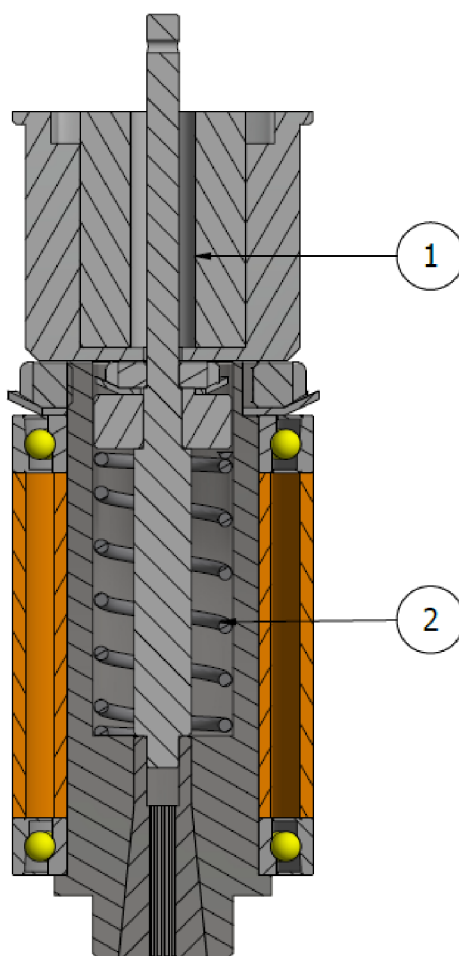
$$F_{M \max} = (y + 3) * R = (10,9 + 3) * 4,35 = 60,7 \text{ N} \quad (54)$$

Vypočtená síla  $F_{M \max}$  bude potřeba k výpočtu uvolňovacího mechanismu.

Pro stlačení těchto pružin je použita elektromagnetická cívka z tlačného elektromagnetu od výrobce Tremba, a to konkrétně typ ITS-LS-4035-D-24VDC o síle 75 N. Ostatní komponenty tvořící tento elektromagnet nejsou pro účely tohoto konstrukčního návrhu potřebné. Cena tohoto elektromagnetu je 464 Kč. Pro tento typ jsou tedy parametry vybrané pružiny vhodné, jelikož jej nebude nutné využívat na plný výkon.



Obr. 34: Tremba HMA-2622d.002-24VDC [34]



Obr. 35: Upinací mechanismus v řezu: 1 – Zdvihací elektromagnet, 2 – tlačná pružina – 1 ks

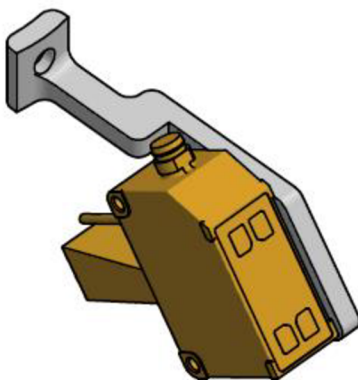
## 13 Rotační a odměřovací mechanismus

Navrhovaná fréza s AVM musí splňovat velmi důležitou podmínku a tou je odměřování vzdálenosti nástroje od obráběného materiálu v reálném čase s možností měnit svou pozici vůči vertikálnímu směru. K tomuto účelu byl po konzultaci s výrobcem vybrán triangulační snímač OD Mini OD1-B100C50I14 od společností SICK. Cena tohoto snímače včetně kabelu 25051 Kč Tento snímač dokáže spolehlivě měřit vzdálenost pod sklonem až  $45^\circ$  za normálních podmínek, v případě vystavení přímému slunečnímu svitu pod sklonem maximálně  $30^\circ$ .

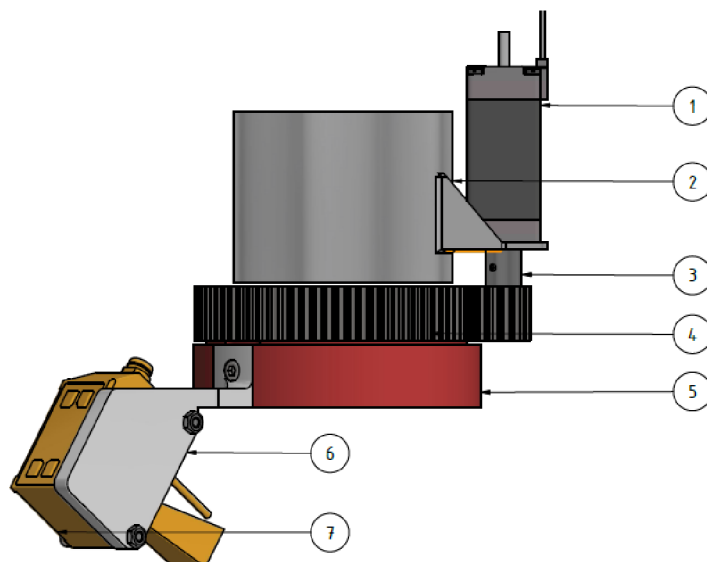


Obr. 36: Sensor OD-Mini B100C50I14 [36]

Ke správné funkci celého aparátu je nezbytné, aby laserový paprsek vždy snímal oblast před nástrojem ve směru jeho pohybu. Tato funkce je umožněna díky otočnému mechanismu, na kterém je laserový snímač připevněn. Rotační mechanismus se skládá z krokového motoru (č.1), držáku krokového motoru (č.2) a hnacího ozubeného kola (č.3). Odměřovací mechanismus je složen z hnaného ozubeného kola (č.4), otočného rámu (rotoru č.5), držáku laseru (č.6) a laseru SICK (č.7). [36]



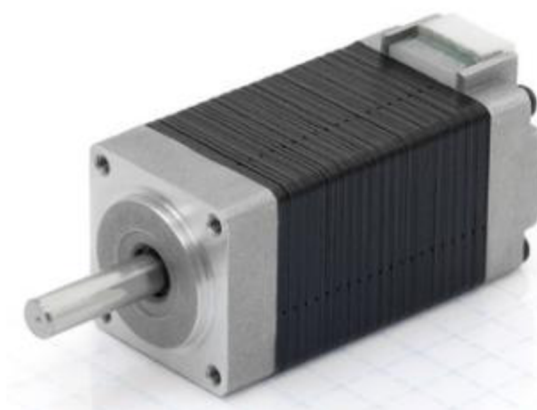
Obr. 37: Držák na laser SICK



Obr. 38: Rotační a odměřovací mechanismus

Většina z komponent rotačního mechanismu jsou kusové výroby, až na ozubené soukolí, které lze zakoupit z dostupných zdrojů na trhu a dodatečně obrobit podle výkresu.

Na soukolí, které převádí krouticí moment z krokového motoru typu ST2018L0804-B od společnosti NANOTEC PLUG&DRIVE, nejsou kladeny nijak zásadní požadavky, jelikož se jedná pouze otáčení rotačního mechanismu. Jediným podstatným parametrem, který je musí tento pohon splňovat, je přesnost otáčení. Tento typ motoru má přesnost  $1.8^\circ/\text{krok}$ . Na základě známých rozměrů mechanismu bylo možné vybrat vhodné rozměry ozubených kol z katalogů výrobců NORELEM. Není tedy nutné řešit korekce zubů. Cena tohoto krokového motoru je 1150 Kč.



Obr. 39: ST2018L0804-B Stepper motor NEMA 8 [35]

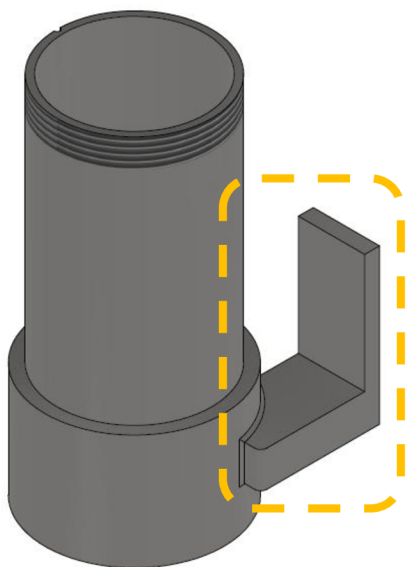
## 14 Posuvný mechanismus

Jak již bylo zmíněno dříve, jedna ze základních podmínek zadání této práce je funkce změny výšky frézovací hlavy v reálném čase. To je umožněno díky triangulačnímu laserovému snímači od společnosti SICK a CNC lineárnímu pohonu s krokovým motorem se závitovou tyčí. Krokový motor je bipolární, což umožňuje chod ve směru i proti směru otáčení hodinových ručiček.



Obr. 40: CNC lineární pohon s krokovým motorem [40]

Tento CNC lineární pohon, který zajišťuje vertikální pohyb frézovací hlavy, je řešení dostupné na trhu a umožňuje zdvih 50 až 60 mm. Cena této sestavy se liší dle dodavatele, nicméně se pohybuje v rozmezí od přibližně 1300,- až do 3000,-. Tento lineární pohon je spojen s posuvnou pákou pomocí šroubů, přičemž posuvná páka je k tělu nástrojové hlavy – tubusu přivařena. Posuvná páka (na obrázku vyznačená oranžově) je navržena v softwaru Autodesk Inventor jako prototyp, a to z důvodu, že při tvorbě této práce nebyl k dispozici 3D model uvažovaného lineárního pohonu. V případě zakoupení tohoto typu lineárního pohonu bude nezbytné konstrukci posuvné páky upravit tak, aby byla proveditelná montáž pohonu a posuvné páky.

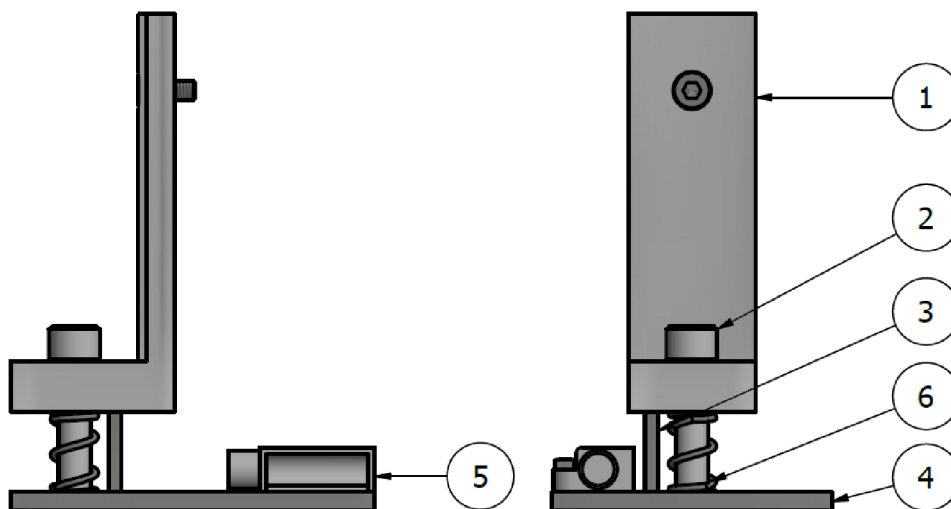


Obr. 41: Posuvná páka přivařena k tubusu

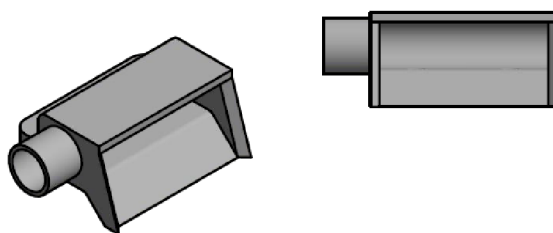
## 15 Příkladný mechanismus s odsávacím zařízením

Příkladný mechanismus se skládá z pěti částí. Základním prvkem je tělo samotného přítláčeného mechanismu, které má tvar písmene L. V horní části je tělo připevněno k rotačnímu mechanismu nástrojové hlavy pomocí šroubu. Ve jeho spodní části jsou dva otvory, které jsou určeny pro naváděcí prvek a stabilizační kolík přítláčeného mechanismu. Naváděcí prvek je přišroubován k přítláčené desce a je osazen pružinou od společnosti Sodemann **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, která je zvolena na základě maximální síly při frézování, která je vypočtena v kapitole 11.1. Stabilizační kolík má následně funkci zamezení rotace celého přítláčeného mechanismu.

Odsávací zařízení třísek je umístěno na přítláčeném mechanismu, konkrétně na přítláčené desce. Na hrdlo tohoto odsávacího zařízení bude připojena pružná hadice o průměru přibližně 6 mm. Samotné odsávací zařízení bude zhotoveno za pomoci 3D tiskárny. Přítláčená deska, ke které je odsávací zařízení upevněno, je zhotovena jako výpalek pomocí laserového paprsku. Odsávací zařízení bude k desce připevněno za pomoci dvou šroubů.



Obr. 42: Příkladný mechanismus: 1 – Tělo přítláčeného mechanismu, 2 – Naváděcí prvek, 3 – Stabilizační kolík, 4 – Přítláčená deska, 5 – Odsávací zařízení, 6 - Tlačná pružina od společnosti Sodemann [56]



Obr. 43: Odsávací zařízení v detailu

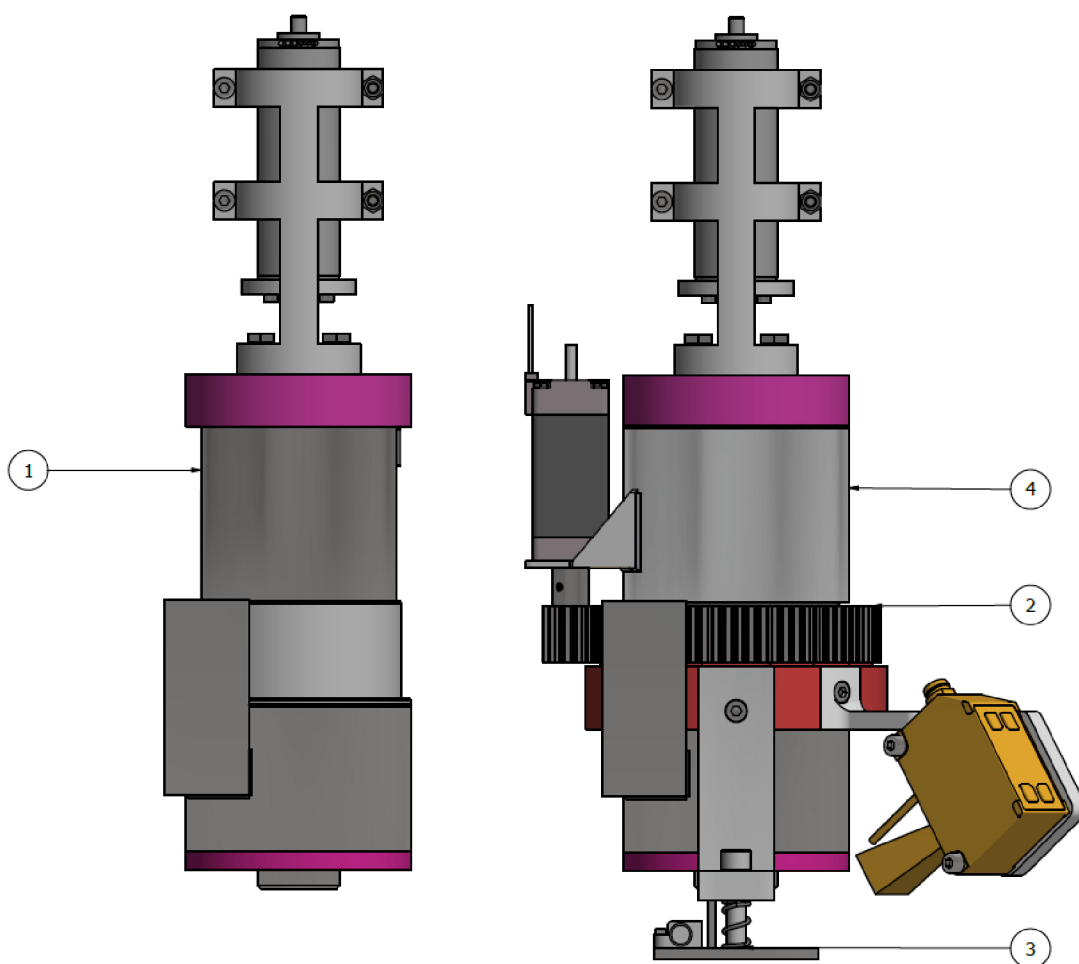


## 16 Výsledný návrh frézovací hlavy

Vlastní návrh upínacího mechanismu (č.1) je poháněn hnacím servopohonem a splňuje hlavní podmínku danou zadáním DP, čímž je AVN. Kapitoly věnující se návrhu AVN jsou uvedeny dále v práci

Rotační (č.4) a odměřovací (č.2) mechanismus se skenerem SICK. Díky této sestavě je možné měnit polohu snímače od 0° do 180°. Laser umožňuje odměřovat vzdálenost nástroje od materiálu v reálném čase. Bližší popis je uveden v kapitole 13.

Přítlačný mechanismus (č.3) s odsávacím zařízením, které jsou blíže popsány v předchozí kapitole 15.



Obr. 44: Vlastní návrh hlavy s AVN a odměřováním vzdálenosti v reálném čase

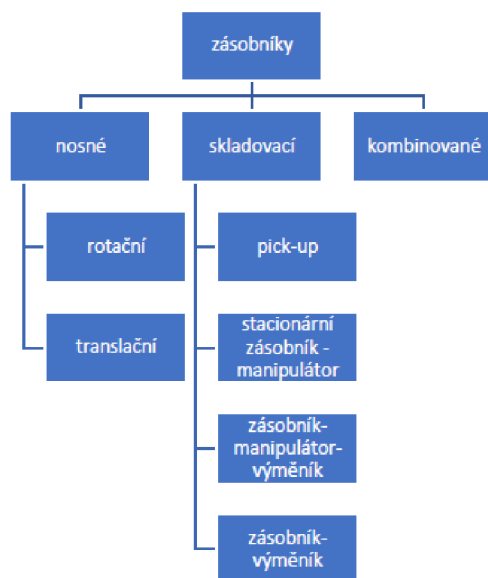


# Automatická výměna nástrojů

## 17 Automatická výměna nástrojů

Automatická výměna nástrojů ve zkratce AVN, je seskupení uzlů, které slouží k práci s nástrojovou jednotkou v obráběcích centrech: odkládání, manipulace, polohování a upnutí. Výhoda AVN je především v tom, že není třeba použití lidské síly. AVN je jedna z nejdůležitějších součástí moderních CNC, které umožňují jejich plynulý a nepřetržitý chod. Díky velké škále konstrukčních řešení můžeme zajistit optimální využití AVN v CNC při daných technologických operacích.

Při konstrukci AVN je nutné brát ohled na specifické požadavky. Doba trvání výměny nástrojů musí být co nejkratší, jelikož spadá do skupiny vedlejších časů. Od AVN se očekává vysoká pracovní spolehlivost s ohledem na vysokou cenu stroje a velkou četnost výměny nástrojů. Pro konkrétní oblast využití a technologie je důležité zvážit optimální kapacitu zásobníku, správný typ zásobníku a manipulátoru, které by měly mít správně ustavení polohy v místě výměny. AVN musí být odolná proti všem druhům znečištění (řezné kapaliny, třísky, ...).[25]



Obr. 45: Rozdělení typů zásobníků z hlediska přenosu sil a výměny nástroje [25]

To, jak budou nástroje skladovány, tedy konstrukční řešení zásobníku, je dáno typem používaných nástrojů a typem nástrojového držáku. Typ nástrojů a typ použitého držáku ovlivňuje následně také způsob upnutí v zásobníku. Při návrhu je nutné znát parametry stroje (maximální rozměr, hmotnost), což následně určuje tuhost konstrukce. Nelze zapomenout také na bezpečnost, jelikož pohyblivé části představují vysoké riziko pro člověka, a proto musí být odděleny tak, aby se do tohoto prostoru za chodu stroje nemohla dostat žádná osoba.

## 17.1 Nosné zásobníky

Zásobníky nástrojů lze rozdělit na dvě skupiny podle toho, jestli přenáší řezné síly nebo nepřenášejí. Nosné zásobníky přenášejí řezné síly od nástroje do rámu stroje. Nejčastěji se tato konstrukce objevuje v podobě revolverové hlavy. Nástroj upnutý ve stroji může být buď poháněný nebo nepoháněný. Výhodou tohoto řešení je rychlá výměna nástrojů a kompaktní řešení, lze do něj však upnout pouze omezené množství nástrojů pro daný pracovní stroj. Nejčastěji se lze setkat s revolverovými hlavami diskovými, vícebokými, korunkového typu a méně častými translačního typu. [25]

## 17.2 Skladovací zásobníky

Dalším typem zásobníků, který se používá v AVN, je skladovací. Tento typ se dělí dle toho, jakým způsobem je nástroj dopraven do vřetene.

První typ zásobníku je tzv. pick-up, který se nachází v prostoru CNC. Umístění zásobníku uvnitř CNC má za následek jeho kompaktnost, je však zapotřebí vyřešit přiblížení zásobníku k vřetenu. Toto řešení snižuje náklady na CNC, má však výraznou nevýhodu v množství nástrojů, které v něm lze uskladnit. Výměna nástrojů probíhá tak, že vřeteno umístí nástroj na prázdném místě, které je určeno pro tento nástroj a poté najede na pozici nástroje, který je potřebný a upne ho. Typ pick-up je vhodný pro výměnu frézovacích hlav. [25]

Druhým typem je zásobník-výměník. Toto řešení je vhodné pro obráběcí centra s velkým počtem nástrojů, kde by byla problematická přímá výměna pomocí systému pick-up. Pro výměnu slouží jed noučelový manipulátor, který zajistí výměnu mezi zásobníkem a vřetenem. Výměna nástrojů je velice rychlá a zpravidla trvá do pěti sekund, nicméně v určitých případech může proběhnout i v čase do jedné sekundy. [25]

Třetím typem je zásobník-manipulátor-výměník. Přeprava mezi zásobníkem a výměníkem probíhá za pomoci manipulátoru. Toto řešení se používá v případě, že je zásobník umístěn daleko od vřetena, například u strojů, kde původně AVN nebyla součástí a doplňovala se až později. Díky tomu, že je zásobník umístěn mimo obráběcí centrum, není zde příliš velké konstrukční omezení z hlediska prostoru. Občas lze narazit také na zásobník umístěný na manipulátoru.

Posledním typem je stacionární zásobník-manipulátor. Zde se jako manipulátor používá průmyslový robot sloužící jako výměník, který používá uchopovací rameno pro dva nástroje, tzv. efektor. Tento systém se nazývá RTC, neboli robotická výměna nástrojů (Robotic Tool Change). Výhodou tohoto typu je neomezený počet nástrojů. Existují tři druhy řešení RTC – stacionární, nezávislé a posuvné. [26]

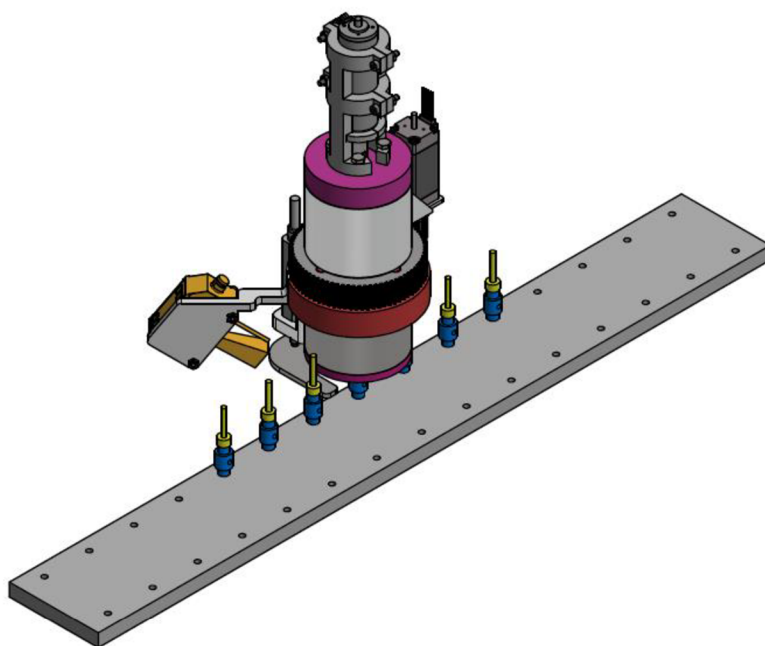
- **Stacionární** – zásobník nástrojů je statický a robot je umístěn na základně. [26]
- **Nezávislé** – zásobník nástrojů je staticky umístěný na základně a robot se pohybuje nezávisle. [26]
- **Posuvné** – zásobník i robot je posuvný se strojem. [26]

### **17.3 Návrhy konstrukčního řešení zásobníku nástrojů**

Jedním z dalších úkolů, které v rámci konstrukčního řešení bylo nutné navrhnout, je zásobník nástrojů. V kapitole 17.2 Skladovací zásobníky, jsou jednotlivé typy zásobníků nástrojů blíže popsány. Navržena byla čtyři konstrukční řešení zásobníků, přičemž jako nejvhodnější bylo vybráno řešení řetězového zásobníku nástrojů. Jednotlivé návrhy jsou detailněji popsány v podkapitolách níže.

#### **Lištový zásobník nástrojů**

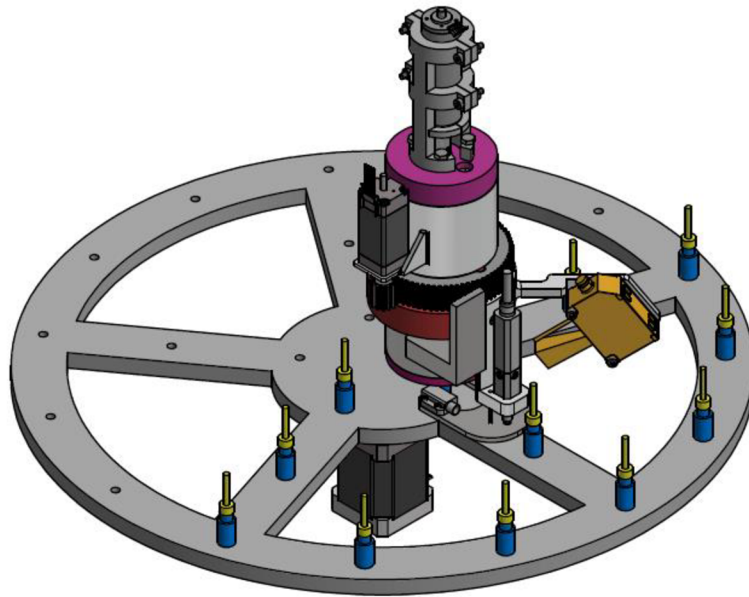
Prvotní řešení, které bylo uvažováno, je jednoduchá lišta pro uložení třiceti nástrojů. Jedná se o řešení, u kterého jsou jednotlivé nástroje uloženy v zalisovaných slotech na nepohyblivé liště, přičemž každý nástroj má pevně danou pozici. Samotná lišta s nástroji je nepohyblivá, relativně dlouhá a nástroje nejsou nijak kryty proti vnějšímu poškození. Toto řešení klade značné nároky na manipulátor nástrojové hlavy, která musí mít možnost pohybu ke všem nástrojům v rámci zásobníku. Takovýto manipulátor je také poměrně prostorově náročný a zvětší se tedy celková prostorová náročnost frézy. Nicméně se jedná o nejlevnější a konstrukčně nejjednodušší řešení.



*Obr. 46: Lištový zásobník nástrojů*

## **Rotační zásobník nástrojů**

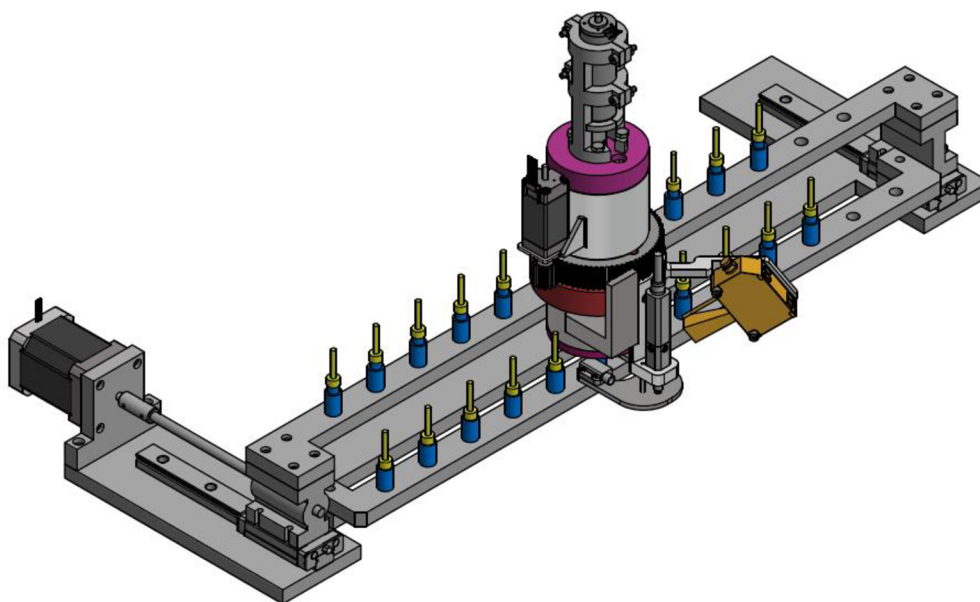
Dalším řešením by mohl být rotační stůl, kde zásobník je kruhového tvaru a nástroje by tedy byly uloženy ve dvou nebo třech kruhových řadách v jednotlivých slotech, které jsou nalisovány do disku zásobníku. Požadavkem pro návrh zásobníku je možnost uskladnění třiceti nástrojů. Nicméně takovýto zásobník s kapacitou třiceti nástrojů by byl prostorově poměrně velký. Bylo tedy navrženo řešení pro uskladnění pouze 25 nástrojů, které je však také poměrně veliké. Kruhová plocha zásobníku by v takovémto případě měla průměr 400 mm. Oproti zásobníku v podobě prosté lišty má tento návrh možnost rotačního pohybu a odběrné místo nástrojů je pevně dané. Díky tomu nemusí samotná nástrojová hlava vykonávat tak velký pohyb jako je tomu u lištového zásobníku a díky tomu i samotný manipulátor nástrojové hlavy bude rozměrově menší. Rotační pohyb zásobníku je zajištěn krokovým motorem. Toto řešení může být opatřeno také krytem, který chrání jednotlivé nástroje proti poškození.



Obr. 47: Rotační zásobník nástrojů

## Lineární zásobník nástrojů

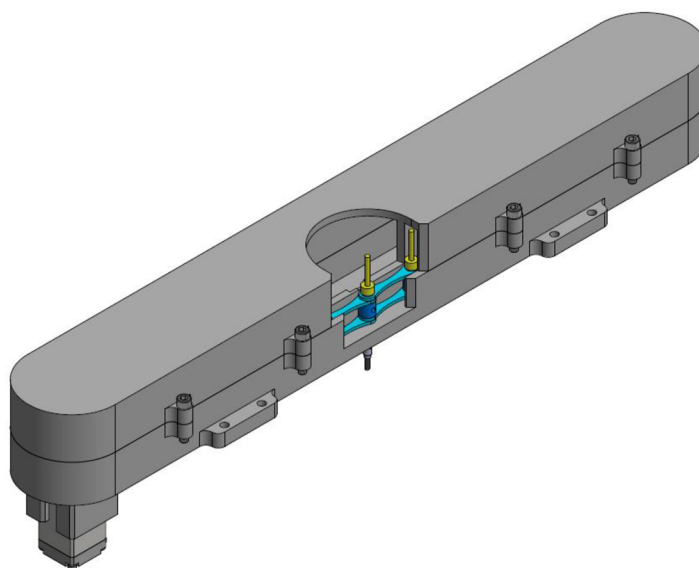
Třetím řešením pro uskladnění nástrojů byl zvolen lineární zásobník. Jedná se o řešení, které obsahuje celkem 26 slotů pro jednotlivé nástroje, přičemž každý nástroj má předem určené místo, ve kterém je uložen. Zásobník se skládá ze základní desky, na které je připevněno lineární vedení s montážními prvky. Mezi protilehlými montážními prvky jsou upevněny skladovací lišty nástrojů, které jsou ve dvou různých výškách a vzdálenostech od sebe. Pohyb celého úložného systému nástrojů je umožněn díky krokovému motoru, který je spojen s montážním prvkem pomocí tyče s trapézovým závitem. Výhodou tohoto způsobu uskladnění nástrojů je, že nástroje jsou vždy uloženy do jedné a té samé pozice a nedochází tedy k jejich přesouváním v rámci zásobníku. Další výhodou je konstrukční jednoduchost tohoto řešení. V případě zakrytí zásobníku jsou také nástroje dobře chráněny proti poškození. Nevýhodou je jeho prostorová náročnost a také nutnost zvětšit samotný manipulátor stroje, tak aby byl umožněn bezproblémový odběr nástroje v koncových polohách zásobníku.



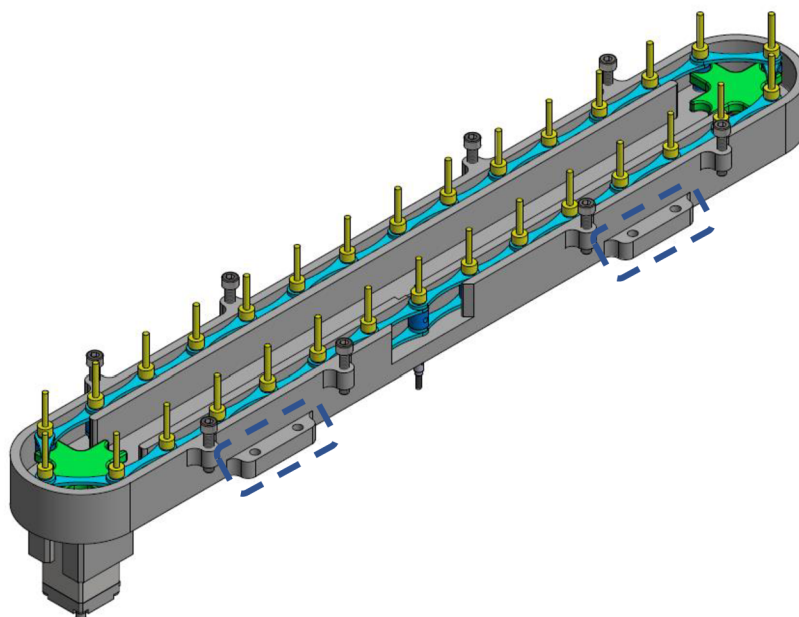
Obr. 48: Lineární zásobník nástrojů

## Řetězový zásobník nástrojů

Jako nejvhodnější konstrukční návrh byl zvolen typ zásobníku zásobník-manipulátor-výměník. Jedná se o systém, který mimo funkci prostého uskladnění umožňuje také nástroj vyměnit a posunout mezi jednotlivými pozicemi uvnitř zásobníku. Pro tyto účely byl použit zásobník řetězový. U tohoto typu jsou jednotlivá lůžka nástrojů tvořena články řetězu. Spojováním jednotlivých článků lze získat řetěz požadované kapacity. Zásobník lze snadno přizpůsobit zástavbovému prostoru a počtu požadovaných nástrojových pozic.

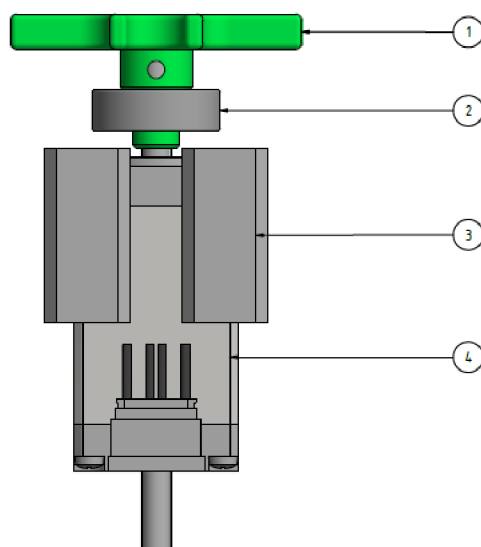


Obr. 49: Zásobník nástrojů s funkcí AVN



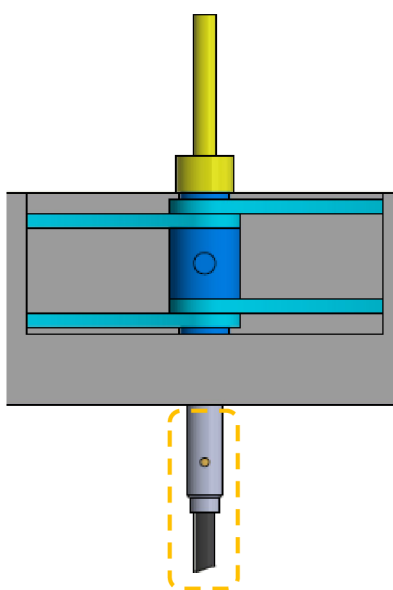
*Obr. 50: Zásobník nástrojů s funkcí AVN bez horního krytu s vyznačenými montážními body.*

Zásobník, který je použit pro tuto konkrétní aplikaci se skládá z několika částí. Tělo zásobníku tvoří spodní a horní oválné části, které jsou spojeny osmi šrouby M5x0,8. Spodní kryt je osazen otvory – montážními body, které jsou označeny na obr.43. Tyto body tvoří 8 otvorů pro šrouby M5, kterými je zásobník upevněn ke stroji. V koncových částech zásobníku jsou umístěna ozubená kola, která jsou napojena na krokové motory pomocí červových spojů. Každé z ozubených kol má svůj vlastní krokový motor typu SC2818L0604-B [45] a také ložisko [47]. Ozubená kola jsou dále osazena řetězem, který má celkovou kapacitu 30 nástrojů. Přibližně ve středu těla zásobníku je zhotoven otvor, který slouží k samotné výměně nástroje. Mimo to, že se jedná o odběrové místo nástroje, je tato pozice použita jako referenční nulový bod.



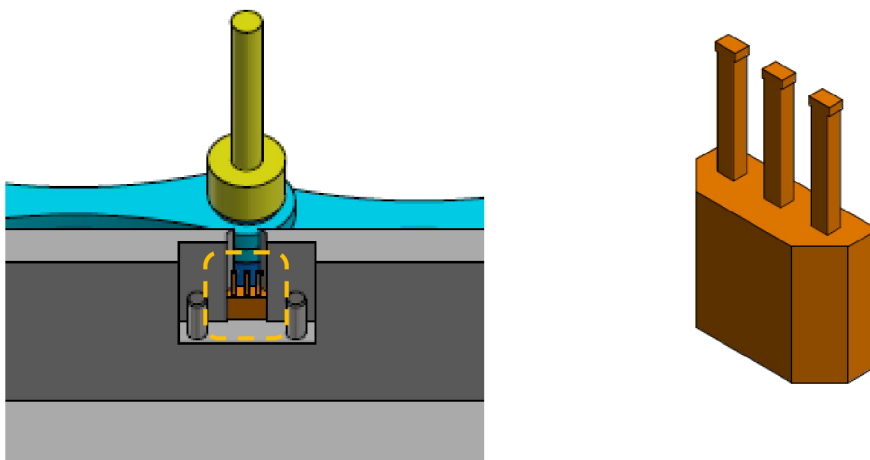
Obr. 51: Konstrukce posuvného mechanismu: 1 - Ozubené kolo, 2 - Ložisko, 3 - Držák motoru, 4 - Krokový motor,

Identifikaci referenčního bodu (nástroje č. 1) zajišťuje Hallova sonda[48], která funguje na principu magnetismu. Pouzdro nástroje č. 1, 2 a 30 jsou osazena magnety, kdy pouzdro nástroje č. 1 má spínací magnet, kdežto pouzdra nástrojů č. 2 a 30 mají magnety rozpínací. Tato konfigurace umožňuje pohyb řetězu v obou směrech, a tedy i rychlejší výměnu nástrojů. Na základě vlastností krokového motoru vychází posun nástrojů o jednu pozici na čtvrtinu otáčky ozubeného kola. Odběrné místo nástrojů je také osazeno indukčním čidlem [46], které zajišťuje správnou pozici pouzdra nástroje pro optimální výměnu.



Obr. 52: Indukční čidlo.[46]

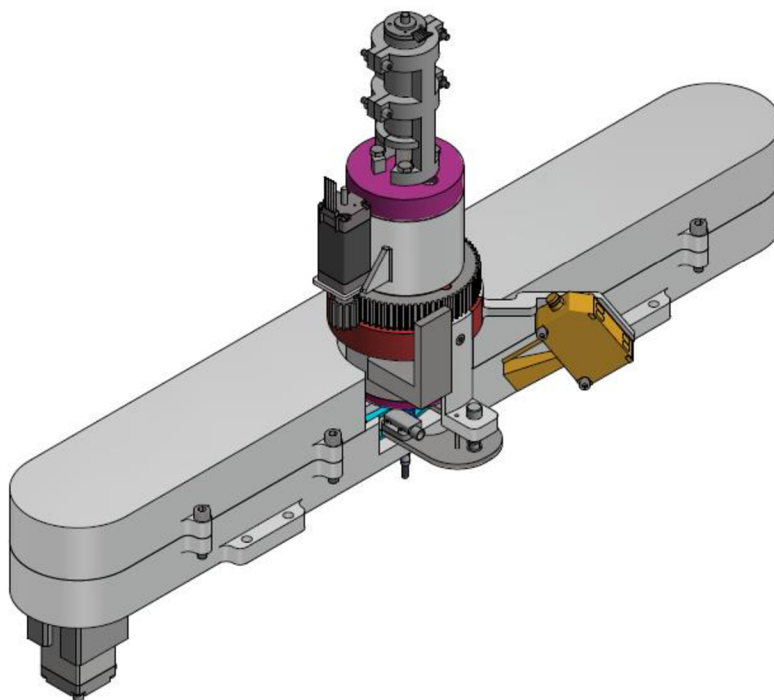




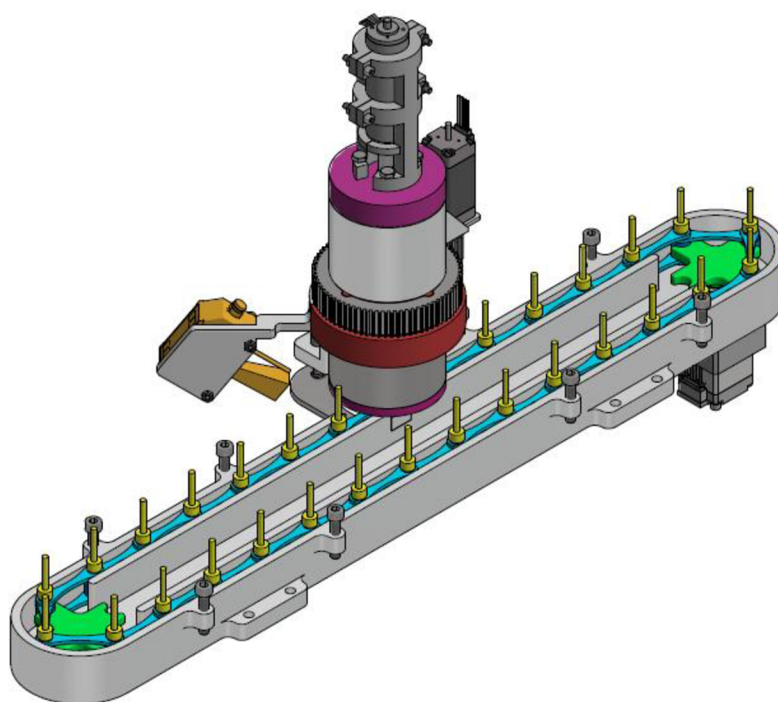
Obr. 53: Hallova sonda [48]

Tento konstrukční návrh zásobníku je prostorově podobně náročný jako první uvažovaný lištový zásobník. Nicméně oproti lištovému zásobníku má značnou výhodu v menších rozměrech manipulátoru nástrojové hlavy. Dále je oproti tomuto typu zásobníku vhodnější díky krytu, který chrání nástroje proti poškození. Obdobně je manipulátor tohoto návrhu prostorově přijatelnější i v porovnání se rotačním a lineárním zásobníkem nástrojů a tím pádem také rozměr frézy bude menší.

### III. Finální návrh sestavy



Obr. 54: Sestava frézovací hlavy a zásobníku s funkcí AVN



Obr. 55: Sestava frézovací hlavy a zásobníku s funkcí AVN bez horního krytu

## Závěr

Cílem této diplomové práce byl konstrukční návrh nástrojové hlavy s automatickou výměnou nástroje, která bude primárně sloužit k výrobě DPS. Konstrukční návrh musel splňovat určitá kritéria. Kromě automatické výměny nástroje bylo nutné zahrnout také systém odměřování skutečné vzdálenosti nástroje od povrchu obráběného materiálu, a to v reálném čase. Dalším požadavkem byl také systém odvodu třísek, které při procesu obrábění vznikají.

V první části se tato práce zaměřuje na rešerši existujících typů a řešení DPS. Dále shrnuje materiály používané k výrobě DPS. Následující kapitola se věnuje metodám výroby DPS, a nakonec je celá tato teoretická část zakončena souhrnem existujících řešení na trhu a krátkým pojednáním o servopohonech.

Hlavním cílem této práce je konstrukční návrh nástrojové hlavy s AVN. Celý návrh je rozdělen do dvou hlavních praktických částí, praktická část „Frézovací hlava“ a část „Automatická výměna nástrojů“.

V úvodu části „Frézovací hlava“ je uveden popis a zhodnocení aktuálního stroje a nástrojové hlavy, kterou katedra disponuje. Následuje zkrácený popis jednotlivých kroků samotného konstrukčního návrhu. Nejprve byl zvolen servopohon na základě dostupných parametrů, tedy hlavně maximálních otáček. Následně bylo řešeno spojení hřídele a kleštiny, v které je upnutý nástroj, přičemž byl zvolen způsob nalisování s přesahem za studena s tolerancí H6/r5. Následující kapitola byla věnována výběru vhodných ložisek. Na základě maximálních otáček zvoleného servopohonu byla vybrána vysoce přesná kuličková ložiska s kosoúhlým stykem, která dokáží přenášet vysoké otáčky. Pro následné určení optimální vzdálenosti mezi ložisky bylo nutné určit řeznou sílu. Tato řezná síla je vypočtena pouze orientačně, protože výrobce neuvádí řezné podmínky pro jednotlivé nástroje, a bylo tedy nutné některé řezné podmínky zvolit. Jednotlivé řezné podmínky jsou blíže specifikovány v příslušné kapitole. Dále byl řešen upínací mechanismus kleštiny a vřetena za pomoci svěrného spoje s kuželovou stykovou plochou. Na základě určené síly  $F_{M2}$ , tedy síly vznikající působením tlaku mezi styčnými plochami, bylo následně možné zvolit vhodnou pružinu, a to konkrétně tlačnou pružinu od výrobce Sodemann. Ta ve spolupráci se zvoleným tlačným elektromagnetem, umožňuje funkci výměny nástroje. Další důležitou součástí návrhu byl systém odměřování vzdálenosti nástroje od povrchu obráběného materiálu za pomoci laserového triangulačního snímače.

Tento laserový snímač je umístěn na rotačním mechanismu, který má funkci otáčet se podle směru frézování. Funkce otáčení rotačního mechanismu je umožněna díky krokovému motoru a soukolí s čelními ozubenými koly. Data ohledně vzdálenosti nástroje od povrchu materiálu jsou následně přenášena do CNC lineárního pohonu, který zajišťuje vertikální pohyb celé nástrojové hlavy. Odsávání třísek je řešeno pomocí pružné hadice přivedené do oblasti obrábění.

V úvodu následující praktické části „Automatická výměna nástroje“ je obecné pojednání o automatické výměně nástrojů a jejich možných konstrukčních variantách. Pro tento daný konstrukční návrh byly navrženy čtyři varianty zásobníků nástrojů. Postupně jsou v podkapitolách popsány zásobníky lištový, rotační, lineární a řetězový. Ke každému z těchto řešení jsou uvedeny jejich klady a zápory. Jako nejvhodnější řešení byl vybrán zásobník řetězový. Jedná se o systém, který mimo funkci prostého uskladnění umožňuje také nástroj vyměnit a posunout mezi jednotlivými pozicemi uvnitř zásobníku pomocí řetězu, který má celkovou požadovanou kapacitu 30 nástrojů. Identifikaci referenční polohy, tedy polohy prvního nástroje, zajišťuje Hallova sonda, která funguje na principu magnetismu. Díky použití konfigurace spínacího a dvou rozpínacích magnetů je umožněn pohyb řetězu v obou směrech, a tedy i rychlejší výměna nástrojů. Odběrné místo nástrojů je osazeno indukčním čidlem, které zajišťuje správnou pozici pouzdra nástroje pro optimální výměnu.

Tento prototyp nástrojové hlavy s AVN splňuje veškerá kritéria stanovená zadáním. Ekonomickou náročnost nebylo bohužel možné určit, jelikož výrobci některých komponent nebyli ochotni poskytnout cenovou nabídku. Zároveň se výsledná cena může odvíjet také podle toho, zdali budou veškeré komponenty vybrány z dostupných řešení na trhu, nebo zdali budou některé z nich například vyrobeny pomocí 3D tisku a jinými metodami.

## Bibliografie

- [1] MAPROS s.r.o.: Dodávky plošných spojů [online]. [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <http://www.marpos.cz/vyroba-plosnych-spoju/>
- [2] OLMR, Vít. Hw.cz. Ohebné plošné spoje [online]. 2006 [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <http://hw.cz/produkty/obecne-produkty/art1485-co-jsou-ohebne-plosne-spoje-a-k-cemu-se-hodi.html>
- [3] Технология производства печатных плат в картинках. Rezonit [online]. [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tehnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/>
- [4] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 9788001023921;8001023923,;
- [5] HRAŠNA, Ing. Michal. Přehľad základných plátovaných materiálov na výrobu DPS [online]. 2012-04 [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:7333/prehľad-zakladnych-platovanych-materialov-na-vyrobu-dps>
- [6] ABEL, Martin. Plošné spoje se SMD, návrh a konstrukce. Pardubice. Platan, 2000. ISBN 80-902-7332-7.
- [7] HROMADKA, Karel. Substráty pro výkonové aplikace v elektrotechnice. Plzeň, 2015. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Aleš Hamáček. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/23041>
- [8] KALTMAYER, Jan. Technologie pro výrobu desek plošných spojů. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/tlustvrsvy.pdf>
- [9] ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03351-1.
- [10] MALUČKÝ, Michal. Konstrukce dělicího stroje DPS. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 41 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/13326>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Dvořák, Zdeněk.  
MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [11] SZENDIUCH, Ivan. Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-3292-6.
- [12] Stolní frézka vytvoří chladič i plošný spoj [online]. 2018-04-24 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/stolni-frezka-bantam.html>

- [13] CHMELA, Ondřej. Laboratorní a malosériová výroba dvouvrstevných desek s plošnými spoji v laboratoři PROTOCAD [online]. Brno, 2011 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/64169>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Starý.
- [14] Pragoboard s.r.o. Pragoboard [online]. [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: [http://www.pragoboard.cz/vrtaky\\_frezy](http://www.pragoboard.cz/vrtaky_frezy)
- [15] FRANKE, Jörg. Three-Dimensional Molded Interconnect Devices (3D-MID). Munich: Cincinnati, Ohio : Hanser Publishers, 2014. ISBN 978-1-56990-551-7.
- [16] Pfeffer, M., Goth, C., Craiovan, D., et al. (May 25–27, 2011). 3D-assembly of molded interconnect devices with standard SMD pick & place machines using an active multi axis workpiece carrier. 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM). DOI: 10.1109/ISAM.2011.5942362
- [17] VECKO, Kamil. Metody návrhu a výroby 3D plošných spojů: Methods for the design and fabrication of 3D printed circuit boards. Plzeň, 2019. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/11025/37521>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Kalaš David, Ing. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/37521>
- [18] LPKF Laser & Electronics AG: Laser Direct Structuring for 3D Molded Interconnect Devices [online] [https://www.lpkf.com/fileadmin/mediafiles/user\\_upload/products/pdf/EQ/3D-MID-LDS/brochure\\_lpkf\\_laser\\_direct\\_structuring\\_en.pdf](https://www.lpkf.com/fileadmin/mediafiles/user_upload/products/pdf/EQ/3D-MID-LDS/brochure_lpkf_laser_direct_structuring_en.pdf)
- [19] AMEND, P., C. PSCHERER, T. RECHTENWALD, T. FRICK a M. SCHMIDT. A fast and flexible method for manufacturing 3D molded interconnect devices by the use of a rapid prototyping technology. Physics Procedia [online]. 2010, **5**, 561-572 [cit. 2021-03-17]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2010.08.084
- [20] Hüske, M., Kickelhain, J., Müller, J., & Eßer, G. (2001). Laser supported activation and additive metallization of thermoplastics for 3D-MIDs. In Geiger, M.; Otto, A. (Eds.), Laser Assisted Net Shape Engineering 3 - Proceedings of the LANE 2001, Erlangen 28.-31.08 (pp. 587-598). Bamberg: Meisenbach Verlag.
- [21] Panasonic MID Technology MIPTEC [online]. 2017-02 [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://www.panasonic-electricworks>.
- [22] KLÍMA, Filip. Tištěné součástky pro elektroniku: Printed electronic components. Plzeň, 2018. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Navrátil Jiří, Ing. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/32369>
- [23] ŘEBOUN, Jan. Studijní materiál k předmětu ITE1, Tisková a flexibilní elektronika-tiskové technologie. Západočeská univerzita v Plzni. Katedra technologií a měření. 2017.

- [24] HW.CZ. Aerosol Jet printing aneb když tranzistor prochází tryskou[online]. 2015 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [25] MAREK, Jiří. MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů. 2006. Praha: Vogel Publishing, 1997-. ISBN 1212-2572.
- [26] Škoda machine tool. Škoda Machine Tool Příslušenstvístrojů. [Online] [Citace: 22-03-2021.] <https://skodamt.com/cs/produkty/prislusenstvi-stroju/vymeny-nastroju>.
- [27] SKALICKÝ, Jiří. Elektrické servopohony. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-1978-4. Dostupné z [www: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiBkbLThMvAhXok4sKHT-bD4wQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.vutbr.cz%2Fwww\\_base%2Fpriloha.php%3Fdpid%3D33400&usg=AOvVaw2DdgXx0-OK69WfvANKPUCg](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiBkbLThMvAhXok4sKHT-bD4wQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.vutbr.cz%2Fwww_base%2Fpriloha.php%3Fdpid%3D33400&usg=AOvVaw2DdgXx0-OK69WfvANKPUCg)
- [28] LPKF: ProtoMat E33 [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.lpkfusa.com/datasheets/prototyping/e33.pdf>
- [29] SHCHANKIN, Yan. ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ NALISOVANÉHO SPOJE PŘI ZATÍŽENÍ SPOJE OSOVÝMI SILAMI: Analysis of the mechanical properties of pressed cylinders when loaded by axial forces. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Vítek Karel. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/73022>
- [30] PEŠÍK, Lubomír. Části strojů: stručný přehled. 1. díl. Vyd. 3., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008, 191 s. ISBN 978-80-7372-319-4.
- [31] PEŠÍK, Lubomír. Části strojů: stručný přehled. 2. díl. Vyd. 3., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008, 201 s. ISBN 978-80-7372-320-0.
- [32] Petr Keller, Petr Zelený. Optimalizace uložení vřetena. TKMOST. [Online] 13. Květen 2014. [Citace:2021-03-15.] <http://tkmost.kez.tul.cz/vystupy-projektu/inovace-vyuky-v-oblasti-specializovanych-predmetu/vyrobni-stroje-i>.
- [33] HENNLICH s.r.o.: TALÍŘOVÉ PRUŽINY DIN 2093 [online]. 2008/2009 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/pruziny-talirove-pruziny-157/talirove-pruziny-din-2093.html>
- [34] Tremba GmbH: Tremba HMA-2622d.002-24VDC,100% zdvihací magnet tlačný 0.1 N 70 N 24 V/DC 4 W [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/tremba-hma-2622d002-24vdc100-zdvihaci-magnet-tlacny-01-n-70-n-24-vdc-4-w-503760>
- [35] NANOTEC PLUG&DRIVE: ST2018L0804-B – Stepper motor – NEMA 8 [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/444-st2018l0804-b>



- [36] SICK: Senzory pro měření vzdálenosti OD Mini / OD Mini Prime [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.sick.com/cz/cs/snimace-mereni-vzdalenosti/senzory-pro-mereni-vzdalenosti/od-mini/od1-b100c50i14/p/p326948>
- [37] NORELEM: Spur gears in steel, module 1 toothing milled, straight teeth, engagement angle 20° [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.norelem.com/cz/en/Products/Product-overview/Systems-and-components-for-machine-and-plant-construction/22000-Drive-technology/Gears-Gear-Racks-Bevel-Gears/22400-Spur-gears-in-steel-module-1-toothing-milled-straight-teeth-engagement-angle-20%C2%B0.html>
- [38] Dratek.cz: CNC lineární pohon s krokovým motorem [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/5441-cnc-linearni-pohon-s-krokovym-motorem.html>
- [39] SKF: S71906 ACE/P4A [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: [S71906 ACE/P4A - Angular contact ball bearings, super-precision | SKF](https://www.skf.com/cz/cs/Products/Products-overview/Angular-contact-ball-bearings/S71906-ACE-P4A-Angular-contact-ball-bearings-super-precision-SKF)
- [40] SKF: Lock washers - MB6 [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/accessories/lock-nuts/keyway/productid-MB%206>
- [41] SKF: KM 6 Lock nuts requiring a keyway (metric) [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/accessories/lock-nuts/keyway/productid-KM%206>
- [42] ŠTĚPÁN, Laník. Návrh automatické výměny nástrojů pro stolní CNC frézku: Design of automatic tool change for CNC table milling machine. Liberec, 2020. Diplomová práce. Technická Univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Petr Keller, Ph.D.
- [43] MITcalc: Koeficient bezpečnosti [online]. [cit. 2021-5-29]. Dostupné z: [https://www.mitcalc.com/doc/help/CZ/C\\_safety.htm](https://www.mitcalc.com/doc/help/CZ/C_safety.htm)
- [44] Sodemann-Pružiny: Tlačna pružina - C03000400500M. Sodemann-Pružiny [online]. Sodemann, 9.5.2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.sodemann-pruziny.cz/c03000400500m>
- [45] Nanotec PLUG&DRIVE: STEPPER MOTOR-NEMA 11 SC2818L0604-B [online]. 28.11.2021 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/2441-sc2818l0604-b>
- [46] SICK: Indukční snímače - IMM [online]. 28.11.2021 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: [https://www.sick.com/cz/cs/indukcni-snimace/indukcni-snimace/imm/imm05-1b5povu2s/p/p661140?ff\\_data=JmZmX2lkPXA2NjExNDAmZmZfbWFzdGVySWQ9cDY2MTE0MCZmZl90aXRzZT1JTU0wNS0xQjVQT1ZVMlMmZmZfcXVlcnk9JmZmX3Bvcz0xJmZmX29yaWdQb3M9MSZmZl9wYWdlPTE0ZmZfcGFncmVpemU9MjQmZmZfb3JpZ1BhZ2VTaXplPTI0JmZmX3NpbWk9MTAwLjA=](https://www.sick.com/cz/cs/indukcni-snimace/indukcni-snimace/imm/imm05-1b5povu2s/p/p661140?ff_data=JmZmX2lkPXA2NjExNDAmZmZfbWFzdGVySWQ9cDY2MTE0MCZmZl90aXRzZT1JTU0wNS0xQjVQT1ZVMlMmZmZfcXVlcnk9JmZmX3Bvcz0xJmZmX29yaWdQb3M9MSZmZl9wYWdlPTE0ZmZfcGFncmVpemU9MjQmZmZfb3JpZ1BhZ2VTaXplPTI0JmZmX3NpbWk9MTAwLjA=)



- [47] Norelem: Radiální kuličková ložiska FAG jednořadá [online]. 28.11.2021 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: [https://www.norelem.com/cz/cs/Produkty/P%C5%99ehled-v%C3%BDrobn%C5%AF/Syst%C3%A9my-a-komponenty-pro-v%C3%BDrobu-stroj%C5%AF-a-za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD/23000-Spojky-Tuh%C3%A9-spojky-K%C3%B3nick%C3%A9-up%C3%ADnac%C3%AD-krou%C5%BEky-H%C5%99%C3%ADdelov%C3%A9-klouby-Z%C3%A9suvn%C3%A9-rychlospojky-Lo%C5%BEiska-T%C4%B9sn%C4%B9n%C3%AD/Valiv%C3%A9-lo%C5%BEiska/23800-Radi%C3%A9ln%C3%AD-kuli%C4%8Dkov%C3%A9-lo%C5%BEiska-FAG-jedno%C5%99ad%C3%A9.html?search\\_keywords=23800-200802207](https://www.norelem.com/cz/cs/Produkty/P%C5%99ehled-v%C3%BDrobn%C5%AF/Syst%C3%A9my-a-komponenty-pro-v%C3%BDrobu-stroj%C5%AF-a-za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD/23000-Spojky-Tuh%C3%A9-spojky-K%C3%B3nick%C3%A9-up%C3%ADnac%C3%AD-krou%C5%BEky-H%C5%99%C3%ADdelov%C3%A9-klouby-Z%C3%A9suvn%C3%A9-rychlospojky-Lo%C5%BEiska-T%C4%B9sn%C4%B9n%C3%AD/Valiv%C3%A9-lo%C5%BEiska/23800-Radi%C3%A9ln%C3%AD-kuli%C4%8Dkov%C3%A9-lo%C5%BEiska-FAG-jedno%C5%99ad%C3%A9.html?search_keywords=23800-200802207)
- [48] DRATEK.CZ: Hallův senzor 49E [online]. 28.11.2021 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/7736-halluv-senzor-49e.html>
- [49] FAULHABER: 2264 024 BP4 [online]. 28.11.2021 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.faulhaber.com/en/products/series/2264bp4/>
- [50] Frézování: Výpočtové vztahy a definice pro frézování. Sandvik Coromant [online]. 20.12.2021 [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- [51] Vrtání: Výpočtové vztahy a definice pro vrtání. Sandvik Coromant [online]. 20.12.2021 [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/drilling.aspx>
- [52] LPKF: Software LPKF CircuitPro PM [online]. 20.12.2021 [cit. 2021-12-20].
- [53] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [54] NÁVRH MALÉ MODELÁŘSKÉ CNC FRÉZKY S POHYBLIVÝM STOLEM: DESIGN OF SMALL MODELING CNC MILLING MACHINE WITH MOVABLE TABLE. Brno, 2019. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Jan Pavlík, Ph.D.
- [55] Analýza mechanických vlastností nalisovaného spoje při zatížení spoje osovými silami: Analysis of the mechanical properties of pressed cylinders when loaded by axial forces [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73022>. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Karel Vítek CSc.
- [56] Sodemann-Pružiny: Tlačna pružina - C08500851750S. Sodemann-Pružiny [online]. Sodemann, 9.5.2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.sodemann-pruziny.cz/c08500851750s>
- [57] MITCALC: MITCalc [[software]. Ver 1.77 (20.06.2021). Děčín [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.mitcalc.com/cz/download.htm>. Požadavky na systém: Excel 2007, 2010, 2013, 2016, 2019+ (výpočty uložené jako \*.xlsb soubory)