

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Nahrazení operátora na výrobní lince kooperativním robotem

Replacement of Operator Position on a
Production Line, by Cooperation Robot

Student:
Vedoucí bakalářské práce:

Pavel Bednář
Ing. Zdeněk Noga, Csc.

Ostrava 2019

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Bednář**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 2302R010 Konstrukce strojů a zařízení

Specializace: 21 Konstrukce výrobních strojů a zařízení

Téma: **Nahrazení operátora na výrobní lince kooperativním robotem**
Replacement of Operator Position on a Production Line, by Cooperation Robot

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Pro možné použití ve výrobní lince na pozici montáže brzdových pístů v BREMBO spol. s r.o. navrhnete náhradu operátora kooperativním robotem.

Proveďte :

1. Technickou zprávu s popisem funkce navrženého zařízení a nezbytnými výpočty ve členění – upřesnění zadání, seznam požadavků, funkční struktura, morfologická matice, orgánová a hrubá stavební struktura.
2. 3D model konstrukčního návrhu zařízení.
3. Výrobní výkresovou dokumentaci zařízení.

Rozsah výtahu z rešerše z Bakalářského projektu v textové části práce cca 5str., rozsah výkresové části min. 1A0

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

HUBKA, V. *Konstrukční nauka*. Zürich: Heurista, 1995, 105s. ISBN 80-90 1135-0-8

Zásady pro vypracování diplomové (bakalářské) práce. FS_SME_05_003 verze: G

LITERÁRNÍ REŠERŽE – zpracovaná v rámci Bakalářského projektu.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Noga, CSc.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019

Handwritten signature of Pavel Bělík in blue ink, written over a dotted line.

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Pavel Bednář

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Hájov 38

742 58, Příbor

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BEDNÁŘ, Pavel. *Nahrazení operátora na výrobní lince kooperativním robotem*. Ostrava, 2019, 63 s. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování. Vedoucí práce Zdeněk Noga.

Bakalářská práce se zabývá návrhem konstrukčního řešení pro nahrazení operátorské pozice kooperativním robotem na stanici výrobní linky montáže brzdových třmenů firmy BREMBO Czech, s.r.o. V rámci řešení byl zvolen nejvhodnější robot a poté bylo navrženo jeho umístění na nosnou konstrukci do výrobní linky. Tato nosná konstrukce má pohyblivou část s robotem z důvodu zachování možnosti výkonu práce člověka na dané stanici výrobní linky. V práci je aplikována metodika konstrukčního procesu pro výběr nejvhodnějšího řešení a následně jsou na základě výběru řešení navrhovány jednotlivé uzly konstrukce.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BEDNÁŘ, Pavel. *Replacement of Operator Position on a Production Line, by Cooperation Robot*. Ostrava, 2019, 63 p. Bachelor thesis. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design. Thesis head Zdeněk Noga.

The bachelor thesis deals with the design of a construction solution for the replacement of the operator's position by a cooperation robot at the station of the brake calipers assembly line of BREMBO Czech, ltd. Within the solution, the most suitable robot was chosen and then it was designed supporting structure in the production line for this robot. This supporting structure has a movable part with the robot in order to preserve the possibility of human power on the station. In the thesis, the methodology of the construction proces is applied for the selection of the most suitable solution and then the individual parts of the structure are designed.

Obsah

Obsah.....	- 6 -
Seznam použitých značek a symbolů	- 8 -
Seznam zkratk a odborných termínů	- 10 -
Obrázky	- 10 -
Tabulky.....	- 11 -
1. Úvod	- 12 -
1.1. Výchozí situace.....	- 12 -
1.2. Cíl	- 12 -
2. Konstrukční proces	- 13 -
2.1. State of the Art – průzkum trhu	- 13 -
2.1.1. Podstavec	- 13 -
2.1.2. Robot.....	- 13 -
2.1.3. Porovnání jednotlivých robotů a výběr robotu	- 16 -
2.1.4. Normy a legislativa	- 17 -
2.2. Upřesnění zadání	- 17 -
2.3. Specifikace požadavků	- 18 -
2.4. Kritéria hodnocení	- 19 -
2.5. Technický proces	- 19 -
2.5.1. Černá skříňka	- 19 -
2.5.2. Technologie	- 19 -
2.5.3. Technický proces	- 20 -
2.6. Funkční struktura	- 20 -
2.6.1. Seznam funkcí.....	- 20 -
2.6.2. Hierarchický funkční strom	- 20 -
2.6.3. Blokové schéma.....	- 21 -
2.7. Morfologická matice.....	- 21 -
3. Výběr konceptu – orgánová struktura	- 22 -
3.1. Výběr řešení.....	- 22 -
3.2. Popis řešení.....	- 23 -
3.3. Návrh umístění nosné konstrukce.....	- 24 -
3.4. Ekonomické zhodnocení návrhu.....	- 27 -
4. Hrubá stavební struktura.....	- 28 -
4.1. Návrh nosné pevné desky	- 29 -
4.2. Návrh stojen konstrukce a jejich patek.....	- 30 -
5. Návrh čisté stavební struktury	- 31 -
5.1. Návrh nosné pohyblivé desky.....	- 31 -

5.2. Návrh nosné patky pohybového šroubu a upínacích šroubů	- 32 -
5.2.1. Návrh upínacího šroubu desky.....	- 33 -
5.3. Návrh pohybového šroubu.....	- 34 -
5.3.1. Rozbor zatížení šroubu	- 34 -
5.3.2. Návrh velikosti závitu	- 35 -
5.3.3. Pevnostní kontrola navrženého závitu	- 36 -
5.3.4. Volba polotovaru pro šroub	- 37 -
5.4. Návrh svarového spoje šroubu s patkou	- 38 -
5.5. Návrh výšky matice	- 40 -
5.6. Návrh lineárního vedení	- 41 -
5.7. Návrh konzol s dosedacími hranami.....	- 42 -
5.7.1. Rozbor zatížení jednotlivých konzol	- 43 -
5.7.2. Návrh nosné konzoly	- 44 -
5.8. Návrh pohybového ústrojí	- 45 -
5.8.1. Návrh motoru.....	- 45 -
5.8.2. Návrh řemenového převodu.....	- 47 -
5.8.3. Návrh pohybové matice šroubu	- 49 -
5.8.4. Návrh ložiska	- 49 -
5.9. Návrh krytů pohybového šroubu	- 50 -
5.9.1. Návrh spodního krytu pohybového šroubu.....	- 50 -
5.9.2. Návrh horního krytu pohybového šroubu	- 51 -
5.10. Antikorozní nátěr, kotvení konstrukce a vedení kabeláže	- 51 -
5.10.1. Návrh nátěru konstrukce	- 51 -
5.10.2. Kotvení konstrukce	- 51 -
5.10.3. Vedení kabeláže	- 52 -
5.11. Pevnostní kontrola pomocí MKP.....	- 53 -
5.11.1. Definování zatížení	- 53 -
5.11.2. Výpočet kritického místa	- 54 -
5.11.3. Výpočet dalších namáhaných uzlů.....	- 56 -
5.11.4. Maximální průhyb.....	- 57 -
6. Závěr.....	- 58 -
7. Poděkování	- 59 -
8. Citace.....	- 60 -
9. Použitý software	- 62 -
10. Seznam výkresové dokumentace.....	- 63 -

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Jednotka	Popis
A	[mm]	osová vzdálenost řemenic
D_1	[mm]	malý průměr závitů matice
D_2	[mm]	střední průměr závitů matice
D_4	[mm]	velký průměr závitů matice
D_p	[mm]	roztečný průměr řemenice
D_{p1}	[mm]	roztečný průměr malé řemenice
D_{p2}	[mm]	roztečný průměr velké řemenice
F_0	[N]	osová síla ve šroubu
F_{1sr}	[N]	síla působící na jeden šroub
F_K	[N]	zatěžující síla působící na konzolu
F_N	[N]	normálová reakce
F_R	[N]	silová reakce od závitů matice
F_T	[N]	třecí síla v závitech
F_{TZ}	[N]	obvodová složka reakce v závitě
G	[N]	tíhová síla
H_1	[mm]	nosná hloubka závitů matice
H_c	[mm]	celková výška lineárního vedení
$H_{hřídle}$	[mm]	výška hřídele lineárního vedení
$H_{ložiskového domku}$	[mm]	výška ložiskového domku lineárního vedení
L_w	[mm]	délka řemene
L_{wmin}	[mm]	minimální délka řemene
M_K	[N·mm]	kroučící moment
M_{TZ}	[N·mm]	moment od obvodové složky reakce v závitě
M_o	[N·mm]	ohybový moment působící na svar konzoly
P	[mm]	rozteč závitů
P_h	[mm]	stoupání závitů
P_m	[W]	výkon motoru
R_{1max}	[mm]	maximální rádius vnitřního zaoblení závitů matice
R_{2max}	[mm]	maximální rádius vnějšího zaoblení závitů matice
R_e	[MPa]	mez kluzu materiálu
S_{svk}	[mm ²]	plocha nosného průřezu svaru konzoly
$S_{svš}$	[mm ²]	plocha nosného průřezu svaru šroubu
W_{Kz}	[mm ³]	modul průřezu v krutu závitové tyče
$W_{kš}$	[mm ³]	modul průřezu v krutu plochy koutového svaru šroubu
W_{osvk}	[mm ³]	modul průřezu v ohybu svaru konzoly
a_c	[mm]	vůle ve vrcholu závitů
a_k	[mm]	rozměr definující velikost svaru konzoly
$a_š$	[mm]	rozměr definující velikost svaru šroubu
d'_3	[mm]	minimální malý průměr závitů šroubu
d	[mm]	jmenovitý průměr závitů, shoduje se s velkým průměrem závitů šroubu
d_0	[mm]	průměr díry do betonového podkladu
d_2	[mm]	střední průměr závitů šroubu
d_3	[mm]	malý průměr závitů šroubu
f_z	[-]	součinitel smykového tření
g	[m·s ⁻²]	gravitační zrychlení

h_M	[mm]	výška matice
k_3	[-]	převodní součinitel svarového spoje vzhledem k čelnímu zatížení
k_4	[-]	převodní součinitel svarového spoje vzhledem k bočnímu zatížení
k_s	[-]	koeficient statické bezpečnosti
l	[mm]	délka svaru konzoly
m	[kg]	celková hmotnost všech součástí zatěžující pohybový šroub
m_d	[kg]	hmotnost nosné pohyblivé desky
m_p	[kg]	hmotnost nosné patky
m_r	[kg]	hmotnost robotu
m_{zp}	[kg]	hmotnost zátěže uchycená na patce
n	[min ⁻¹]	otáčky motoru
p_D	[MPa]	dovolený měrný tlak
p_{mat}	[MPa]	měrný tlak v závitech matice
t_d	[mm]	tloušťka nosné pohyblivé desky
t_k	[mm]	rozměr tloušťky koutového svaru konzoly
t_k	[mm]	rozměr tloušťky koutového svaru šroubu
v	[mm·s ⁻¹]	rychlost zdvihu nosné desky
v_{max}	[m·s ⁻¹]	maximální obvodová rychlost řemene
$x_{vůle}$	[mm]	minimální vůle mezi řemenicemi
z	[-]	počet závitů
β	[-]	koeficient zohlednění vlivu neznámého krutu
β_k	[-]	součinitel tloušťky koutového svaru konzoly
β_s	[-]	součinitel tloušťky koutového svaru šroubu
π	[-]	Ludolfovo číslo – konstanta udávající poměr obvodu kruhu k jeho průměru, má hodnotu cca 3,1416
$\sigma_{\perp Ds}$	[MPa]	dovolené tahové napětí koutového svaru šroubu
$\sigma_{\perp k}$	[MPa]	ohybové napětí koutového svaru konzoly
$\sigma_{\perp kD}$	[MPa]	dovolené ohybové napětí koutového svaru konzoly
$\sigma_{\perp s}$	[MPa]	tahové napětí koutového svaru šroubu
σ_{redk}	[MPa]	redukováné napětí koutového svaru konzoly
$\sigma_{redš}$	[MPa]	redukováné napětí koutového svaru šroubu
σ_{redz}	[MPa]	redukováné napětí závitové tyče
σ_t	[MPa]	normálové napětí v tahu
σ_{tD}	[MPa]	dovolené napětí v tahu
$\tau_{\parallel Ds}$	[MPa]	dovolené napětí v krutu koutového svaru šroubu
$\tau_{\parallel k}$	[MPa]	napětí ve smyku koutového svaru konzoly
$\tau_{\parallel kD}$	[MPa]	dovolené napětí ve smyku koutového svaru konzoly
$\tau_{\parallel s}$	[MPa]	napětí v krutu koutového svaru šroubu
τ	[MPa]	smykové napětí v krutu
φ'	[°]	třecí úhel
ψ	[°]	úhel stoupání šroubovice závitu

Seznam zkratek a odborných termínů

HMI panel	ovládací panel linky
PLC	(Programmable Logic Controller) – řídicí program linky
např.	například
pozn.	poznámka
robotická buňka	robotická stanice ohraničená fyzickou bariérou

Obrázky

Obr. 1 - Promo foto robotu Fanuc – CR-35iA ²	- 14 -
Obr. 2 - Promo foto robotu ABB – YuMi ⁴	- 14 -
Obr. 3 - Promo foto robotu AluMotion – UR ⁶	- 15 -
Obr. 4 - Promo foto robotu KUKA LBR iiwa ⁸	- 15 -
Obr. 5 - Technická data, rozměry a pracovní prostor robotu ⁹	- 16 -
Obr. 6 - Černá skříňka – Technický proces	- 19 -
Obr. 7 - Popis technického procesu	- 20 -
Obr. 8 - Hierarchický funkční strom	- 20 -
Obr. 9 - Blokové schéma	- 21 -
Obr. 10 - Morfologická matice	- 21 -
Obr. 11 - První koncepční návrh	- 22 -
Obr. 12 - Stávající situace stanice montáže brzdových pístků	- 25 -
Obr. 13 - Fotka aktuálního stavu stanice	- 25 -
Obr. 14 - Návrh nového rozložení pracovního prostoru	- 26 -
Obr. 15 - Nová pozice spolu s původní v překrytém schématu s vyznačenými kótami pro přesun dopravníku	- 26 -
Obr. 16 - Hrubá stavební struktura	- 28 -
Obr. 17 - Vizualizace řešení v programu Inventor	- 29 -
Obr. 18 - Rozměry pro rozmístění stojen se zakreslenou horní nosnou pevnou deskou a jejími rozměry - 30 -	
Obr. 19 - Pohled na stojnu s kotevní patkou	- 31 -
Obr. 20 - Hrubé rozměry nosné desky a pozice těžiště	- 31 -
Obr. 21 - Schématický náčrt uchycení robotu, nosné desky a nosné patky šroubu	- 32 -
Obr. 22 - Pohled na model robotu zespodu s rozměry [mm] pro kotvení robotu a patky (vizualizace v programu Inventor)	- 32 -
Obr. 23 - Rozbor zatížení šroubu	- 34 -
Obr. 24 - Rovnoramenný jednochodý lichoběžníkový závit dle parametrů Tab. 5	- 36 -
Obr. 25 - Vizualizace svarového spoje pohybového šroubu a patky se znázorněním zatížení	- 38 -
Obr. 26 - Schématické znázornění svaru a plochy nosného průřezu svaru šroubu sklopené do roviny připojení	- 39 -
Obr. 27 - Schéma ložiskového domku OGAS firmy IGUS ³⁶	- 41 -
Obr. 28 - Schéma hřídele lineárního vedení AWMU firmy IGUS ³⁸	- 41 -

Obr. 29 - Schéma smontovaného celku – hřídel s ložiskovým domkem	- 42 -
Obr. 30 - Vizualizace lineárního vedení v programu Inventor.....	- 42 -
Obr. 31 - Schéma rozmístění konzol na stojnách a pozice těžiště	- 43 -
Obr. 32 - Schéma konzoly s vrchní hranou.....	- 43 -
Obr. 33 - Schéma přivařené konzoly ke stojně a její zatížení	- 44 -
Obr. 34 - Rozměry motoru ECM 100/026 U ⁴⁵	- 46 -
Obr. 35 - Rozměry výstupní hřídele pro ECM 100/026 ⁴⁶	- 47 -
Obr. 36 - Rozměry ozubené řemenice ⁴⁸	- 47 -
Obr. 37 - Rozměry upínacího pouzdra Taper pro řemenici ⁴⁹	- 47 -
Obr. 38 - Schématické zobrazení řemene a řemenic	- 48 -
Obr. 39 - Vizualizace matice.....	- 49 -
Obr. 40 - Ložisko 7205B z katalogu firmy ZKL ⁵⁶	- 50 -
Obr. 41 - Schéma spirálového krytu s rozměry v mm z katalogu firmy HIWIN ⁵⁸	- 50 -
Obr. 42 - Kotevní šroub FIS A ⁶⁴	- 52 -
Obr. 43 - Vizualizace vedení kabeláže z robotu do energořetězu v horní pozici.....	- 52 -
Obr. 44 - Energořetěz série 1500 firmy IGUS ⁶⁸	- 53 -
Obr. 45 - Schéma a hodnoty maximálního dynamického zatížení ⁷⁰	- 53 -
Obr. 46 - Analýza konstrukce pomocí MKP s označeným místem nejvyššího napětí	- 54 -
Obr. 47 - Analýza konstrukce pomocí MKP s místem nejvyššího napětí.....	- 55 -
Obr. 48 - Detail kritického místa vypočteného pomocí MKP.....	- 55 -
Obr. 49 - Zobrazení namáhání členů lineárního vedení	- 56 -
Obr. 50 - Zobrazení namáhání členů lineárního vedení z jiného úhlu pohledu	- 56 -
Obr. 51 - Vizualizace průhybu nosné konstrukce	- 57 -

Tabulky

Tab. 1 - Porovnání parametrů robotů	- 16 -
Tab. 2 - Specifikace požadavků	- 18 -
Tab. 3 - Výběr řešení dle zvolených kritérií.....	- 22 -
Tab. 4 - Srovnání nákladů	- 28 -
Tab. 5 - Základní rozměry v mm lichoběžníkového rovnoramenného jednochodého závitu dle ČSN 01 4050 ²⁷	- 36 -
Tab. 6 - Velikosti převodních součinitelů svarového spoje ³⁰	- 38 -
Tab. 7 - Rozměry ložiskového domku OGAS firmy IGUS ³⁷	- 41 -
Tab. 8 - Rozměry pro hřídel lineárního vedení AWMU firmy IGUS ³⁹	- 41 -
Tab. 9 - Parametry zvoleného motoru ⁴⁴	- 46 -
Tab. 10 - Parametry pro zatížení kombinace chemické kotvy FIS VL 410 C a kotevního šroubu FIS A M16 v betonu ⁶⁵	- 52 -
Tab. 11 - Pevnostní parametry vložky OJUM firmy IGUS ⁷²	- 57 -

1. Úvod

1.1. Výchozí situace

Na výrobní lince na stanici montáže brzdových pístků pracují operátoři v nepřetržitém provozu na 4 směny. Automatizace do tohoto procesu by přinesla nižší náklady na výrobu a možnost využití operátora na jiné pozici.

Technologie montáže brzdových pístků

Operátor odebere třmen, který je připraven k dalšímu zpracování z předešlé operace na výrobní lince. Na daném třmeni se nachází Datamatrix kód (dále DMC), který je originální a jasně definuje tento třmen. Kód slouží pro uchování dat z montáže v databázi. Operátor tento DMC načte, aby linka jasně věděla, který třmen bude zpracovávat a vloží třmen do upínacího zařízení na stole. Po zmáčknutí tlačítka je třmen upnut v zařízení a linka si vyžádá montáž pístků. Tyto pístky se montují po dvojicích. Je třeba první pár odebrat z přichystaných boxů a postavit si je na pozici pro montáž těsnění. Dále je třeba odebrat z podobných boxů také zmiňované těsnění pro každý pístek jeden a na speciálním přípravku jej namazat mazací kapalinou. Toto předpřipravené těsnění se dále nasune na přichystané pístky a pístky se vloží do zařízení pro mazání samotných pístků, které se spouští automaticky po vysunutí rukou operátora ze světelné bezpečnostní bariéry. Po dokončení namazání se rozsvítí signální světlo a operátor může pístky odebrat a vložit do upnutého kusu ve stanici. Operátor může odebrat další pár pístků a zopakovat mazání a montáž těsnění pro tolik párů, kolik je třeba na daném třmeni. Po vložení posledního páru pístků, operátor zmáčkne potvrzovací tlačítko stanice a třmen se na otočném stole otočí do zadní pozice pro nízkotlaký test těsnosti. Otočný stůl má dvě pozice, takže se operátorovi nyní otočil předešlý kus, který je již z nízkotlakého testu hotov a on jej může odebrat a odložit na odkládací místo, kde jej stiskem tlačítka u dopravníku odešle do další části linky pro následné zpracování. Nyní operátor odebírá další třmen a opakuje postup montáže.

1.2. Cíl

Navrhněte automatizované robotické pracoviště, které bude dle potřeby nahrazovat práci operátora na výrobní lince na stanici montáže brzdových pístků. Důležité je, aby měl robot nosnost alespoň 8kg a aby to byl model kooperativního robotu.

Po konzultaci s oddělením technologie společnosti Brembo Czech, s.r.o., konkrétně panem Ing. Viktorem Uhlářem, Ph.D. má konstrukční návrh přispět k rozvoji automatizace na lince a

snížit potřebu lidských zdrojů v nekomfortních procesech. Nahraditelnost operátora robotickou jednotkou bude využívána při jakémkoliv nedostatku operátorů. Tento nedostatek může být zapříčiněn nemocí, dovolenou, snižující se nezaměstnaností nebo konkurenčním bojem mezi firmami. Plné nahrazení pozice operátora robotem není žádoucí z důvodu politiky firmy, která hodlá i nadále zaměstnávat určité procento lidských sil. Budoucnost může přinést regulace automatizovaných pracovišť a podmiňovat vytvoření pracovních míst pro člověka. Okolní země si již pohrávají s myšlenkou o vyšších daňových odvodech za robotické stanice a toto řešení má fungovat jako testovací režim pro možnost kombinovaného provozu stanice a tímto regulovat poměr robotických pracovišť a lidských sil.

2. Konstrukční proces

2.1. State of the Art – průzkum trhu

2.1.1. Podstavec

Nebyl nalezen na trhu ani v seznamu patentů žádný univerzální podstavec. Všechny tyto díly se vyrábějí přímo jako součásti výrobních linek nebo jsou dodávány spolu s roboty dle zadaných specifikací zákazníka.

2.1.2. Robot

Hlavní důvod pro použití kooperativního robotu namísto robotu klasického je, že není třeba z bezpečnostních důvodů přidávat robotickou buňku, která by zajišťovala bezpečnost. Kooperativní roboty splňují veškerá kritéria pro práci v součinnosti s člověkem. Toto je v našem případě velmi žádoucí vzhledem k nutnosti doplňování materiálu do stanic a nutných malých oprav seřizovačem na lince bez nutnosti linku zastavovat.

Fanuc – CR-35iA

Je uváděn jako nejsilnější spolupracující robot na světě (unikátní ve své kategorii, protože dokáže přenést 35 kg hmotnosti, což je výrazně více, než jeho konkurenti). Není ničím jiným, než tradičním robotem FANUC s měkčeným zeleným pogumováním a je opatřen jedním snímačem síly na nejdelsí ose (osa 1). Umí spolupracovat s člověkem, avšak s nemálo obtížemi. Jediný silový snímač není ve skutečnosti schopen zajistit v každé situaci bezpečnost obsluhy (také vzhledem k potenciálně přenosné hmotnosti robotu). V případě, že síla zaznamenaná čidlem překročí nastavenou prahovou hodnotu, robot přejde do nouzového zastavení, a teprve následná reaktivace motorů operátorem může znovu umožnit pohyb.¹



Obr. 1 - Promo foto robotu Fanuc – CR-35iA²

ABB - YuMi

Yumi je jediným kooperativním robotem se dvěma rameny. Jeho malé rozměry (dosah 500 mm) a opakovatelnost (přesnost $\pm 0,02$ mm) ho činí dokonalým nástrojem pro montáž malých dílů. Sedm os každého ramene robotu (o jednu osu více v porovnání s obvyklými roboty) simulují pohyblivost lidských končetin a umožňují vysokou flexibilitu pohybu. Minimální doba reakce (několik milisekund), a nižší rychlost pohybu (1,5 m/s max) činí robot zcela vhodným ke kooperativním aplikacím (úzká spolupráce člověka a robotu). Nevýhodou je jeho nízká nosnost, která činí 500 g.³



Obr. 2 - Promo foto robotu ABB – YuMi⁴

Alumotion – UR3, UR5 a UR10

Roboty malých rozměrů a nízkou hmotností (UR3 11kg, UR5 18kg, UR10 28kg) a maximální nosností - UR3 3 kg, 5 kg UR5 a UR10 10 kg. Opakovatelnost s přesností $\pm 0,1$ mm (plně srovnatelný s klasickými roboty). Jednou z nejzajímavějších vlastností těchto robotů je zajištění úplného manipulačního rozsahu ($\pm 360^\circ$) každé osy robotu. Citlivost těchto strojů je zajištěna měřením proudového příkonu v každé ose robotu. Měření příkonu neposkytuje robotu vysoké kognitivní schopnosti, ale zajišťuje jeho bezpečnost. Překročení nastavené prahové

hodnoty proudu uvede robot do stavu nouzového zastavení. Teprve následné reaktivaci motorů ze strany operátora může vést k obnově pohybu.⁵



Obr. 3 - Promo foto robotu Aluomotion – UR⁶

KUKA – LBR iiwa 7, LBR iiwa 14

Roboty LBR (Leichtbauroboter, německy lehké roboty) iiwa (Intelligent Industrial Work Assistance) jsou bezpochyby nejvíce inovativními roboty na trhu. Snímače točivého momentu v každé ose zajišťují robotu vysokou bezpečnost spolupráce člověka s robotem. Robot IIWA, stejně jako YuMi od ABB, se skládá ze 7 nezávislých os. Tato sedmá osa umožňuje flexibilitu pohybu (teoreticky nekonečně mnoho způsobů, jak dosáhnout stejného bodu) a tedy i velmi vysokou přístupnost ve velmi stísněných pracovních prostorech. Na rozdíl od robotu ABB je nosnost těchto dvou modelů robotů LBR iiwa 7 a LBR iiwa 14 významně vyšší, respektive rovna 7 a 14 kg. Překročení prahové nastavené hodnoty točivého momentu robot dočasně zastaví. Po několika vteřinách čekání robot pokračuje ve své úloze při snížené rychlosti a postupně rychlost navyšuje.⁷



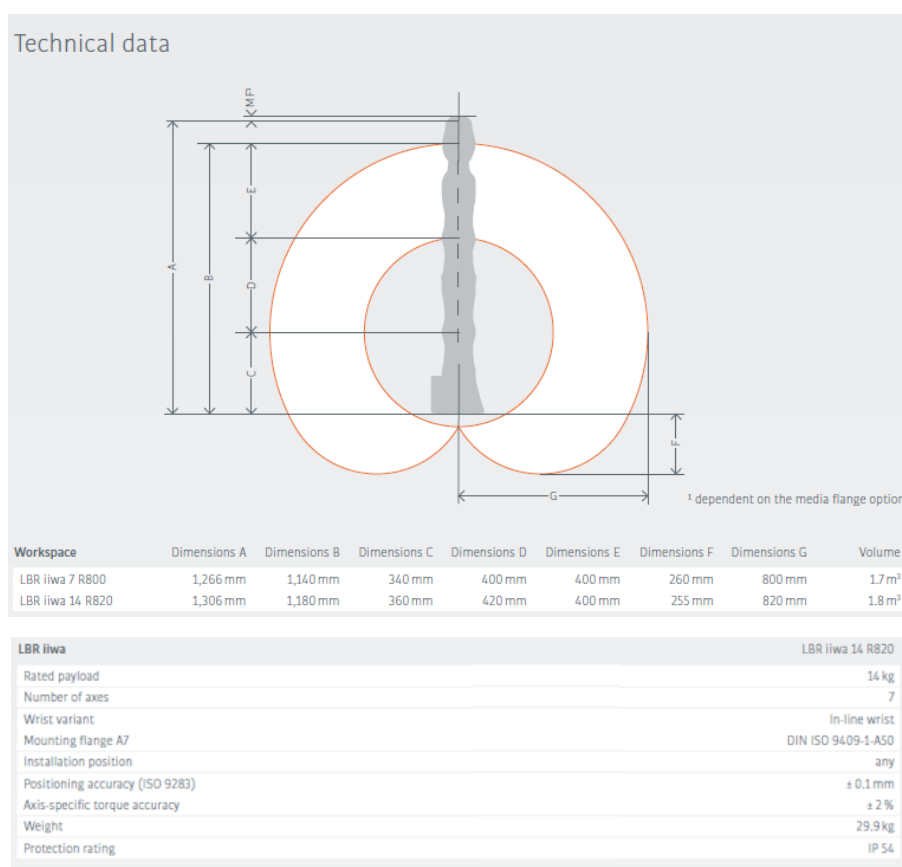
Obr. 4 - Promo foto robotu KUKA LBR iiwa⁸

2.1.3. Porovnání jednotlivých robotů a výběr robotu

Tab. 1 - Porovnání parametrů robotů

	Fanuc	Alumotion			ABB	KUKA	
	CR-35iA	UR 3	UR 5	UR 10	Yu-Mi	LBR iiwa 7	LBR iiwa 14
Nosnost [kg]	35	3	5	10	0,5	7	14
Přesnost [mm]	±0,03	±0,1	±0,1	±0,1	±0,02	±0,1	±0,1
Dosah [mm]	1813	500	850	1300	500	800	820
Hmotnost robotu [kg]	990	11	18,4	28,9	38	23,9	29,9
Maximální rychlost [mm/s]	750	1000	1000	1000	1500	1500	1500
Elektrické připojení	3 fáze 380 - 575 V	100 – 240 V	200 – 240 V	200 – 240 V	100 - 240 V	200 – 230 V	200 – 230 V
Hlučnost [dB]	< 70	70	72	72	neuvedeno	< 65	< 65
Stupeň ochrany	IP 54	IP 54	IP 54	IP 54	IP 30	IP 54	IP 54
Počet os	6	6	6	6	2x7	7	7

Z výše uvedené nabídky robotů splňují podmínky na nosnost a bezpečnost pouze dva modely – Alumotion UR 10 a KUKA LBR iiwa 14. Byl zvolen robot KUKA LBR iiwa 14 pro lepší hodnoty parametrů (vyšší rychlost pohybu, nižší hlučnost, více os).



Obr. 5 - Technická data, rozměry a pracovní prostor robotu⁹

Hmotnost robotu m_r

Hmotnost robotu je dle specifikací 29,9 kg (Obr. 5). Celkovou hmotnost včetně uchopovacího zařízení, kabeláže a dalších součástí je možno odhadnout na $m_r = 40$ kg.

2.1.4. Normy a legislativa

Světlá výška prostor určených pro práci

Dle § 46 Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci musí být světlá výška prostor určených pro trvalou práci při ploše do 20 m² nejméně 2,50 m.¹⁰

Šířky průchozích uliček

čl. 3.1.3 ČSN 26 9010: nejmenší šířka průchozí uličky pro občasný pohyb pracovníka s břemenem v jednom směru je 850 mm (předpokládá se nesení břemene v jedné ruce podél těla, po boku).¹¹

2.2. Upřesnění zadání

Je nutno specifikovat robot a zkonstruovat vhodný podstavec.

Pro robot: minimální nosnost robotu - 8 kg

model kooperativního robotu

srovnání parametrů - viz Tab. 1, kapitola 2.1.3. Robot

Pro podstavec: nosnost dle specifikací zvoleného robotu

možnost manipulace s podstavcem (kolečka, kolejničky,...)

Z důvodu možnosti vykonávání práce člověka na dané stanici je třeba zachovat bezpečnostní normy a splňovat všechny náležitosti, které určuje legislativa. Bude nutno upravit pracoviště tak, aby robot mohl dosáhnout na všechny potřebná místa, kde by měl vykonávat nějakou činnost.

2.3. Specifikace požadavků

Tab. 2 - Specifikace požadavků

Funkce, účinky a funkční parametry		
Požadavek	Podmínka	Přání
Nahrazení manipulační práce operátora	x	
Připojit/Odpojit vykonávání montáže robotem	x	
Minimální nosnost robotu	8 kg	
Provoz		
Požadavek	Podmínka	Přání
Bezúdržbový provoz		x
Vysoká životnost robotu a konstrukcí	x	
Ergonomie		
Požadavek	Podmínka	Přání
Bezpečnost člověka	x	
Model kooperativního robotu	x	
Vysoká stabilita konstrukce – vysoká přesnost robotu	x	
Jednoduchá manipulace při připojení/odpojení	x	
Vzhled		
Požadavek	Podmínka	Přání
Moderní vzhled robotu		x
Povrch součástí pracoviště a robotu vhodný k čištění	x	
Distribuce a manipulace		
Požadavek	Podmínka	Přání
Minimální skladovací prostor v lince celé konstrukce s robotem		x
Skladovací prostor robotu v rámci linky	x	
Přemísťování do pracovní/odkládací pozice bez pomocných zařízení (jeřáby, paletové vozíky a podobně)	x	
Předpisy a normy		
Požadavek	Podmínka	Přání
Bez porušení patentových práv	x	
Výroba		
Požadavek	Podmínka	Přání
Práce ve 4-směnném provozu	x	
Sériová výroba	x	
Ekonomie		
Požadavek	Podmínka	Přání
Minimální náklady na provoz		x
Robot již od zavedeného dodavatele ve firmě		x

2.4. Kritéria hodnocení

Každé kritérium bude hodnoceno známkami 1 až 5 (kde 1 je nejlepší). Ve výsledku bude vybráno řešení s nejnižším průměrem.

- Jednoduchost manipulace při instalaci
- Bezpečnost člověka v součinnosti s robotem
- Stabilita ukotvení podstavce
- Přesnost robotu vzhledem k ukotvení podstavce
- Uložení robotu s podstavcem v blízkosti linky

2.5. Technický proces

2.5.1. Černá skříňka

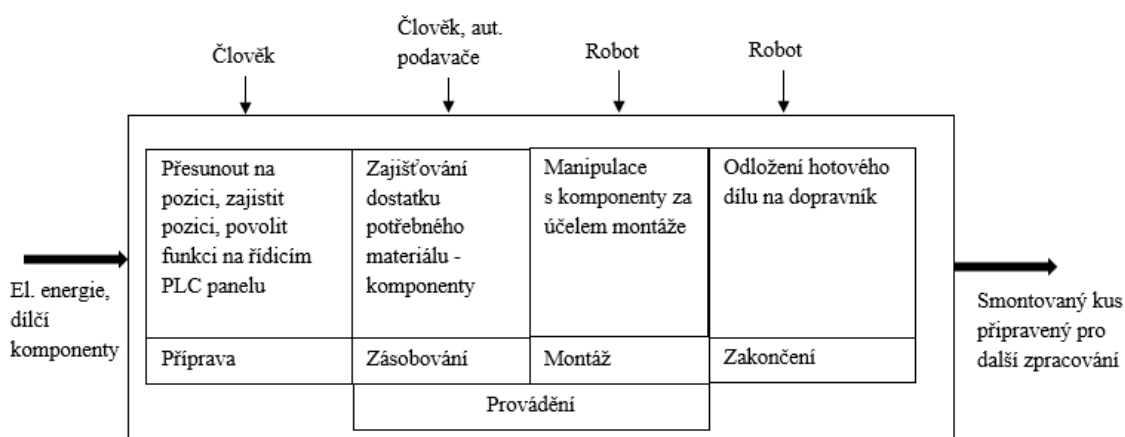


Obr. 6 - Černá skříňka – Technický proces

2.5.2. Technologie

Po přesunutí robotu s podstavcem na patřičné místo pro vykonávání jeho úkonu bude na ovládacím HMI panelu linky zvolena možnost pro automatickou manipulaci (namísto operátora). Pozice podstavce bude zafixována na dané pozici která musí být přesně definována pro zachování opakovatelnosti dosahovaných pozic robotu. Tato pozice bude kontrolována čidlem pro znemožnění spuštění procesu v jiné pozici než finální. Po provedení těchto úkonů a splnění podmínek procesu (linka bez alarmu, přítomnost správných přípravků, dostatek materiálu a další) začne robot vykonávat naprogramovaný proces automatické montáže pístků do brzdových třmenů. Tento proces bude mít obdobný sled pohybů jako tomu je u činnosti operátora. Rozdíl bude v tom, že robotu bude nutno přichystat těsnění a pístky. Odebírání těchto komponent přímo z boxů by nebylo nemožné, nicméně velmi nákladné (kamera, 3D screening). Mnohem jednodušší a levnější řešení bude linku vybavit automatickými podavači (např. pro pístky vibrační lineární podavač a pro těsnění vysunovací zařízení na tloušťku jednoho těsnění z předem přichystaného zásobníku ve sloupci).

2.5.3. Technický proces



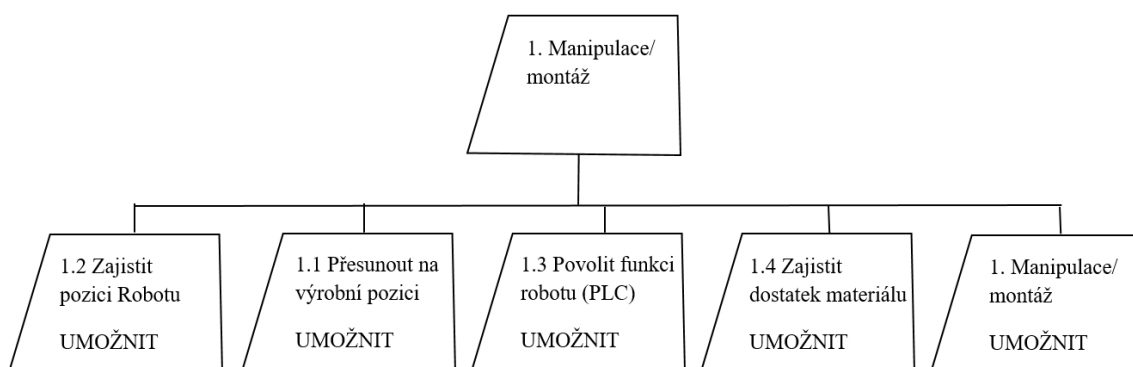
Obr. 7 - Popis technického procesu

2.6. Funkční struktura

2.6.1. Seznam funkcí

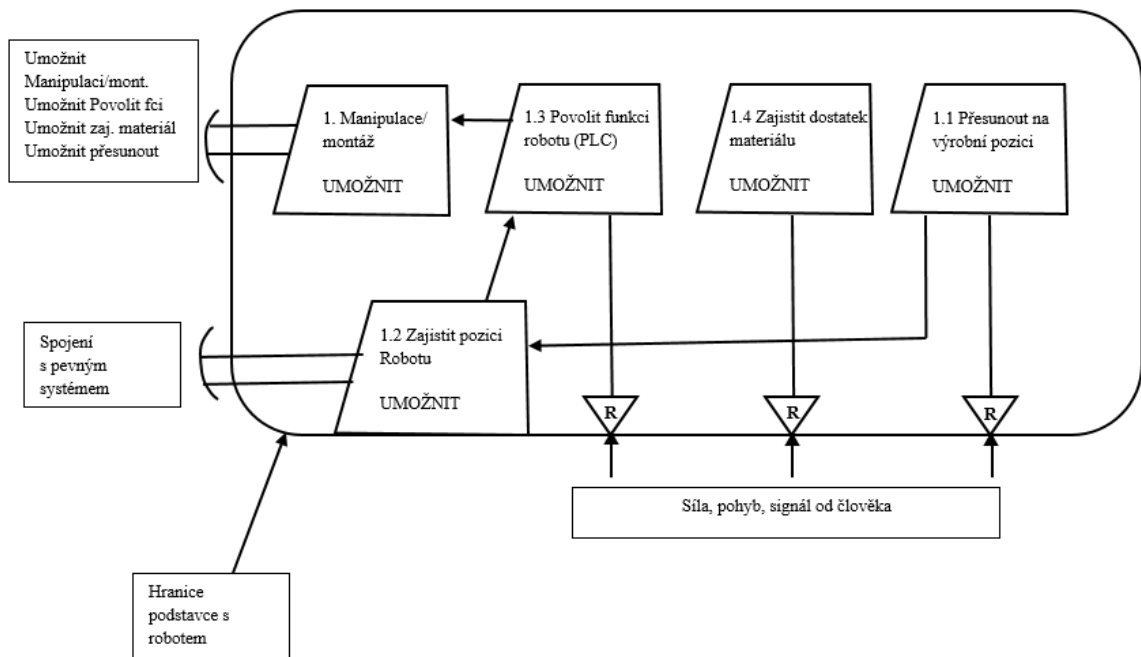
- **1.1 Přesunout robot na pozici** – přesun robotu do pozice pro vykonávání montážních úkonů
- **1.2 Zajistit pozici robotu** – zajistit podstavec s robotem na výrobní pozici proti pohybu
- **1.3 Povolit funkci automatické montáže** – na ovládacím panelu linky zapnout funkci montáže pomocí robotu
- **1.4 Zajistit materiál** – udržovat plné zásobníky pro materiál k montáži
- **1. Manipulace/montáž** – manipulace s materiálem za účelem montáže dílů

2.6.2. Hierarchický funkční strom



Obr. 8 - Hierarchický funkční strom

2.6.3. Blokové schéma



Obr. 9 - Blokové schéma

2.7. Morfologická matice

Dílčí funkce	Funkční principy/orgány – nositelé funkcí				
	1	2	3	4	5
Přesunout na pozici UMOŽNIT	Kolečka	Kolejnice	Kloubový mechanismus	Šroubový mechanismus	
Zajistit pozici UMOŽNIT	Kotvy do podlahy	Aretační kolíky	Šroubový spoj - kotvy		
Povolit funkci (HMI) UMOŽNIT	Tlačítko na HMI panelu	Mechanická přípojka			
Zajistit materiál UMOŽNIT	Automatické podavače	Příprava do odebíracích pozic			
Manipulace/montáž UMOŽNIT	Robot KUKA				



Obr. 10 - Morfologická matice

3. Výběr konceptu – orgánová struktura

3.1. Výběr řešení

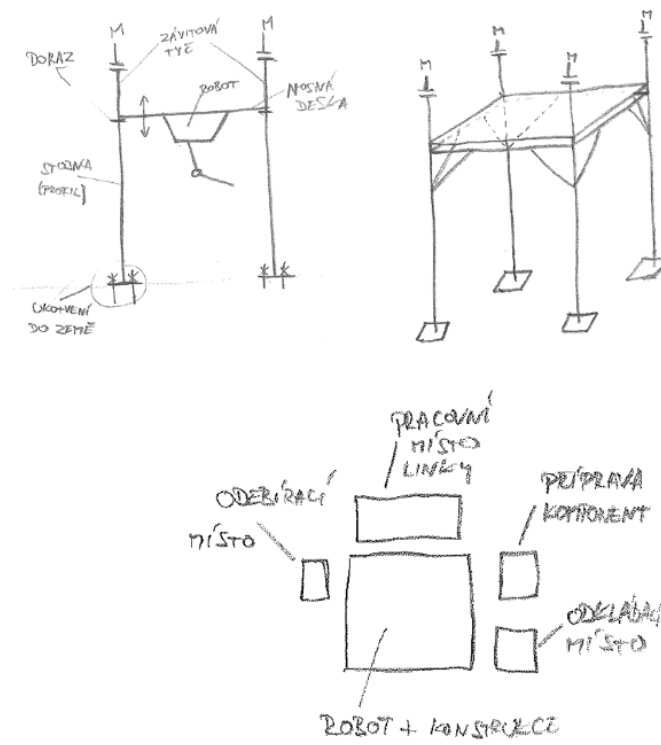
Přehled kritérií ze seznamu výše (kapitola 2.4.)

- Jednoduchost manipulace při instalaci
- Bezpečnost člověka v součinnosti s robotem
- Stabilita ukotvení podstavce
- Přesnost robotu vzhledem k ukotvení podstavce
- Uložení robotu s podstavcem v blízkosti linky

Tab. 3 - Výběr řešení dle zvolených kritérií

Varianta	Kritéria hodnocení					Průměr	Pořadí
	Manipulace	Bezpečnost	Stabilita ukotvení	Přesnost ukotvení	Uložení u linky		
1	2	3	2	2	4	2,6	4.
2	2	1	1	1	4	1,8	2.
3	4	5	3	4	4	4	5.
4	1	1	2	2	4	2	3.
5	1	1	1	1	2	1,2	1.

Ze čtyř variant byla zvolena varianta 5 z důvodu nejlepšího splnění zvolených kritérií.



Obr. 11 - První koncepční návrh

3.2. Popis řešení

Řešení spočívá v umístění nosné konstrukce pro robot přímo k nynější stanici. Nosná konstrukce bude tvořena čtyřmi U-profilu postavenými vertikálně, tvořícími stojny a přikotveny do podlahy kotevními šrouby. Nahoře budou tyto stojny vzájemně spojeny pevnou nosnou deskou pomocí šroubů. Robot bude umístěn vzhůru nohama na nosné posuvné desce, která se může pohybovat mezi dvěma úvratěmi. Spodní úvrat' bude sloužit jako pracovní pozice, v níž bude robot vykonávat činnost montáže. Horní úvrat' bude sloužit jako odkládací místo, v níž bude robot jen zaparkován. Tímto bude ušetřeno velké množství prostoru a výhodou této konstrukce bude i přesnost upevnění, jelikož robot s podstavcem se nebude muset odnikud dopravovat a přesunovat – pozice bude pevná. Pohyb robotu mezi těmito horní a spodní úvratí bude realizován pomocí pohybového šroubu, který bude umístěn napevno v těžišti nosné posuvné desky a v místě horní úvratě bude matice uložená v axiálním ložisku, která bude spojena s motorem pomocí řemenového převodu. Při otáčení této matice se deska s robotem bude pohybovat nahoru nebo dolů podle žádaného směru. Pohyb desky bude jistián lineárním vedením na všech čtyřech nohách konstrukce, aby nedocházelo při pohybu desky k jejímu vychylování. Spodní úvrat' desky bude definována třemi konzolemi s vrchní hranou. Zamezení pohybu v obou osách horizontálního směru je jistiáno lineárním vedením, které je na každé stojně. Takto dosednutá deska bude vždy ve stejné rovině a díky lineárnímu vedení a samosvornému šroubu zvýší tuhost celé konstrukce a dovolí robotu zachovávat svou přesnost. Spodní pozice bude kontrolována čidlem pro znemožnění spuštění procesu v jiné pozici než finální.

Řešení pomocí závitové tyče je sice dražší variantou než například pomocí lineárního vedení a pneumatických pístů, nicméně má nesporné výhody. Tyto výhody spočívají v samosvornosti lichoběžníkového závitu a tudíž není nutno desku s robotem v horní úvratí nijak dále jistit. Pohyby dolů nebo nahoru jsou v každém bodu jejich pozice řízeny a nemusí být nijak brzděny nebo posilovány (např. není nutno používat protizávaží). V případě budoucích změn na lince je možno využít tento šroubový mechanismus jako další externí osu pro robot a ten může pracovat ve více úrovních, tím se dále rozšíří jeho pracovní prostor.

Dále byla zvažována ještě varianta s více, konkrétně čtyřmi, šrouby/závitovými tyčemi podél každé ze stojen a případný pohon pomocí aktuátorů, ale tuto variantu jsem zavrhnul z několika důvodů. Jeden centrální šroub je mnohem levnější na výrobu než čtyři šrouby. Dále by bylo nutné tyto pohony nějak synchronizovat, což by znamenalo mít jeden centrální pohon, který by musel být rovnoměrně přenášen na všechny čtyři šroubové mechanismy, což by znamenalo výrobu dalších složitých součástí a jejich údržbu. V případě aktuátorů by sice mohly

být tyto čtyři dílčí pohony řízeny elektronicky jedním centrálním, ale pro tuto aplikaci není nezbytné mít tak přesný akční člen, ale bohatě postačí klasický elektromotor. Když vezmu v potaz ještě hledisko údržby a poruch, tak aktuátory by musely být koupeny jako extra náhradní díly, kdežto elektromotory navržených parametrů se ve společnosti Brembo CZECH, s.r.o. již využívají a tudíž jejich případná výměna nebo oprava je jednodušší.

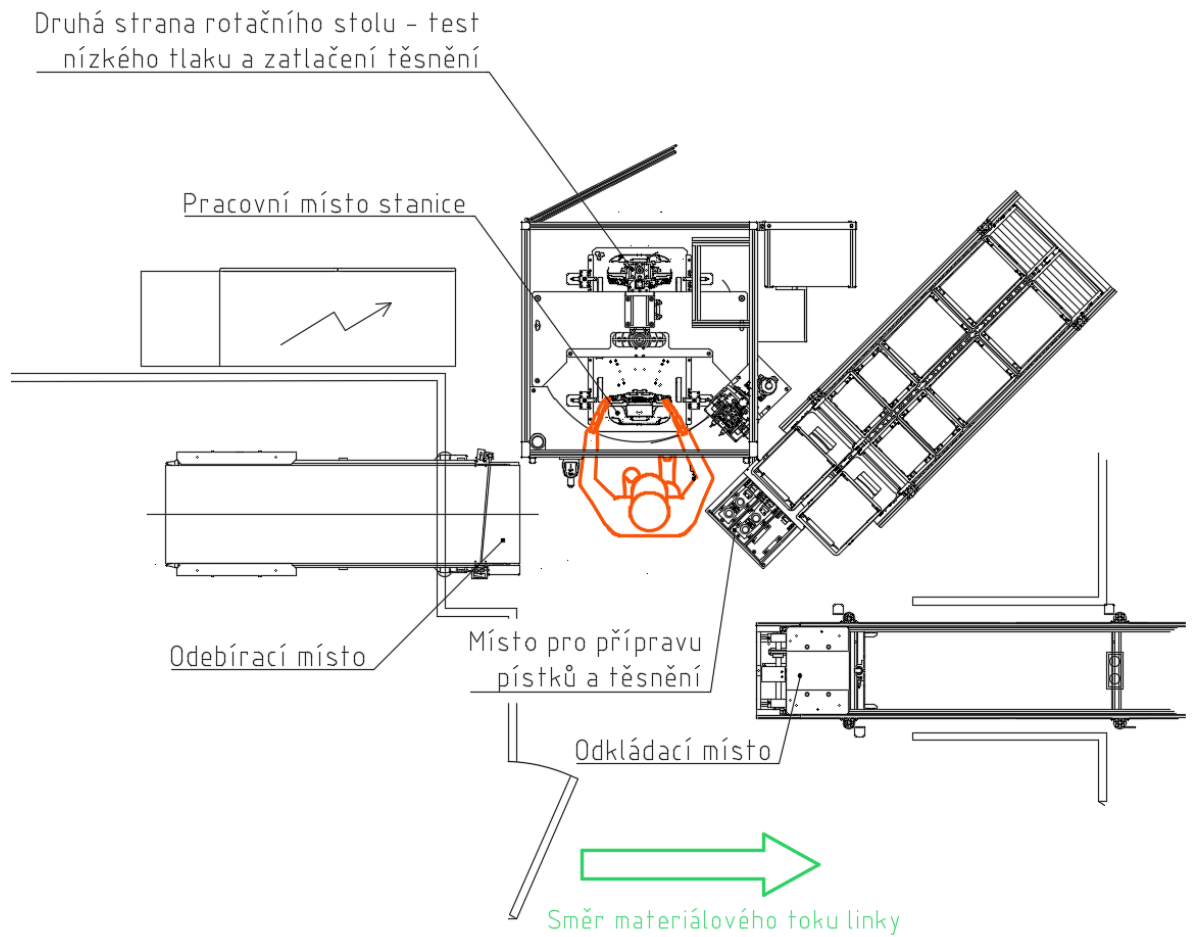
Původně byla řešena spodní úvrať třemi kuželovými kolíky pro zajištění roviny, pevného dosednutí a vystředění desky na těchto kuželových plochách. Vyvstal ovšem problém s nutností mít tyto kolíky seřizovatelné, jelikož při výrobě konstrukce by nebylo možno dosáhnout dostatečné přesnosti. Kdyby byly tyto kolíky seřizovatelné, musely by tam být menší součásti jako šrouby a podobně, které by přenášely největší dynamické zatížení a mohlo by časem dojít k jejich povolení, což v žádném případě není akceptovatelné. Mnohem jednodušší tedy byla konstrukce, která bude dosedat na spodní úvrať definovanou třemi konzolami s vrchní hranou.

3.3. Návrh umístění nosné konstrukce

Světlá výška pro pohyb člověka musí dle Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. §46 odst. (1) bod a), jak uvádím v kapitole 2.1.4., být 2,5 m. Z tohoto důvodu byl situován nejnižší bod robotu v jeho odkládací pozici do této výšky nad zemí.

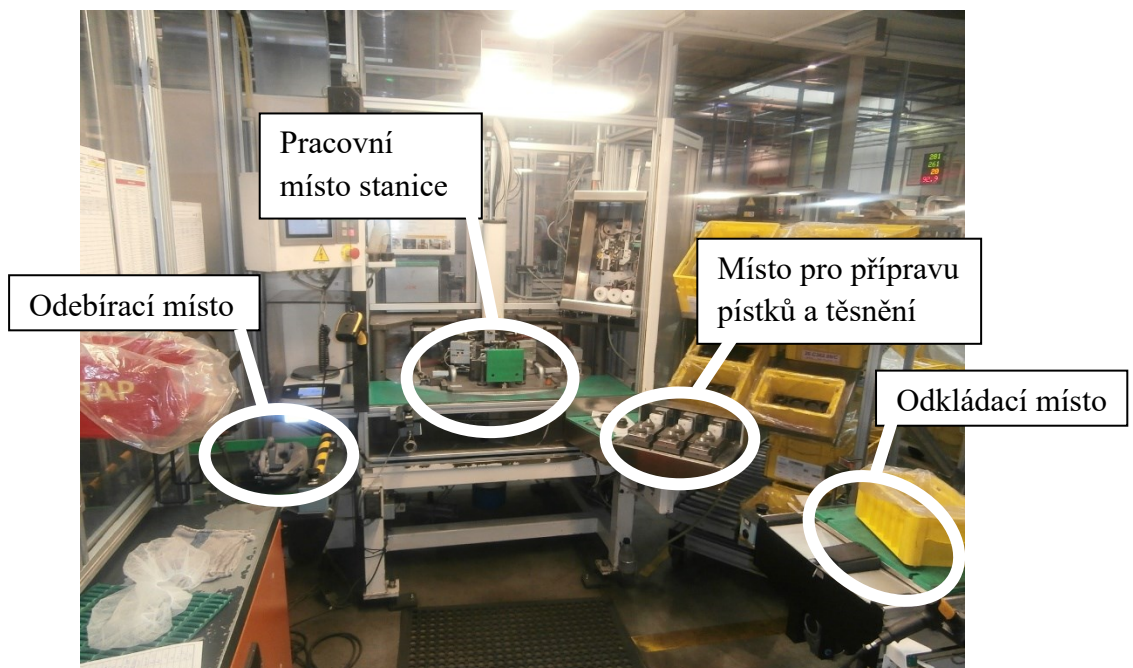
Dále se konstrukce musí vejít do nynější zástavby linky a musí být dodrženy další legislativní náležitosti, jak uvádím v kapitole 2.1.4. Pro umístění robotu s nosnou konstrukcí do pracovní pozice bude třeba upravit rozmístění některých částí linky. Bude nutno posunout odkládací dopravník tak, aby zasahoval do pracovního prostoru robotu. Dopravník odebíracího místa bude třeba změnit z pásového na paletový, aby se robotu usnadnil odběr třmene ke zpracování. Bude se muset upravit pozice pro přípravu pístků a prachových těsnění. Čtečka pro identifikaci kusů může zůstat ruční a pro automatizovaný proces se data budou předávat pomocí PLC programu. Z ekonomického hlediska je pro spotřebu energie výhodné, aby robot vykonával co nejkratší pohyby a to hlavně se součástkami s větší hmotností, tudíž je žádoucí, aby odebírací a odkládací pozice byly co nejblíže jeho těžišti. Jelikož je ale třeba dodržovat platné zákony pro rozměry pracoviště člověka, musí zůstat pracovní plocha co nejméně zastavěná pro bezproblémový pohyb operátora.

Z důvodu stále trvající možnosti práce člověka na dané stanici je třeba zachovat bezpečnostní mezeru pro bezproblémový průchod člověka ke stanici. Tato mezera činí 850 mm dle ČSN 26 9010, jak je uvedeno v kapitole 2.1.4. Stanice je nastavitelná pro více typů výrobků, kde pro každý z nich je třeba měnit určité přípravky, tudíž tato mezera musí být dimenzovaná pro pohyb s břemeny.

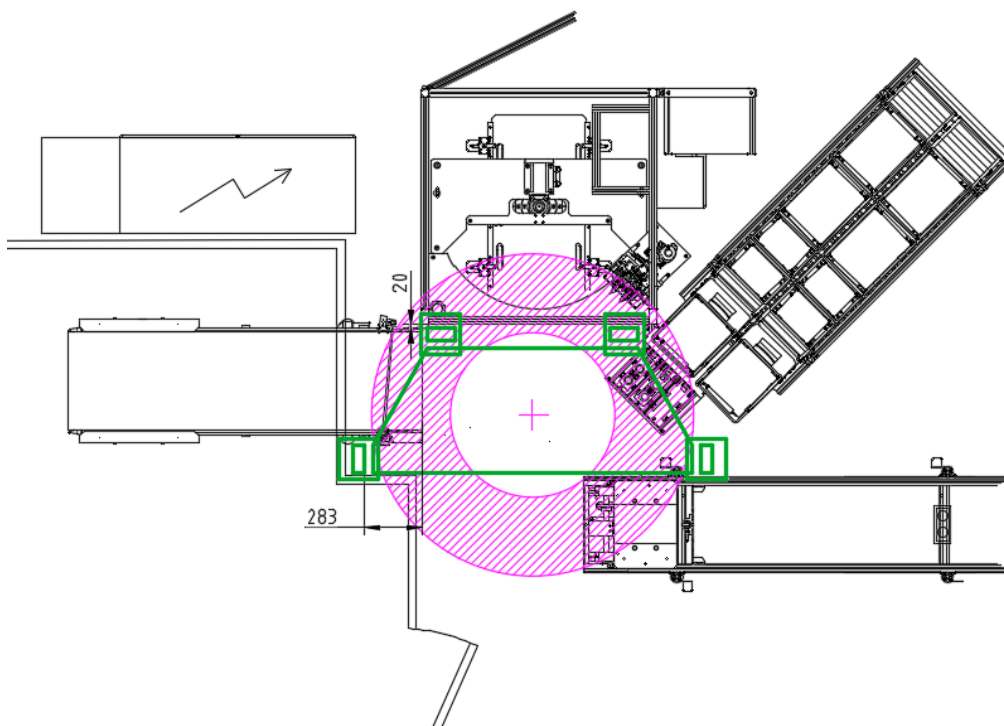


pozn.: výkres linky dostupný z interní výkresové dokumentace společnosti Brembo Czech, s.r.o.

Obr. 12 - Stávající situace stanice montáže brzdových pístků

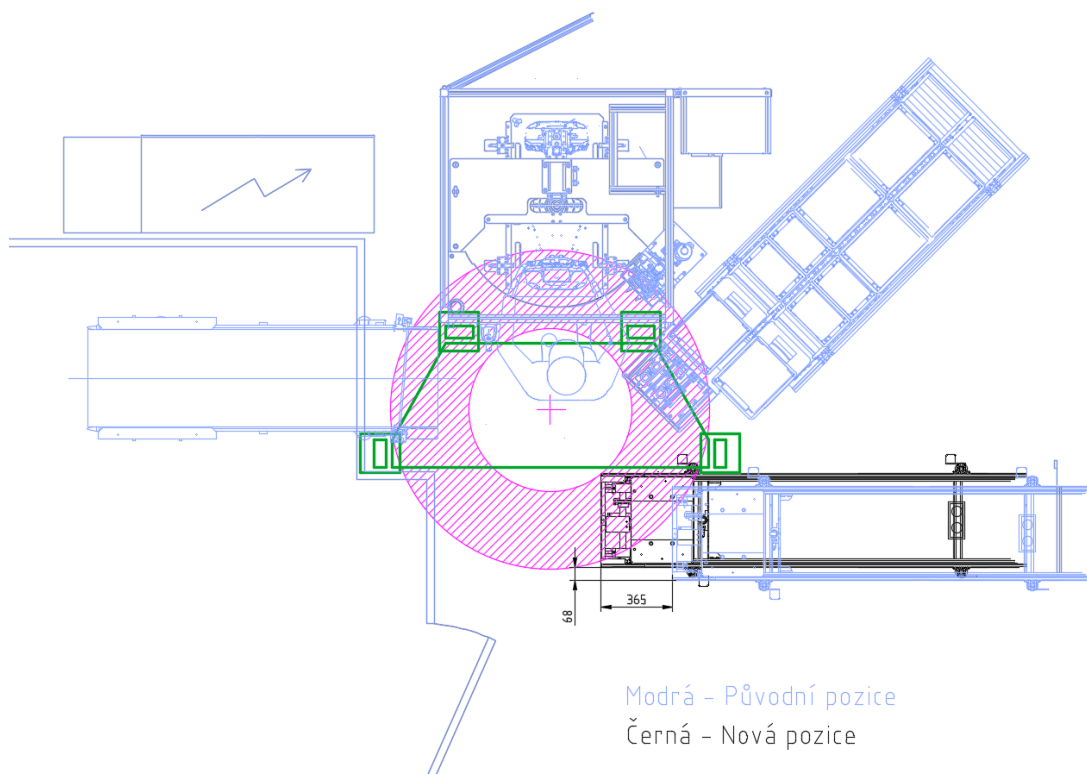


Obr. 13 - Fotka aktuálního stavu stanice



pozn.: výkres linky dostupný z interní výkresové dokumentace společnosti Brembo Czech, s.r.o.
 Fialové mezikruží určuje pracovní prostor robotu a zeleně je zakreslena pozice pro nosnou konstrukci robotu.

Obr. 14 - Návrh nového rozložení pracovního prostoru



pozn.: výkres linky dostupný z interní výkresové dokumentace společnosti Brembo Czech, s.r.o.

Obr. 15 - Nová pozice spolu s původní v překrytém schématu s vyznačenými kótami pro přesun dopravníku

3.4. Ekonomické zhodnocení návrhu

Cena robotu KUKA LBR iiwa 14 R820 se pohybuje okolo €60 000. Tato částka byla zjištěna po telefonické debatě s firmou KUKA, bohužel písemně tato informace není doložena, jelikož pro každou firmu a zákazníka dělá společnost KUKA zvlášť cenovou nabídku platnou pouze několik týdnů.

Dle kurzu ČNB ze dne 28.6.2018 1 EUR = 25,77 CZK.¹² Pořizovací cena robotu je tedy 1 546 200,- Kč.

Přibližná hrubá mzda operátora ve společnosti Brembo Czech, s.r.o. s příplatky za víkendy, noční směny a další bonusy činí cca 170,- Kč/h. Operátoři pracují ve čtyř-směnném provozu a průměrný měsíční fond činí 165 hodin.

KUKA uvádí pro robot více než 30 000 bezproblémových hodin provozního času robotu¹³, z tohoto důvodu budu předpokládat pro výpočet bezproblémový chod. Hodnota příkonu robotu je uváděna 1 100 W.¹⁴

Z důvodu diskrétnosti nebyly zjišťovány ceny nákupu elektřiny firmy Brembo Czech, s.r.o., z toho důvodu byla zjištěna cena elektřiny z dostupného ceníku společnosti ČEZ na internetu pro rok 2018. Pro tarif D01d je cena 4 326,36 Kč/MWh včetně daně a systémových služeb.¹⁵

V ekonomickém zhodnocení jsou použity dva srovnávací modely roční aplikace robotu:

1. návratnost robotu při nahrazení pouze jednoho operátora jedné výrobní směny.
2. návratnost při teoretickém plném nahrazení všech operátorů všech výrobních směn.

V obou modelech jsou odečteny z celkového fondu hodin tři týdny z důvodu odstávek výroby v důsledku například celozávodní dovolené v létě a během Vánoc, aby se výpočet co nejvíce přiblížil reálnému stavu. Dále je zde uvedena položka Ostatní, která zahrnuje odhad ceny výroby konstrukce, ceny motoru, dalších dílčích součástí a jejich opracování a v neposlední řadě servis, údržba, instalace a programování. Tyto částky není možno zjistit přesně, jelikož nacenění těchto položek je individuální pro každou firmu podle dodavatelů a jejich smluv se společností. Zanedbány jsou výdaje, které má firma s operátory, což jsou ještě například náklady na ošacení, náklady na stravné, případné prémie zaměstnancům a podobně.

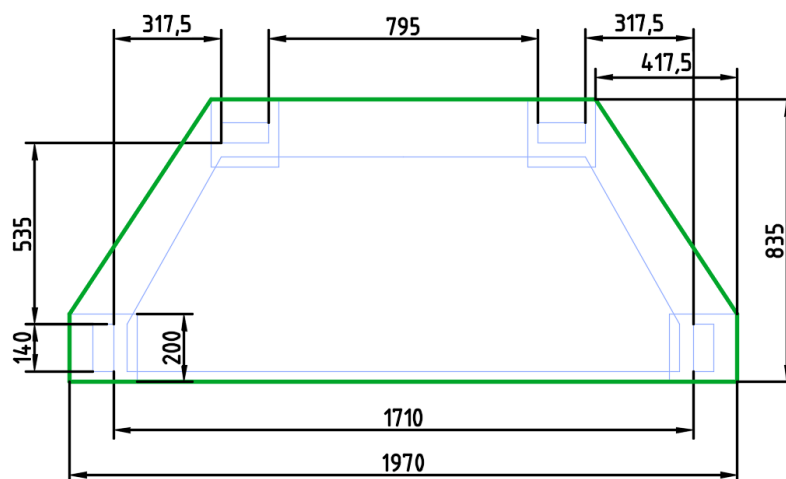


pozn. – 3D model robotu dostupný z <https://www.kuka.com/cs-cz/services/downloads>

Obr. 17 - Vizualizace řešení v programu Inventor

4.1. Návrh nosné pevné desky

Pevná deska, která bude spojovat stojny konstrukce musí být navržena s ohledem na rozmístění stojen konstrukce, na rozměrech pohyblivé nosné desky a na rozměrech lineárního vedení, které bude umístěno vertikálně na stojnách. Nosná pevná deska bude překrývat horní patky stojen a bude k nim připevněna pomocí šroubových spojů.



(modře – stojny a pohyblivá deska; zeleně – nosná pevná deska)

Obr. 18 - Rozměry pro rozmístění stojen se zakreslenou horní nosnou pevnou deskou a jejími rozměry

Byl zvolen polotovár pro desku z katalogu firmy Feron¹⁶:

Plech válcovaný za tepla, EN 10029-A-N, rozměr 20x1000x2000

Materiál S235JR+N (1.0038) dle EN 10025-2.

4.2. Návrh stojen konstrukce a jejich patek

Stojny konstrukce byly zvoleny z U-profilů pro jejich vysokou tuhost a pro využití rovné širší části profilu, kde bylo umístěno lineární vedení pohyblivé nosné desky a konzoly pro vymezení přesné spodní pozice desky. Ze stejných důvodů (vysoká tuhost, nutnost umístění lineárního vedení a konzol) musí být U-profil dostatečně velký, ale zároveň musí co nejméně narušovat dosavadní konstrukci linky.

Byl zvolen polotovár pro stojnu z katalogu firmy Feron¹⁷:

Profil U válcovaný za tepla, DIN 1026-1, U 140

Materiál S235JR (1.0038) dle EN 10025-2.

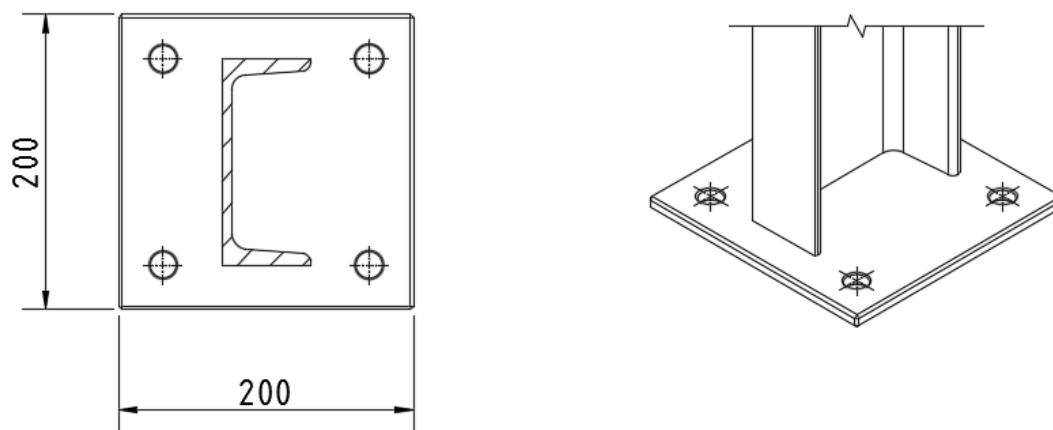
Výška stojny byla zvolena s ohledem na pracovní prostor robotu a člověka 3 400 mm.

Patky těchto stojen by měly mít rozměry, které zajistí stabilitu, možnost přivaření k U-profilu a ještě bude dostatečný prostor pro kotvení díry.

Byl zvolen polotovár pro patku z katalogu firmy Feron¹⁸:

Široká ocel válcovaná za tepla, DIN 59200(A), rozměr 200x10

Materiál S235JR+AR (1.0038) dle EN 10025-2.



Obr. 19 - Pohled na stojnu s kotvení patkou

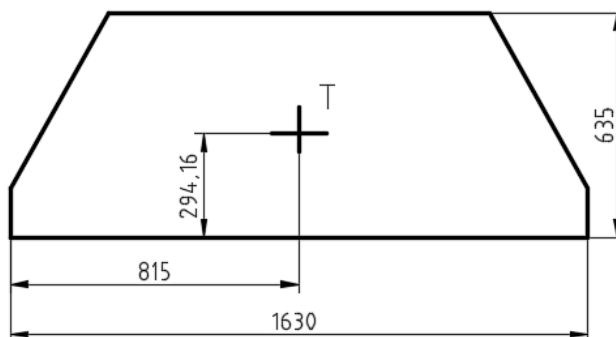
5. Návrh čisté stavební struktury

5.1. Návrh nosné pohyblivé desky

Nosná deska musí mít vysokou tuhost a odolávat průhybu pro zachování přesnosti robotu, který na ní bude ukotvený.

Byla zvolena tloušťka desky $t_d = 20$ mm.

Rozměry této desky byly zvoleny na základě rozmístění nosných U-profilů (nohou) budoucí konstrukce v místě stanice montáže brzdových pístků na výrobní lince.



Obr. 20 - Hrubé rozměry nosné desky a pozice těžiště

Byl zvolen polotovár pro desku z katalogu firmy Feron¹⁹:

Plech válcovaný za tepla, EN 10029-A-N, rozměr 20x1000x2000

Materiál S235JR+N (1.0038) dle EN 10025-2.

Kde minimální mez kluzu $R_e = 235$ MPa.

Hmotnost nosné desky m_d

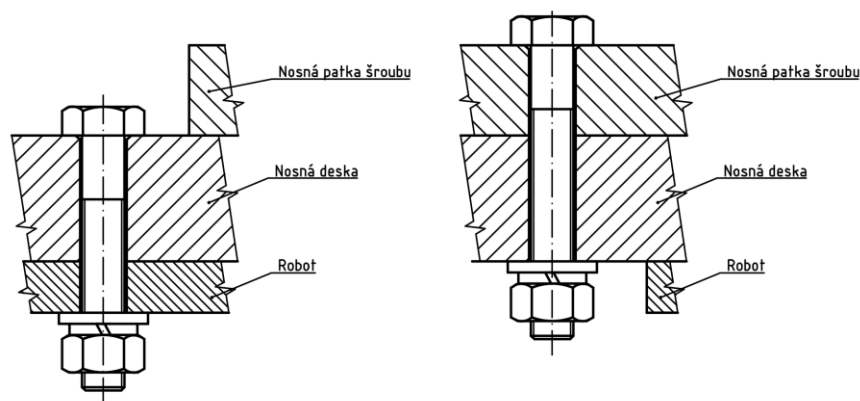
Hmotnost desky byla vypočítána pomocí softwaru Inventor.

$$m_d = 140,67 \text{ kg}$$

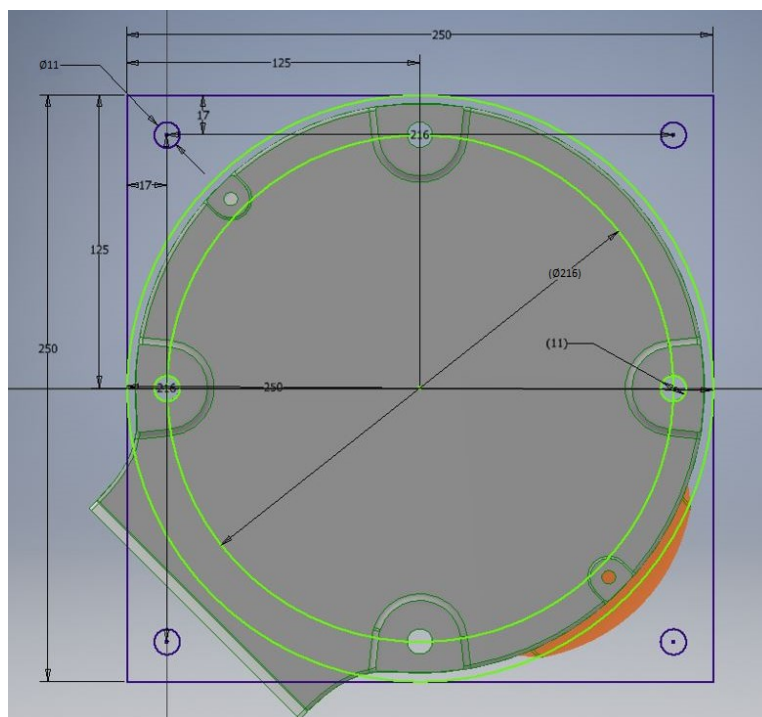
(3)

5.2. Návrh nosné patky pohybového šroubu a upínacích šroubů

Nosnou patku šroubu, která bude přivařená ke konci pohybového šroubu a pomocí níž bude přichycen pohybový šroub k nosné desce byl zvolen s ohledem na rozměry pro kotvení robotu. Rozměry šroubů pro kotvení robotu jsou dány konstrukcí robotu, kde díry $\text{Ø } 11 \text{ mm}^{20}$ odpovídají pro šroub velikosti M10. Tyto kotvy povedou skrze nosnou desku a robot, kde budou uchyceny matkami. Šrouby jsou dimenzovány pouze pro uchycení robotu, tudíž není možné je využít i jako upínací prvek nosné desky, z tohoto důvodu volím patku čtvercového průřezu s výřezy pro kotevní šrouby robotu. Kdyby tyto kotvy procházeli i patkou, byli by zatěžováni i silou od tíhy nosné desky.



Obr. 21 - Schématický náčrt uchycení robotu, nosné desky a nosné patky šroubu



pozn. – 3D model robotu dostupný z <https://www.kuka.com/cs-cz/services/downloads>

Obr. 22 - Pohled na model robotu zespodu s rozměry [mm] pro kotvení robotu a patky (vizualizace v programu Inventor)

Pro patku byl zvolen polotovár z katalogu firmy Ferona²¹:

Široká ocel válcovaná za tepla, DIN 59200(A), rozměr 250 x 10

Materiál: S235JR+AR (1.0038) dle EN 10025-2

Hmotnost polotovaru patky m_p

Pomocí softwaru Inventor byla zjištěna hmotnost patky

$$m_p = 4,52 \text{ kg} \quad (4)$$

5.2.1. Návrh upínacího šroubu desky

Předběžný malý průměr závitu šroubu

Pro návrh šroubu je třeba znát hmotnost všech součástí zatěžujících tento šroub. Hlavní části hmotnosti v tomto případě tvoří nosná deska a robot. Hmotnosti ostatních součástí (upínací šrouby, svary, vozíky lineárního vedení atd.) budou zahrnuty v koeficientu statické bezpečnosti při pevnostní kontrole.

Hmotnost zátěže uchycená na patce

$$m_{zp} = m_r + m_d = 40 + 140,47 = 180,67 \text{ kg} \quad (5)$$

Síla působící na jeden šroub

Byly zvoleny 4 šrouby pro uchycení desky s robotem k patce.

$$F_{1šr} = \frac{m_{zp} \cdot g}{4} = \frac{180,67 \cdot 9,81}{4} = 443,1 \text{ N} \quad (6)$$

Kde g je gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Z pevnostní kontroly na tah bude zjištěna potřebná velikost upínacího šroubu.

Byla zvolena pevnostní třída šroubu 4.6, kde minimální mez kluzu $R_e = 240 \text{ MPa}$.

Koeficient statické bezpečnosti byl zvolen $k_s = 5 [-]$.

$$\sigma_t \leq \sigma_{tD} \quad (7)$$

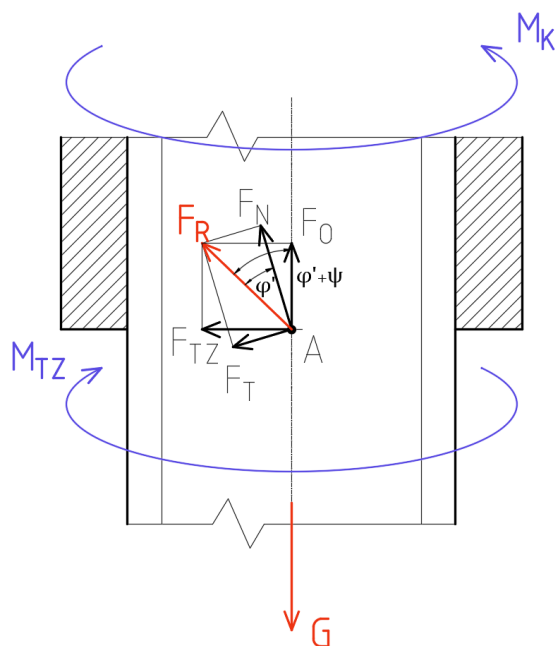
$$\frac{F_{1šr}}{\frac{\pi \cdot d'_3{}^2}{4}} \leq \frac{R_e}{k_s} \quad (8)$$

$$d'_3 \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{k_s \cdot F_{1šr}}{\pi \cdot R_e}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 443,1}{\pi \cdot 240}} = 3,43 \text{ mm} \quad (9)$$

Z konstrukčního hlediska a unifikace byl zvolen ŠROUB M10 ISO 4014 – 4.6.²²

5.3. Návrh pohybového šroubu

5.3.1. Rozbor zatížení šroubu



Obr. 23 - Rozbor zatížení šroubu

Při výpočtu se zjednodušeně předpokládá, že styk šroubu a matice se realizuje v bodě A na středním průměru závitu šroubu a matice $d_2 = D_2$. Pohybový šroub je namáhán spojitým zatížením na tah a krut. V bodě A vzniká silová reakce F_R od závitu matice. V důsledku tření v závitech F_T je reakční silový účinek matice F_R odkloněn od normálové reakce F_N o třecí úhel φ' . Jeho svislá složka představuje osovou tlakovou sílu ve šroubu F_0 . Vodorovná (obvodová) složka reakce F_{TZ} , resp. její moment M_{TZ} , představuje třecí odpor kladený závitem matice proti otáčejícímu pohybu šroubu.²³

Na pohybovém šroubu při zvedání břemene platí podmínky silové a momentové rovnováhy.

$$G = F_0 \quad (10)$$

$$M_K = M_{TZ} \quad (11)$$

$$M_{TZ} = F_{TZ} \cdot \frac{d_2}{2} \quad (12)$$

$$F_{TZ} = F_0 \cdot \operatorname{tg}(\psi + \varphi') \quad (13)$$

kde ψ [°] je úhel stoupání šroubovice závitu.

5.3.2. Návrh velikosti závitu

Velikost napětí v krutu je funkcí zatím několika neznámých geometrických parametrů závitu šroubu. Předběžný návrh závitu šroubu bude proveden z pevnostní podmínky pro prosté tahové namáhání se zohledněním vlivu zatím neznámého krutu, který bývá u jednoduchých závitů přibližně 30% pomocí součinitele β . Materiál šroubu musí být pevný a tvrdý, odolný proti opotřebení, závitová část šroubu tedy bude kalená. Aby se zabránilo nežádoucímu zpětnému chodu (samovolnému spuštění břemene jeho vlastní tíhou), závit musí být samosvorný. Byl tedy zvolen závit lichoběžníkový rovnoramenný a jednoduchý.²⁴

Byl zvolen materiál pro pohybový šroub z katalogu firmy Feron²⁵ C45+N (1.0503) dle EN 10083-2.

Kde minimální mez kluzu $R_e = 305$ MPa.

Koeficient pro zohlednění neznámého krutu byl zvolen $\beta = 1,3$ [-].

Součinitel statické bezpečnosti byl zvolen $k_s = 5$ [-].

Předběžný malý průměr závitu šroubu

$$\beta \cdot \sigma_t \leq \sigma_{tD} \quad (14)$$

$$\beta \cdot \frac{F_O}{\frac{\pi \cdot d'_3{}^2}{4}} \leq \frac{R_e}{k_s} \quad (15)$$

$$d'_3 \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{\beta \cdot k_s \cdot F_O}{\pi \cdot R_e}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,3 \cdot 5 \cdot 1\,816,7}{\pi \cdot 305}} = 7,02 \text{ mm} \quad (16)$$

$$G = F_O = m \cdot g = 185,19 \cdot 9,81 = 1\,816,7 \text{ N} \quad (17)$$

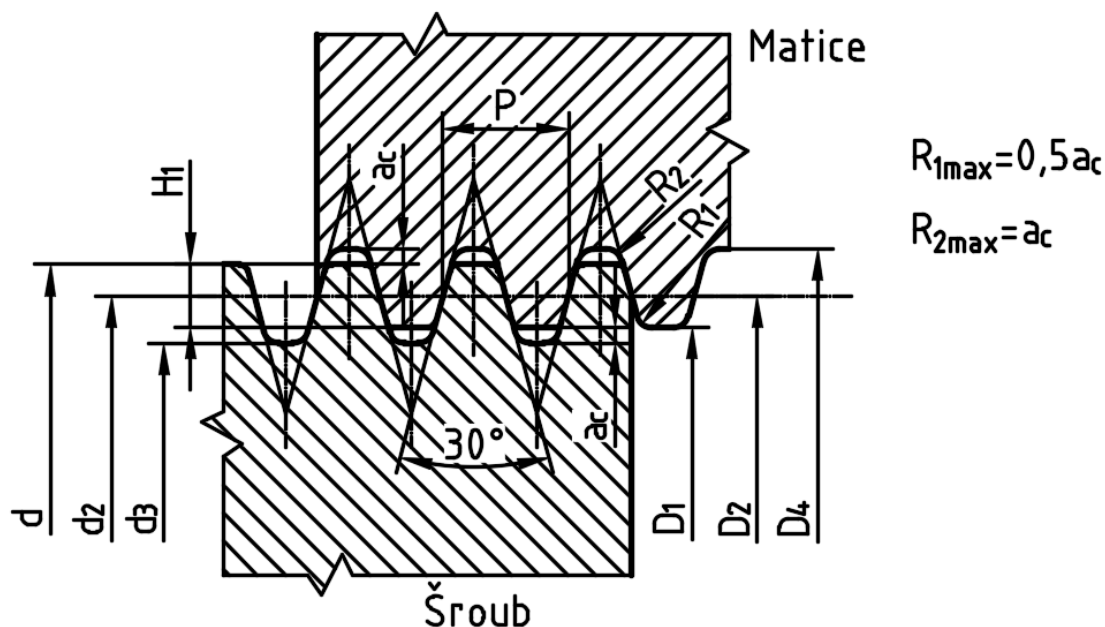
m je celková hmotnost všech součástí zatěžující pohybový šroub. Hlavní části této hmotnosti tvoří nosná deska, robot a patka. Ostatní součásti (upínací šrouby, svary, vozíky lineárního vedení atd.) budou zahrnuty v koeficientu statické bezpečnosti při pevnostní kontrole.

$$m = m_r + m_d + m_p = 40 + 140,67 + 4,52 = 185,19 \text{ kg} \quad (18)$$

Byl zvolen závit Tr 12 x 2 dle ČSN 01 4050.²⁶

Tab. 5 - Základní rozměry v mm lichoběžníkového rovnoramenného jednochodého závitu dle ČSN 01 4050²⁷

Jmenovitý průměr závitu	Rozteč	Průměr závitu					Vůle ve vrcholu závitu
		velký		střední	malý		
d	P	d	D_4	$d_2 = D_2$	d_3	D_1	a_c
12	2	12	12,5	11	9,5	10	0,25



Obr. 24 - Rovnoramenný jednochodý lichoběžníkový zvit dle parametrů Tab. 5

5.3.3. Pevnostní kontrola navrženého závitu

Úhel stoupání závitu

$$\psi = \arctg \frac{P}{\pi \cdot d_2} = \arctg \frac{2}{\pi \cdot 11} = 3,312^\circ \quad (19)$$

Redukovaný třecí úhel závitu

Výpočet závisí na součiniteli smykového tření f_z v závitech a sklonu boků závitu daným úhlem profilu. Součinitel smykového tření pro kombinaci materiálů ocel-ocel za sucha za klidu se uvádí v rozmezí 0,15 až 0,2. Značně závisí na provozních podmínkách a jakosti obroběných ploch.²⁸

Byl zvolen $f_z = 0,2$.

$$\varphi' = \arctg \frac{f_z}{\cos \frac{30^\circ}{2}} = \arctg \frac{f_z}{\cos 15^\circ} = \arctg \frac{0,2}{\cos 15^\circ} = 11,698^\circ \quad (20)$$

Samosvornost závitu zvedáku

$$\psi \leq \varphi' \Rightarrow 3,312 \leq 11,698 \Rightarrow \text{Podmínka splněna} \quad (21)$$

Třecí moment v závitu

$$\begin{aligned} M_{TZ} &= F_O \cdot \operatorname{tg}(\psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2} = 1\,816,7 \cdot \operatorname{tg}(3,312 + 11,698) \cdot \frac{11}{2} \\ &= 2\,679,3 \text{ Nmm} \end{aligned} \quad (22)$$

Normálové napětí v tahu

$$\sigma_t = \frac{F_O}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{1\,816,7}{\frac{\pi \cdot 9,5^2}{4}} = 25,63 \text{ MPa} \quad (23)$$

Smykové napětí v krutu

$$\tau = \frac{M_{TZ}}{W_{Kz}} = \frac{M_{TZ}}{\frac{\pi \cdot d_3^3}{16}} = \frac{2\,679,3}{\frac{\pi \cdot 9,5^3}{16}} = 15,9 \text{ MPa} \quad (24)$$

Redukované napětí

$$\sigma_{redz} = \sqrt{\sigma_t^2 + 4 \cdot \tau^2} = \sqrt{25,63^2 + 4 \cdot 15,9^2} = 40,87 \text{ MPa} \quad (25)$$

Pevnostní kontrola jádra závitu podle Guestovy hypotézy

$$k_s = \frac{R_e}{\sigma_{redz}} = \frac{305}{40,87} = 7,46 \geq k_s = 5 \Rightarrow \text{podmínka vyhovuje} \quad (26)$$

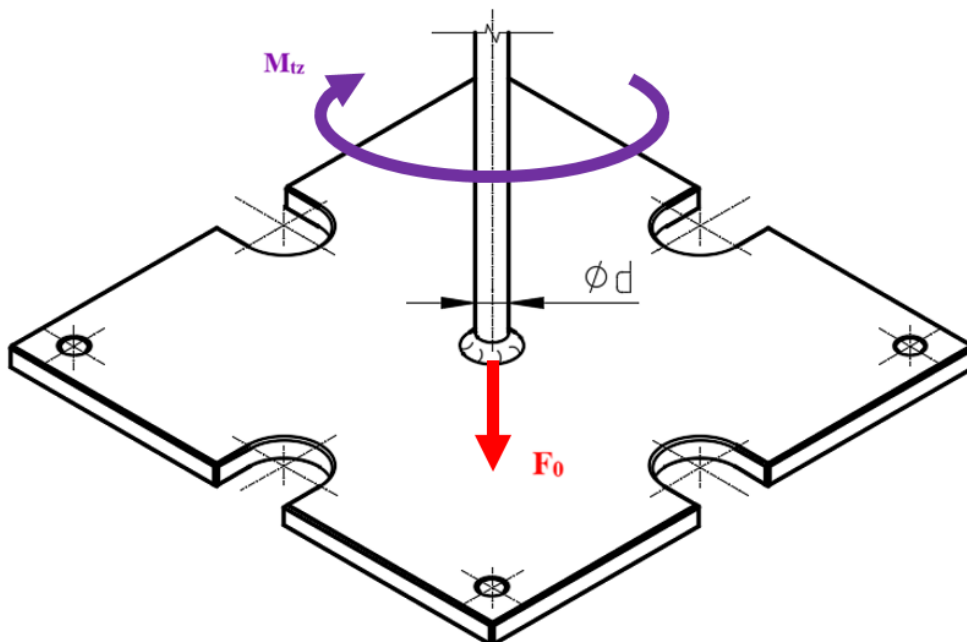
5.3.4. Volba polotovaru pro šroub

Byl zvolen z katalogu firmy Feron²⁹ pro pohybový šroub polotovar Tyč kruhová tažená za studena, EN 10278, úchylka h9, průměr 12, délka 1 800 mm.

Závit nebude po celé délce tyče, bude končit 50 mm před okrajem z důvodu uchycení pomocí svarového spoje k nosné patce.

5.4. Návrh svarového spoje šroubu s patkou

Pohybový šroub bude k patce přivařen. Tento svar bude dle působících sil namáhán tahovým napětím silou F_0 a napětím v krutu od momentu M_{tz} .



Obr. 25 - Vizualizace svarového spoje pohybového šroubu a patky se znázorněním zatížení

Bylo zvoleno ruční svařování elektrickým obloukem elektrodou o stejné pevnosti jako materiál svařovaných součástí. Velikost svaru šroubu byla zvolena $a_s = 4$ mm.

Mez kluzu pro svar $R_e = 235$ MPa

Součinitel bezpečnosti byl zvolen $k_s = 5$ [-].

Hodnoty převodních součinitelů svarového spoje

Tab. 6 - Velikosti převodních součinitelů svarového spoje³⁰

Koutový svar vzhledem k zatížení		Hodnota [-]
Čelní	k_3	0,75
Boční	k_4	0,65

Součinitel tloušťky koutového svaru šroubu pro $t_s < 10$ mm³¹

$$\beta_s = 1,3 - 0,03 \cdot t_s = 1,3 - 0,03 \cdot 5,64 = 1,131 \text{ [-]} \quad (27)$$

$$\text{Kde } t_s \doteq 1,41 \cdot a_s = 1,41 \cdot 4 = 5,64 \text{ mm} \quad (28)$$

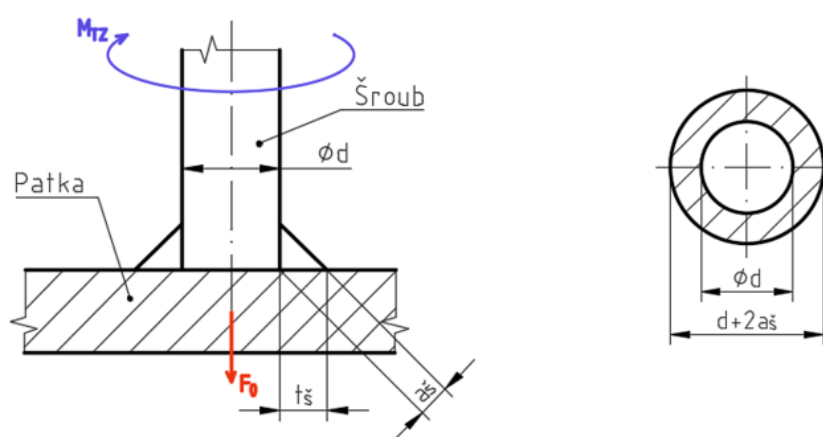
Pro tahové napětí šroubu platí:

$$\sigma_{\perp\check{s}} = \frac{F_o}{S_{sv\check{s}}} \leq \sigma_{\perp D\check{s}} = k_3 \cdot \frac{R_e}{k_s} \quad (29)$$

$$\sigma_{\perp\check{s}} = \frac{F_o}{S_{sv\check{s}}} = \frac{1\,816,7}{201,1} = 9,05 \text{ MPa} \quad (30)$$

Kde $S_{sv\check{s}}$ je plocha nosného průřezu svaru šroubu sklopená do roviny připojení, která se vypočte jako plocha mezikruží.

$$S_{sv\check{s}} = \frac{\pi \cdot [(d + 2 \cdot a_{\check{s}})^2 - d^2]}{4} = \frac{\pi \cdot [(12 + 2 \cdot 4)^2 - 12^2]}{4} = 201,1 \text{ mm}^2 \quad (31)$$



Obr. 26 - Schématické znázornění svaru a plochy nosného průřezu svaru šroubu sklopené do roviny připojení

Pro napětí v krutu platí:

$$\tau_{\parallel\check{s}} = \frac{M_{tz}}{W_{k\check{s}}} \leq \tau_{\parallel D\check{s}} = k_4 \cdot \frac{R_e}{k_s} \quad (32)$$

$$\tau_{\parallel\check{s}} = \frac{M_{tz}}{W_{k\check{s}}} = \frac{2\,679,3}{1\,367,2} = 1,96 \text{ MPa} \quad (33)$$

Kde $W_{k\check{s}}$ je modul průřezu v krutu plochy svaru šroubu.

$$W_{k\check{s}} = \frac{\pi \cdot (d + 2 \cdot a_{\check{s}})^4 - d^4}{16 \cdot (d + 2 \cdot a_{\check{s}})} = \frac{\pi \cdot (12 + 2 \cdot 4)^4 - 12^4}{16 \cdot (12 + 2 \cdot 4)} = 1\,367,2 \text{ mm}^3 \quad (34)$$

Pevnostní kontrola svaru šroubu při kombinovaném namáhání

Počítá se napětí v horním, nejvíce namáhaném vlákne svaru a to se vypočítá pomocí převodních součinitelů a součinitele tloušťky koutového svaru.³²

$$\sigma_{redš} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\perpš}}{k_3}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallelš}}{k_4}\right)^2} \leq \beta_s \cdot \frac{R_e}{k_s} \quad (35)$$

$$\sigma_{redš} = \sqrt{\left(\frac{9,05}{0,75}\right)^2 + \left(\frac{1,96}{0,65}\right)^2} \leq 1,131 \cdot \frac{235}{5} \rightarrow 12,44 \leq 53,2 \text{ MPa} \quad (36)$$

→ podmínka vyhovuje

5.5. Návrh výšky matice

Výška matice h_M [mm] se určuje s ohledem na opotřebení závitů. Nepřímo se vychází z kontroly měrného tlaku v závitech, který má největší vliv na velikost opotřebení závitů šroubu a matice. Počet závitů matice se vypočítá z kontroly tlaku ze zjednodušujícího předpokladu, že osová síla ve šroubu F_0 je rozdělena rovnoměrně na všechny závity matice. Tření mezi závity a nerovnoměrné rozdělení tlaku v závitech, kdy první závity matice nesou největší zatížení, se respektuje sníženou hodnotou dovoleného měrného tlaku p_D . Jelikož byla zvolena kombinace materiálu pro šroub a matici ocel-ocel, bude lepší povrch závitů matice povrchově upravit (kalit nebo nitridotat) pro zvýšení odolnosti proti otěru. Z důvodu co nejmenšího opotřebení závitů třením se volí co nejmenší dovolený měrný tlak. Na základě provozních a experimentálních poznatků pro kombinaci materiálů šroubu a matice ocel-ocel $p_D = 20 \text{ MPa}$.³³

Byl zvolen materiál pro matici z katalogu firmy Ferona³⁴ C45+N (1.0503) dle EN 10083-2.

Nosná hloubka závitu

Výška H_1 z Obr. 24 a Tab. 5:

$$H_1 = \frac{d - D_1}{2} = \frac{12 - 10}{2} = 1 \text{ mm} \quad (37)$$

Počet závitů matice

$$p_{mat} = \frac{F_0}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot z} \leq p_D \quad (38)$$

$$z \geq \frac{F_0}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot p_D} = \frac{1\,816,7}{\pi \cdot 11 \cdot 1 \cdot 20} = 2,63 \doteq 3 \text{ závity} \quad (39)$$

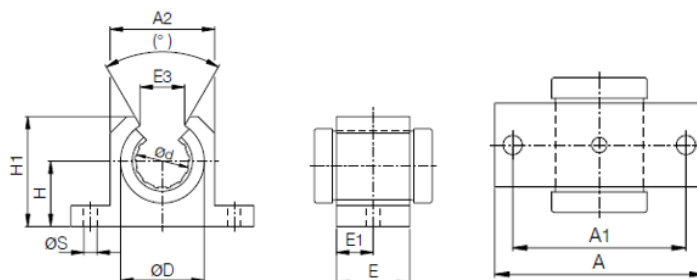
Nutná výška matice

$$h_M = z \cdot P = 3 \cdot 2 = 6 \text{ mm} \quad (40)$$

5.6. Návrh lineárního vedení

Lineární vedení bylo zvoleno z katalogu firmy IGUS³⁵.

Ložiskový domek, otevřený, krátká verze OGAS-01-12

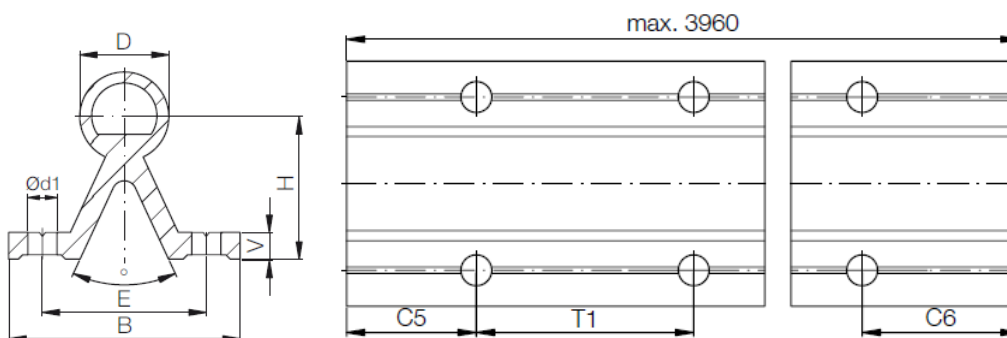


Obr. 27 - Schéma ložiskového domku OGAS firmy IGUS³⁶

Tab. 7 - Rozměry ložiskového domku OGAS firmy IGUS³⁷

Část č. standardní s OJUM-01	Samo- stavitelné s OJUM-03	d [mm]	D [mm]	H [mm]	H1 [mm]	A [mm]	A1 [mm]	A2 [mm]	E [mm]	E1 [mm]	E3 [mm]	(°)	S [mm]
OGAS-01-12	OGAS-03-12	12	22	18	28	52	42	30	20	10	14	78	5,3

Hliníková hřídel s podpěrou AWMU-12



Obr. 28 - Schéma hřídele lineárního vedení AWMU firmy IGUS³⁸

Tab. 8 - Rozměry pro hřídel lineárního vedení AWMU firmy IGUS³⁹

Díl č.	D [mm]	B [mm]	H [mm]	V [mm]	d1 [mm]	(°)	E [mm]	T1 [mm]	C5/C6 min.	C5/C6 max.	Max.hmotnost délka [kg/m] [mm]		
AWMU - 12, L in mm	-0,1		±0,25		4,5	50	±0,25	29	75	20	57	3950	0,750

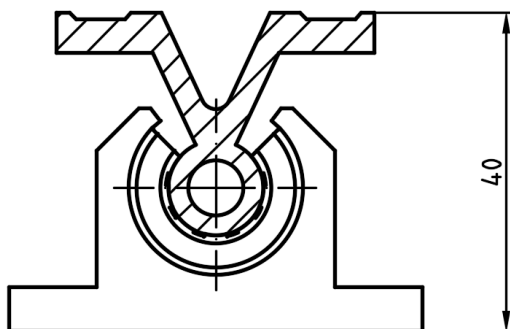
Délka hřídele lineárního vedení byla zvolena na základě závislých rozměrů (zdvihu nosné desky) 1 700 mm.

Rozměr smontovaného celku

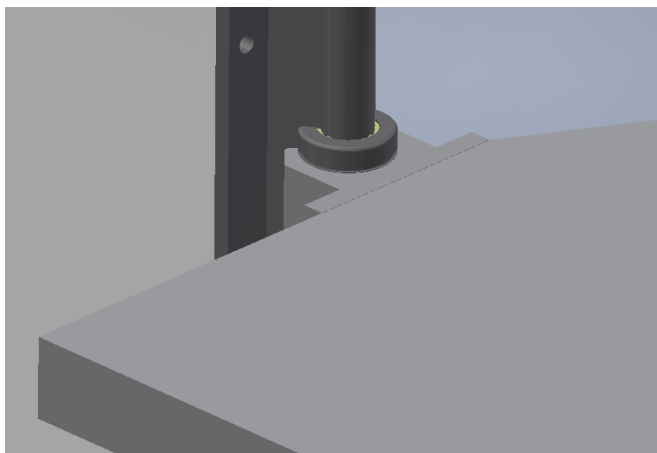
Tento rozměr, důležitý pro vzájemné rozměry stojen, pohyblivé nosné desky a pevné nosné desky, byl zjištěn z rozměrů daných výrobcem lineárního vedení. Rozměr znázorněn na schématu níže Obr. 29.

Celková výška vedení H_c

$$H_c = H_{\text{ložiskového domku}} + H_{\text{hřídele}} = 18 + 22 = 40 \text{ mm} \quad (41)$$



Obr. 29 - Schéma smontovaného celku – hřídel s ložiskovým domkem



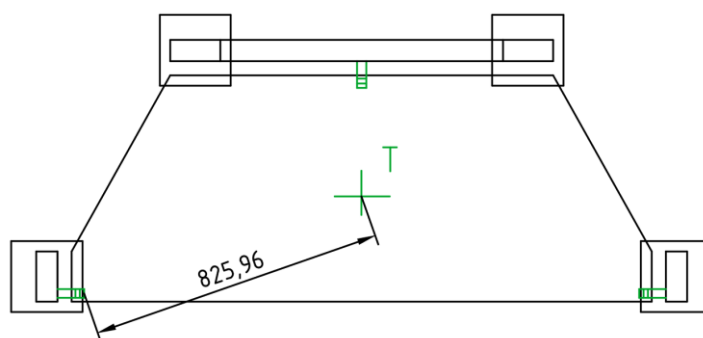
pozn.: 3D modely lineárního vedení dostupné na <https://www.igus-cad.com/>

Obr. 30 - Vizualizace lineárního vedení v programu Inventor

5.7. Návrh konzol s dosedacími hranami

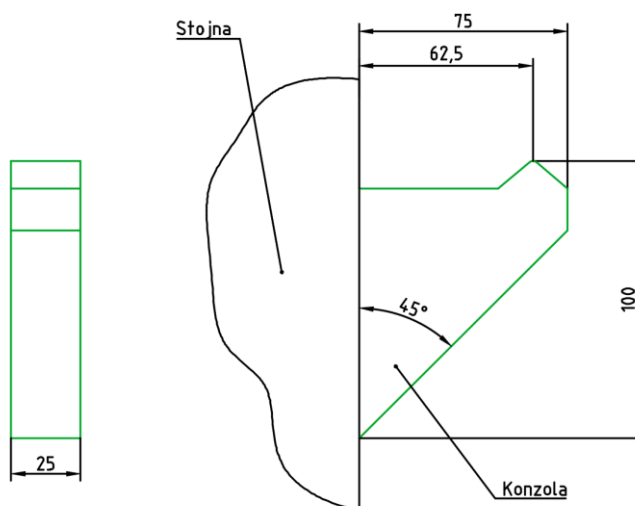
Konzoly s dosedacími hranami pro zajištění nosné pohyblivé desky ve spodní úvrati by měly být tři z důvodu jednoznačného definování roviny. Při výpočtu bude nutno zohlednit hlavně statické účinky, jelikož dynamické bude přenášet především lineární vedení a závit pohybového šroubu. Určité dynamické zatížení bude působit i na konzoly, ale to je zohledněno

bezpečnostním koeficientem. Komplexnější průběhy zatížení jsou řešeny později v kapitole 5.11. kontrolou pomocí MKP.



Obr. 31 - Schéma rozmístění konzol na stojnách a pozice těžiště

Třetí konzola byla umístěna na zvláštní část konstrukce, která bude mezi dvěma stojnami u stanice a bude tvořit horizontální nosník. Konzola bude v ose desky tak, aby rovinu definoval rovnoramenný trojúhelník. Horizontální nosník bude ze stejného U-profilu jako stojny a bude ke stojnám přivařen.



Obr. 32 - Schéma konzoly s vrchní hranou

5.7.1. Rozbor zatížení jednotlivých konzol

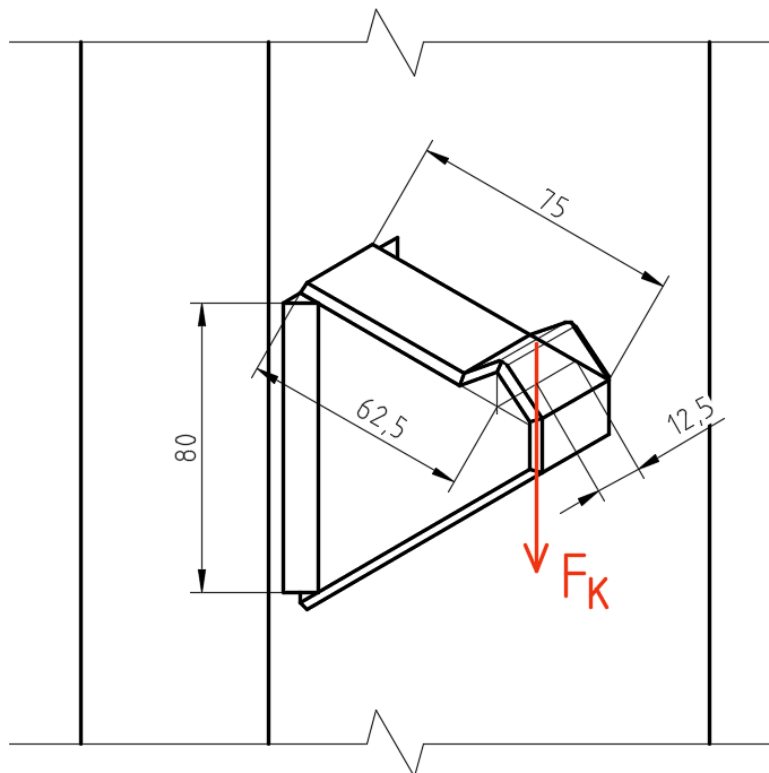
Zatěžující síla je situována doprostřed hrany každé konzoly.

Zatěžující síla je definována v ose těžiště nosné desky a generuje ji z hlavní části tíhová síla samotné desky, robotu a patky robotu, tudíž je definována jako v kapitole 5.3.2. pro výpočet pohybového šroubu ze vztahu (17). Z důvodu bezpečnosti a také z důvodu možnosti nerovnoměrného dosedání desky na konzoly je uvažováno maximální zatížení na jednu konzolu které reprezentuje celková síla a není poměrově rozložena do jednotlivých reakcí.

5.7.2. Návrh nosné konzoly

Pro konzolu byl zvolen z katalogu firmy Feron⁴⁰ polotovár Široká ocel válcovaná za tepla, DIN 59200(A), rozměr 200 x 25.

Materiál S235JR+AR (1.0038) dle EN 10025-2.



Obr. 33 - Schéma přivařené konzoly ke stojně a její zatížení

Konzola bude ke stojně přivařena po bocích dvěma koutovými svary. Svar bude od síly působící na konci konzoly namáhán kombinovaným namáháním ohybem a smykem.⁴¹

Bylo zvoleno ruční svařování elektrickým obloukem elektrodou o stejné pevnosti jako materiál svařovaných součástí. Velikost svaru konzoly byla zvolena $a_k = 4$ mm. Délka svaru je dle Obr. 33;

$$l = 80 \text{ mm.}$$

Mez kluzu pro svar $R_e = 235$ MPa.

Součinitel bezpečnosti Byl zvolen $k_s = 5$ [-].

Hodnoty převodních součinitelů svařového spoje konzoly k_3 a k_4 jsou uvedeny v Tab. 6.

Součinitel tloušťky koutového svaru konzoly pro $t_s < 10$ mm je vypočítán ve vztahu (27).

Napětí ve smyku

$$\tau_{\parallel k} = \frac{F_K}{S_{svk}} \leq \tau_{\parallel kD} = k_4 \cdot \frac{R_e}{k_s} \quad (42)$$

$$\tau_{\parallel k} = \frac{F_K}{S_{svk}} = \frac{1\,816,7}{640} = 2,84 \text{ MPa} \quad (43)$$

Kde S_{svk} je plocha nosného průřezu svaru konzoly sklopená do roviny připojení:

$$S_{svk} = 2 \cdot a_k \cdot l = 2 \cdot 4 \cdot 80 = 640 \text{ mm}^2 \quad (44)$$

Napětí v ohybu

$$\sigma_{\perp k} = \frac{M_o}{W_{osvk}} \leq \sigma_{\perp kD} = k_3 \cdot \frac{R_e}{k_s} \quad (45)$$

$$\sigma_{\perp k} = \frac{M_o}{W_{osvk}} = \frac{113\,544,6}{8\,533} = 13,31 \text{ MPa} \quad (46)$$

Kde W_{osvk} je modul průřezu v ohybu svaru konzoly:

$$W_{osvk} = 2 \cdot \frac{a_k \cdot l^2}{6} = 2 \cdot \frac{4 \cdot 80^2}{6} = 8\,533 \text{ mm}^3 \quad (47)$$

Kde M_o je ohybový moment působící na svar konzoly (z Obr. 33):

$$M_o = F_K \cdot 62,5 = 1\,816,7 \cdot 62,5 = 113\,544,6 \text{ Nmm} \quad (48)$$

Pevnostní kontrola svaru při kombinovaném namáhání

Počítá se napětí v horním, nejvíce namáhaném vlákne svaru a to se vypočítá pomocí převodních součinitelů a součinitele tloušťky koutového svaru.⁴² Součinitel β_k bude stejný jako součinitel β_s z důvodu stejné velikosti koutového svaru.

$$\sigma_{redk} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\perp k}}{k_3}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel k}}{k_4}\right)^2} \leq \beta_k \cdot \frac{R_e}{k_s} \quad (49)$$

$$\sigma_{redk} = \sqrt{\left(\frac{13,31}{0,75}\right)^2 + \left(\frac{2,84}{0,65}\right)^2} \leq 1,131 \cdot \frac{235}{5} \rightarrow 18,27 \leq 53,16 \text{ MPa} \quad (50)$$

→ podmínka vyhovuje

5.8. Návrh pohybového ústrojí

5.8.1. Návrh motoru

Pro návrh motoru je třeba znát hmotnost břemene a rychlost zvedání. Parametry pro objednávku motoru jsou otáčky a výkon. Otáčky jsou závislé na rychlosti, kterou se má

břemeno zvedat a výkon je závislý na těchto otáčkách. Rychlost zdvihu pro tuto aplikaci není zvlášť významná, jelikož se robot s deskou bude zvedat nebo spouštět jen občas, tudíž rychlost neovlivní samotný výrobní proces. Hodnota rychlosti bude zvolena přibližně a následně bude přizpůsobena zvolenému motoru.

Rychlost byla navržena na $v \doteq 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Otáčky motoru

Rychlost je závislá na otáčkách a stoupání závitu. Stoupání je v případě jednoduchého závitu stejné jako rozteč z Tab. 5: $P = P_h = 2 \text{ mm}$.

$$v = n \cdot P_h \quad (51)$$

$$n = \frac{v}{P_h} = \frac{10}{2} = 5 \text{ s}^{-1} = 300 \text{ min}^{-1} \quad (52)$$

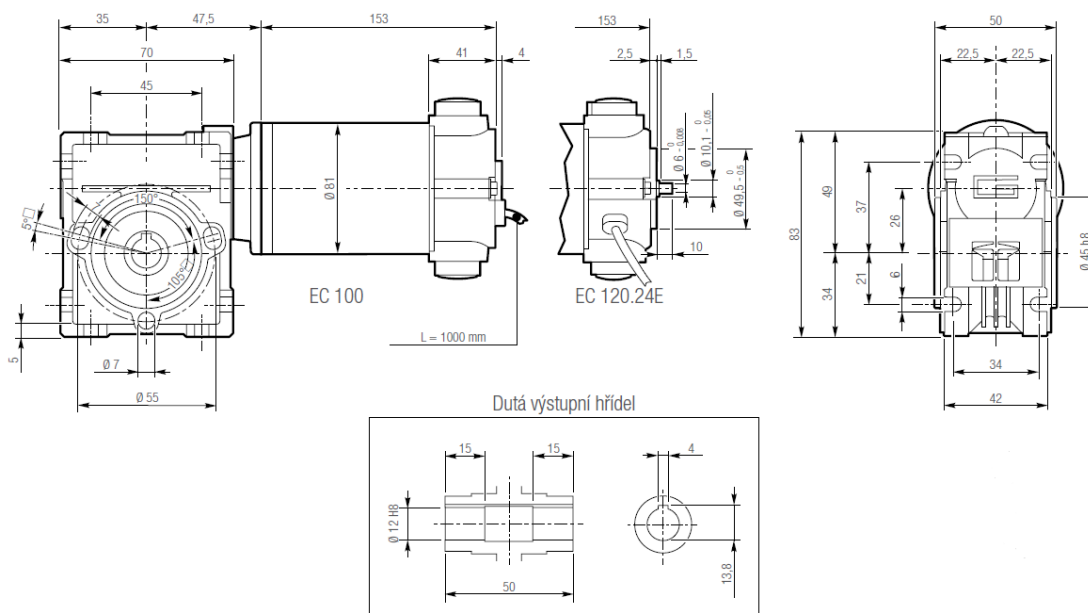
Potřebný výkon motoru

$$P_m = M_{tz} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n = 2,68 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 5 = 84,2 \text{ W} \quad (53)$$

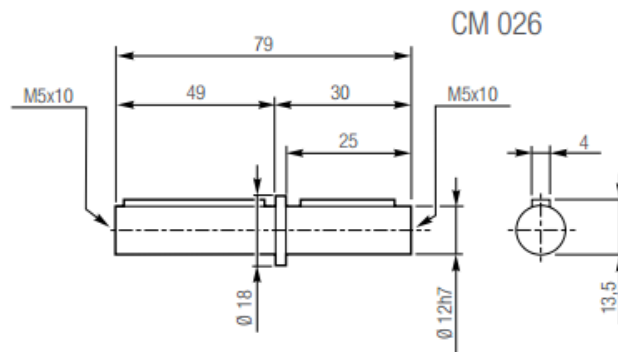
Byl zvolen motor z katalogu firmy Raveo⁴³ ECM 100/026 U 10 SZDX 120

Tab. 9 - Parametry zvoleného motoru⁴⁴

Výstupní výkon	Výstupní rychlost	Výstupní moment
140 W	300 min ⁻¹	3,8 Nm



Obr. 34 - Rozměry motoru ECM 100/026 U⁴⁵



Obr. 35 - Rozměry výstupní hřídele pro ECM 100/026⁴⁶

5.8.2. Návrh řemenového převodu

Z důvodu, že převod je realizován pomocí převodovky u motoru, budou zachovány obě řemenice stejného průměru. Hnaná řemenice bude součástí pohybové matice šroubu.

Byla zvolena z katalogu firmy Tyma⁴⁷ hnací řemenice 22-08M-20 TB a upínacím pouzdem Taper TB 1008 - 12.

Přenášený moment bude 3,8 Nm (Tab. 9). Spojení hřídele s nábojem je zajištěno pomocí pera těsného. Pouzdro Taper splňuje tento požadavek na přenos žádaného momentu.

Typ 8M - Pro řemeny HTD 8M (resp. RPP 8) - rozteč 8,0mm / For belts HTD 8M (RPP 8) - Pitch 8,0mm

Zubů / Teeth	Šíř.f. / Width	Označení / Obj.č. / Part.No.	Typ / Fig.	*Mat. / Mat.	Pouzdro / Bush	Dp [mm]	De [mm]	Df [mm]	Dm [mm]	Di [mm]	F [mm]	S [mm]	R [mm]	m [kg]
22	20	22-08M-20 TB	5F	ST	1008	56,02	54,65	60,00	-	41,00	28,0	22,0	6,0	0,24

Obr. 36 - Rozměry ozubené řemenice⁴⁸

Příklad objednávky: Obj.číslo/ Part.No. = TB 1610 - 25

Upínací pouzdra Taper / Taper Bushes

Typ-Obj.č. / Part.No.	Rozměry / Dimensions			Typ / Type	Up.šrouby/Clamp Screws			Moment/Torque			Svěrná síla / Clamp force [N]	Hmotnost / Weight [kg]
	D od-do [mm]	D max [mm]	L [mm]		Typ/ Type	Klíč / Wrench	Moment/ Torq.Nm	D= [mm]	bez pera [Nm]	s perem [Nm]		
1008	10-25	35,0	22,3	A	1/4x1/2	3	5,7 (4,7)*	12	22		3990	0,12
								19	37	136	4940	
								24	58		5490	

D = 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 24, 25

* Snížené hodnoty utahovacích momentů při montáži na hřídel s perem.

Obr. 37 - Rozměry upínacího pouzdra Taper pro řemenici⁴⁹

Pro zajištění náboje na hřídeli byly zvoleny:

POJISTNÁ DESKA ČSN 02 2703 – 18⁵⁰

ŠROUB M5x16 ISO 4014 – 4.6⁵¹

PODLOŽKA 5 ČSN 02 1741.01⁵²

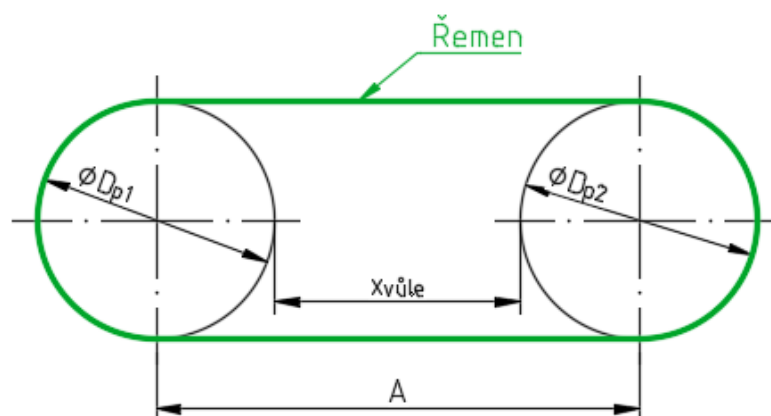
Maximální obvodová rychlost

$$v_{max} = \pi \cdot D_p \cdot n = \pi \cdot 0,05602 \cdot 5 = 0,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (54)$$

Maximální obvodová rychlost je pro běžné typy obvodových řemenů 40 – 50 m/s.⁵³ To znamená, že navržený řemen splňuje podmínku.

Délka řemene

Minimální délka řemene musí vyjít z délky opásání obou řemenic a mezi těmito řemenicemi je žádoucí mít vůli. Vůle byla navržena $x_{vůle} = 50 \text{ mm}$.



Obr. 38 - Schématické zobrazení řemene a řemenic

Roztečné průměry obou řemenic byly zvoleny stejné $D_{p1} = D_{p2} = D_p$ dle Obr. 38.

Minimální délka řemene L_{wmin} tedy bude z Obr. 38:

$$L_{wmin} = \pi \cdot D_p + 2 \cdot (x_{vůle} + D_p) = \pi \cdot 56,02 + 2 \cdot (50 + 56,02) = 388,16 \text{ mm} \quad (55)$$

Z katalogu firmy Tyma⁵⁴ byl zvolen řemen 08M – 408 – 20.

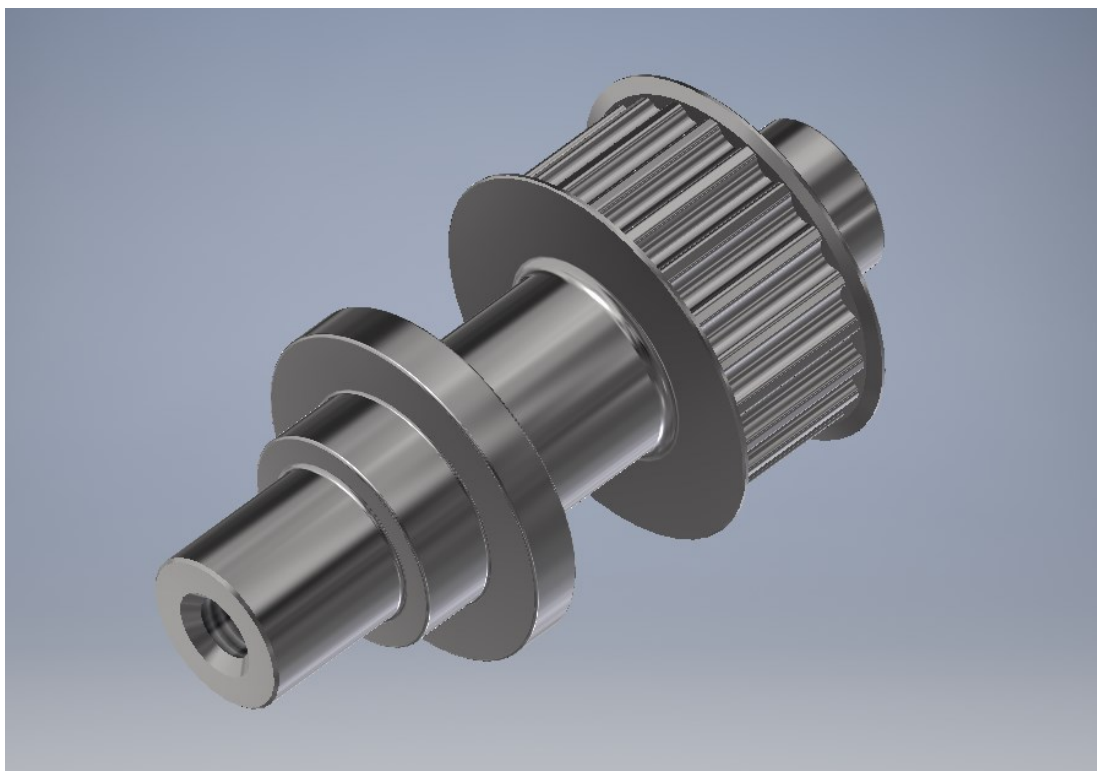
Délka řemene vybrané varianty: $L_w = 408 \text{ mm}$.

$$L_w = \pi \cdot D_p + 2 \cdot A \quad (56)$$

Osová vzdálenost A :

$$A = \frac{L_w - \pi \cdot D_p}{2} = \frac{408 - \pi \cdot 56,02}{2} = 116 \text{ mm} \quad (57)$$

5.8.3. Návrh pohybové matice šroubu



Obr. 39 - Vizualizace matice

Matice bude v řemenovém převodu sloužit jako hnaná řemenice a bude mít stejný roztečný průměr jako hnací. Rozměry musí být voleny s ohledem na instalovaný motor s převodovkou, na ložisko a na pohybový šroub. Minimální výška závitu matice v kapitole 5.5. vyšla 6 mm. Závít bude zvolen průchozí skrz celé tělo matice z důvodu lepšího vedení závitové tyče.

Rozměry jsou uvedeny v příloze ve výrobním výkresu matice - Výkres BED173-2019-BP-02 – Pohybová matice.

5.8.4. Návrh ložiska

Ložisko, které bude zajišťovat rotační pohyb matice v nosné horní desce, musí být schopno přenést jak axiální, tak i radiální zatížení. Hlavní část napětí bude v axiálním směru, v radiálním směru je třeba zajistit mechanismus proti pohybu od pohonu. Z důvodu zvýšení tuhosti celého mechanismu a zajištění proti pohybu matice směrem nahoru po šroubu bude stejné ložisko umístěno na opačné straně matice.

S ohledem na závislé rozměry a zatížení bylo zvoleno z katalogu firmy ZKL⁵⁵ ložisko 7205B.

7205B						
Typ Type	7205B					
Konstrukce Design	Jednořadá kuličková ložiska s kosohýlným stykem					
Hlavní rozměry Dimensions	d	D	B	r _s (min)	r _{1s} (min)	a
	mm					
Výkonové parametry Performance parameters	Cr	Cor	Pu	MFO-pl. maz.	MFO - olej	
	kN			min ⁻¹		
Připojovací rozměry Mounting Dimensions	d _s (min)	D ₂ (max)		r _a (max)		
	30.6	46.4		1		
Hmotnost Mass	- [kg]					
	0.13					

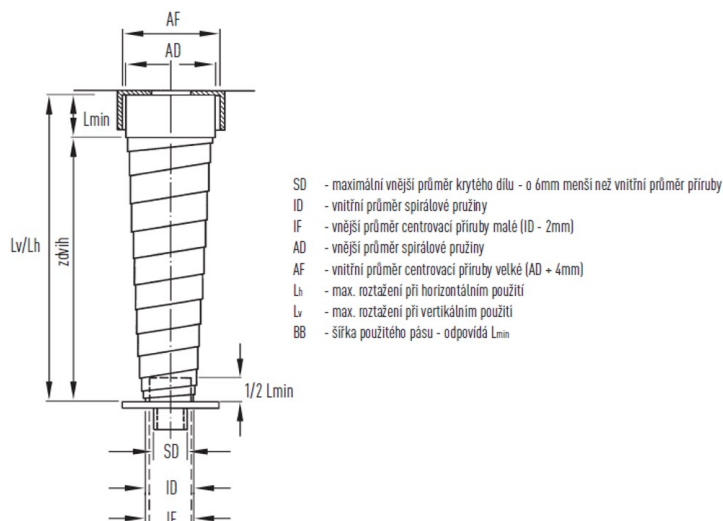
Obr. 40 - Ložisko 7205B z katalogu firmy ZKL⁵⁶

5.9. Návrh krytů pohybového šroubu

Pohybový šroub by měl být zakrytován, aby se do závitů nedostával prach a nečistoty. Tyto by mohly závit poškozovat, zvyšovat tření v závitech a tím pádem zvyšovat energetickou náročnost na pohyb. Jako optimální řešení byl zvolen spirálový kryt pro krytí spodní pozice šroubu mezi nosnými deskami a pevný kryt pro horní pozici.

5.9.1. Návrh spodního krytu pohybového šroubu

S ohledem na závislé rozměry byl zvolen pro spodní kryt z katalogu firmy HIWIN⁵⁷ spirálový kryt 40-2000-120.



Typ	SD	ID	AD	Lh	Lv	BB
40-2000-120	36	40	86	1760	2000	120

Obr. 41 - Schéma spirálového krytu s rozměry v mm z katalogu firmy HIWIN⁵⁸

Údržba spirálového krytu

Spirálové krycí pružiny je nutné periodicky čistit od hrubého znečištění a mazat, pokud možno olejovým sprejem W44T Turbo spray. Nevhodné jsou husté, pryskyřičné oleje. Jejich použití může vést k zablokování závitů a ke zlomení pružiny.⁵⁹

Návrh přírub spirálového krytu

Spirálový kryt se nedodává s fixačními přírubami. Tyto je třeba vhodně navrhnout podle daného konstrukčního řešení. Fixační příruby byly navrženy s ohledem na závislé rozměry a jsou součástí výkresové dokumentace.

5.9.2. Návrh horního krytu pohybového šroubu

Pro horní kryt bylo zvoleno z důvodu ceny, nízké hmotnosti a jednoduchosti výroby pevné krytí vyrobeno z plastu. Bude mít čtvercový půdorys pro jeho vyšší tuhost. Výrobní výkres je součástí výkresové dokumentace.

5.10. Antikorozní nátěr, kotvení konstrukce a vedení kabeláže

5.10.1. Návrh nátěru konstrukce

Celou konstrukci bude třeba natřít ochranným antikorozním nátěrem.

Byl zvolen z katalogu firmy KMB barvy⁶⁰ antikorozní nátěr Soldecol PUR HG.

Vlastnosti

- Vysoká mechanická a chemická odolnost
- Dlouhodobá povětrnostní stálost
- Rychlé zasychání
- Odolává teplotám do 120 °C
- Ředidlo U 6002
- Vydatnost: 11 m² z 1 litru barvy v jedné vrstvě (50 μm DFT, beze ztrát)
- Doba zasychání: 10 - 12 hod. (max. 15 hodin) při 23 °C a 60% relativní vlhkosti vzduchu⁶¹

5.10.2. Kotvení konstrukce

Z důvodu jednoduchosti aplikace a vysoké pevnosti bylo zvoleno kotvení konstrukce do betonového podkladu pomocí chemické kotvy a kotevních šroubů.

Byla zvolena z katalogu firmy Fisher Chemická kotva FIS VL 410 C⁶² v kombinaci s kotevními šrouby FIS A M16 x 300 gvz pevnost 8.8⁶³.



Obr. 42 - Kotevní šroub FIS A⁶⁴

Tab. 10 - Parametry pro zatížení kombinace chemické kotvy FIS VL 410 C a kotevního šroubu FIS A M16 v betonu⁶⁵

Typ					Tažený beton				Tlačený beton			
	Min. účinná kotevní hloubka	Max. účinná kotevní hloubka	Min. tloušťka kotevního podkladu	Max. utahovací moment	Garantovaná tahová zatížení	Garantovaná smyková zatížení	Min. osová vzdálenost	Min. vzdálenost k okraji	Garantovaná tahová zatížení	Garantovaná smyková zatížení	Min. osová vzdálenost	Min. vzdálenost k okraji
	$h_{ef,min}$ [mm]	$h_{ef,max}$ [mm]	h_{min} [mm]	$T_{inst,max}$ [Nm]	$N_{perm}^{3)}$ [kN]	$V_{perm}^{3)}$ [kN]	$s_{min}^{2)}$ [mm]	$c_{min}^{2)}$ [mm]	$N_{perm}^{3)}$ [kN]	$V_{perm}^{3)}$ [kN]	$s_{min}^{2)}$ [mm]	$c_{min}^{2)}$ [mm]
FIS A M16 (8.8)	80		116	60,0	10,0	23,0	65	65	14,9	36,0	65	65
		320	356	60,0	46,0	36,0	65	65	52,2	36,0	65	65

¹⁾ Součinitel bezpečnosti pro pevnost materiálu podle schválení a součinitel bezpečnosti pro zatížení $\gamma_L = 1,4$ jsou započteny. Za jednotlivou se kotva považuje, je-li osová vzdálenost $s \geq 3 \times h_{ef}$ a vzdálenost k okraji $c \geq 1,5 \times h_{ef}$.

²⁾ Minimální přípustné osové vzdálenosti, resp. vzdálenosti k okraji při současném snížení únosnosti.
³⁾ Při kombinaci zatížení tahem, smykem a ohybem, stejně jako při snížení osových či okrajových vzdáleností (ve skupině kotev) je nutné nahlédnout do schválení.

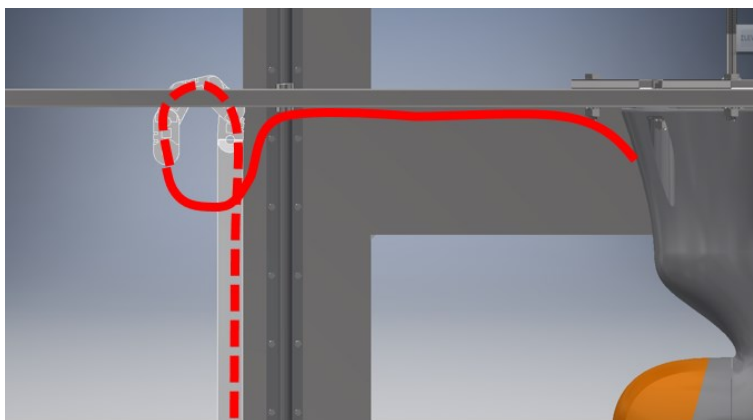
⁴⁾ Garantovaná zatížení je možné s třídou betonu zvyšovat až do C50/60.

⁵⁾ Uvedené hodnoty zatížení platí při teplotě kotevního podkladu do +50 °C (resp. 80 °C krátkodobě). Otvor pro kotvu je vyvrtán příklepovým vrtáním a nejlepším vyčištěním vyvrtaného otvoru podle postupu ve Schválení. Kotvu lze osadit do suchého i mokrého betonu.

Průměr díry do betonového podkladu je uveden $d_0 = 18 \text{ mm}$.⁶⁶

5.10.3. Vedení kabeláže

Kabeláž k motoru a čidlům pozic bude vedena po jedné ze stojen a není nutno hledat speciální řešení, jelikož může být napevno. Vedení kabeláže pro pohybové části konstrukce je nutno umístit tak, aby nedocházelo k jejímu poškozování během pohybu součástí. Kabeláž k robotu bude na nosné desce, která je pohyblivá a mohlo by docházet k jejímu poškození během pohybu. Z toho důvodu bylo zvoleno umístění kabeláže do energořetězu.



pozn.: 3D modely energetických řetězů dostupné na <https://www.igus-cad.com/>

Obr. 43 - Vizualizace vedení kabeláže z robotu do energořetězu v horní pozici

Byl zvolen z katalogu firmy IGUS⁶⁷ řetěz 1.733m 1500.050.035.0.



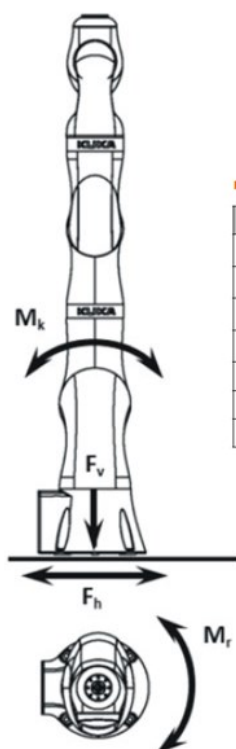
Obr. 44 - Energořetěz série 1500 firmy IGUS⁶⁸

5.11. Pevnostní kontrola pomocí MKP

Navržené řešení je vhodné zkontrolovat metodou konečných prvků – MKP, z důvodu složitosti celé konstrukce, různých vrubů a dynamických zatěžujících vlivů, které nelze dost dobře a jednoduše postihnout ve výpočtech.

5.11.1. Definování zatížení

Definované podmínky zatížení jsou uvedeny v instalačním manuálu firmy KUKA⁶⁹



■ LBR iiwa 14 R820

Type of load	Force/torque/mass
F_v = vertical force	$F_{vmax} = 541.2 \text{ N}$
F_h = horizontal force	$F_{hmax} = 228.4 \text{ N}$
M_k = tilting moment	$M_{kmax} = 281.6 \text{ Nm}$
M_r = torque	$M_{rmax} = 172.6 \text{ Nm}$
Total mass for foundation load	45 kg
Robot	approx. 29.5 kg
Supplementary load	none

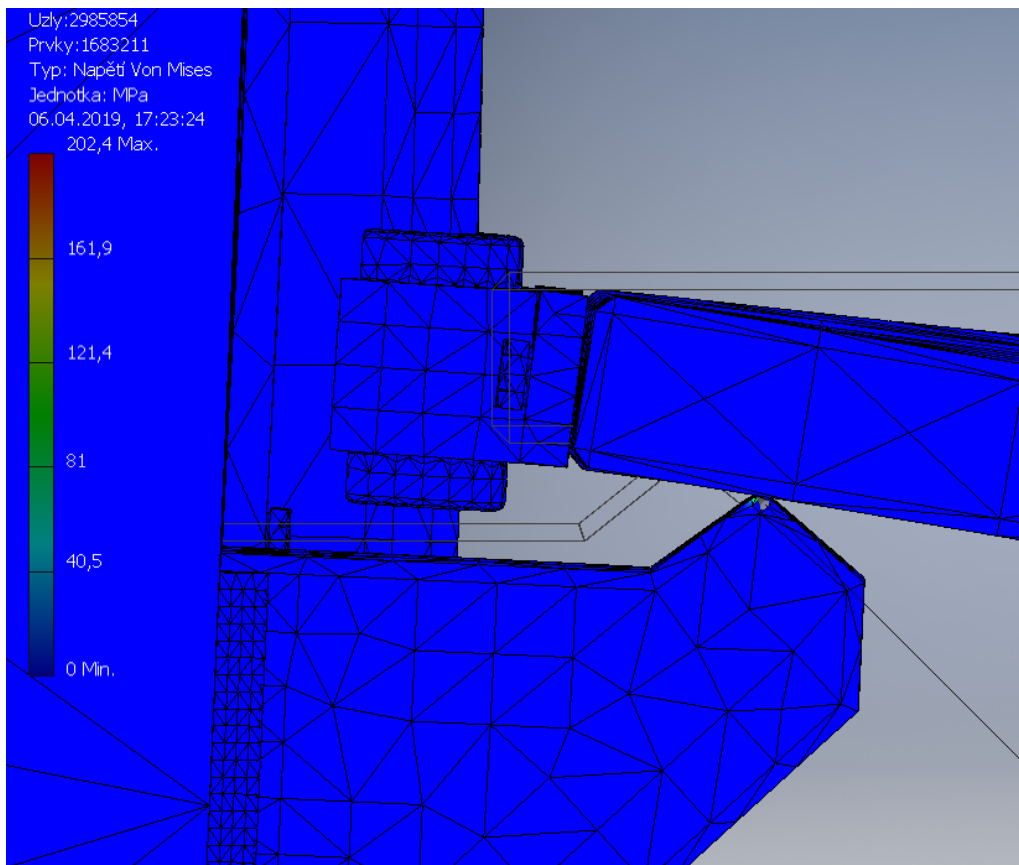
Obr. 45 - Schéma a hodnoty maximálního dynamického zatížení⁷⁰

5.11.2. Výpočet kritického místa

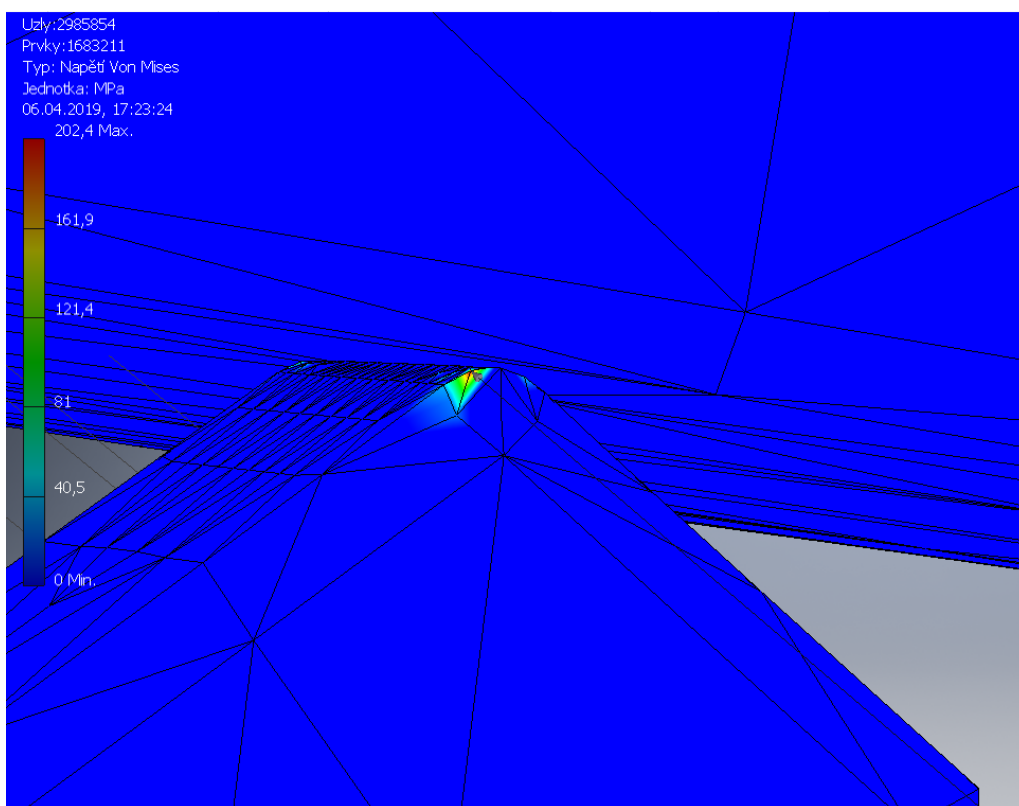
Pomocí kontroly MKP v programu Inventor bylo zjištěno kritické místo s největším napětím na jedné z konzol. Toto napětí vyšlo 202,4 MPa, jak je znázorněno na Obr. 46, 47 a 48. Tato metoda ovšem nosnou desku značně prohne a z toho důvodu vznikne na konzole kritické místo s bodovým (kruhovým) stykem namísto styku čárového (plošného). Z tohoto důvodu je zjištěné napětí daleko vyšší než bude ve skutečnosti. V tomto případě by šlo o namáhání na otláčení, kde daný materiál konzoly má mez kluzu $R_e = 235$ MPa, což je vyšší než zjištěné napětí a v tomto případě, kdy je třeba počítat se značným zkreslením metody MKP, lze říci, že návrh vyhovuje.



Obr. 46 - Analýza konstrukce pomocí MKP s označeným místem nejvyššího napětí



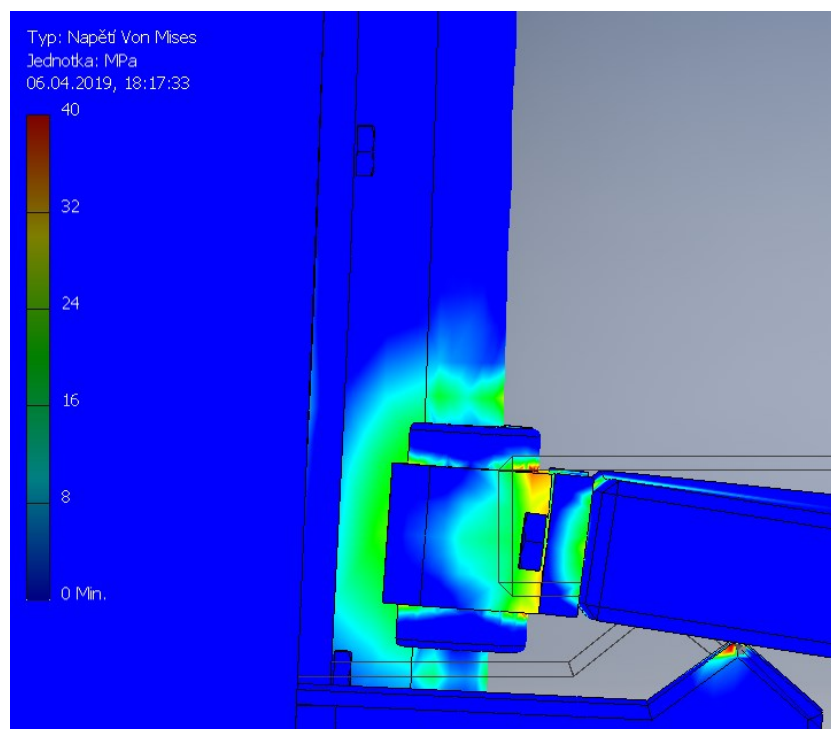
Obr. 47 - Analýza konstrukce pomocí MKP s místem nejvyššího napětí



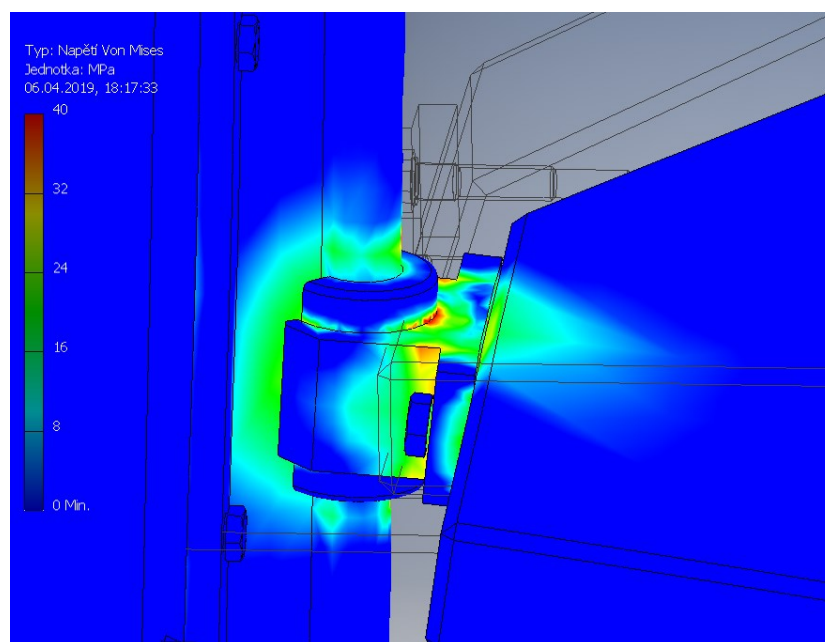
Obr. 48 - Detail kritického místa vypočteného pomocí MKP

5.11.3. Výpočet dalších namáhaných uzlů

Dále byla snížena horní hranice barevné škály, která zobrazuje rozsah napětí od nejmenšího po největší, pro zjištění dalších možných kritických míst na modelu. Tato hranice byla nastavena na 40 MPa. Na základě tohoto zobrazení jsou identifikovány další namáhané uzly, které se nacházejí na součástech lineárního vedení, které jsou navrženy v kapitole 5.6.



Obr. 49 - Zobrazení namáhání členů lineárního vedení



Obr. 50 - Zobrazení namáhání členů lineárního vedení z jiného úhlu pohledu

Kontrola zatížení členů lineárního vedení

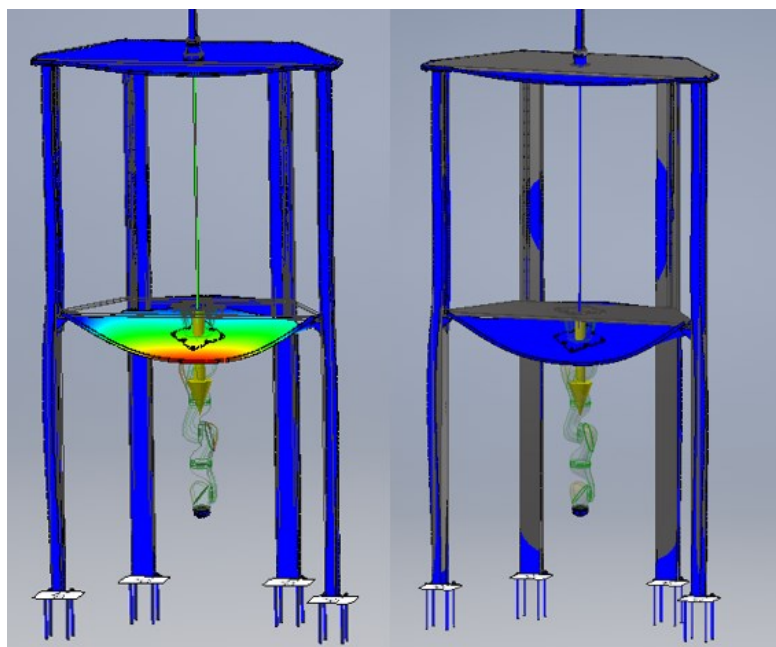
Z důvodu bezpečnosti byl další postup zaměřen na nejslabší část sestavy ložiskového domku, kluznou vložku, i když analýza ukázala největší zatížení mezi kluzným pouzdrem a domkem. Ložiskový domek OGAS-01-12 z kapitoly 5.6. obsahuje kluznou vložku OJUM-03-12 z katalogu firmy IGUS.⁷¹

Tab. 11 - Pevnostní parametry vložky OJUM firmy IGUS⁷²

Díl č.	Hřídel Ø [mm]	Otvor uložení Ø H7 [mm]	Tolerance* Vnitřní průměr pouzdra [mm]	pmax. [N] Dynamické zatížení			pmax. [N] Statické zatížení			Hmotnost [g]
				0°	90°	180°	0°	90°	180°	
OJUM-03-12	12	22	0,030 - 0,088	960	635	240	6720	4445	1680	13

Maximální dynamická síla, kterou budou tyto součásti namáhány je 228,4 N dle údajů KUKA na Obr. 45. Maximální dynamická únosnost těchto dílů je v nejhorším případě 240 N z Tab. 11. Tato síla je definována ve směru od lineárního vedení (tahové napětí). Tyto díly lineárního vedení jsou použity celkem čtyři na celé konstrukci a zatěžující síla se bude mezi ně určitým způsobem rozkládat. Tudíž lze říci, že kontrola vyhovuje.

5.11.4. Maximální průhyb



pozn.: ve vizualizaci jsou prohnutá místa zobrazena daleko výrazněji, jelikož ve skutečném měřítku by průhyb nebyl tolik viditelný

Obr. 51 - Vizualizace průhybu nosné konstrukce

6. Závěr

Cílem práce bylo modifikovat pracoviště pro automatizovanou montáž. Bylo nutno zvolit nejvhodnější koncept řešení dle zadaných specifikací. Byl vybrán model kooperativního robotu IIWA od firmy KUKA pro vykonávání manipulativní a montážní činnosti jako možná náhrada operátora/lidské síly. K tomu byla navržena nosná konstrukce, která bude plnit funkci hlavního nosiče robotu a bude možno v rámci této konstrukce s robotem manipulovat do dvou poloh, horní a spodní. Horní pozice bude sloužit jako odkládací pozice pro robot, kdy nebude potřeba jeho činnosti a spodní pozice bude sloužit pro pracovní pozici robotu. Pro ideální řešení bylo nutno navrhnout pohybový mechanismus, který byl nakonec realizován pomocí závitové tyče se samosvorným lichoběžníkovým závitem. Dále bylo nutno vyhledat řadu dílčích komponent od různých výrobců jako například motor, řemen, ložiska, lineární vedení, kotvení konstrukce a navrhnout a výpočtem zkontrolovat množství dalších součástí, například nosné patky, dosedací konzoly, pohybovou matici a svarové spoje.

Bylo zvažováno a počítáno vícero možných částečných řešení, hlavně v oblasti pohybového ústrojí a dosedacích prvků pro nosnou desku. Nakonec bylo navrženo řešení pohybu pomocí závitové tyče v kombinaci s elektromotorem a řemenovým převodem a v oblasti dosedacích prvků bylo zvoleno řešení třemi konzolami s dosedací hranou.

Z ekonomického hlediska je nahrazení operátora automatizovaným procesem velmi výhodné. Nejvýhodnější je varianta nahrazení operátora nastálo ve všech směnách provozu, kdy vyšla návratnost investice 1,27 roku.

7. Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce, panu Ing. Zdeňku Nogovi, Csc. za odborné vedení, doporučující cenné rady a poznatky při konzultacích ohledně mé práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Viktoru Uhlářovi, Ph.D. ze společnosti Brembo Czech, s.r.o. za ochotu poskytnout mi téma a zadání práce.

8. Citace

1. FANUC CZECH S.R.O. CR-35iA. *FANUC: Firma pro automatizace v průmyslu* [online]. Praha: FANUC, ©2015 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/stránka-filtru-robotů/spolupracující-roboty/collaborative-cr35ia>
2. FANUC CZECH S.R.O., ref. 1
3. ABB ASEA BROWN BOVERI LTD. O YuMi®: Spolupráce člověka a robota. *ABB* [online]. Zurich: ABB, ©2015 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/yumi>
4. ABB ASEA BROWN BOVERI LTD, ref. 3
5. ALUMOTION SRL. Universal robots. *Alumotion* [online]. Milano: Alumotion srl, ©2013 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <http://www.alumotion.eu/marchi/universal-robots/>
6. ALUMOTION SRL, ref. 5
7. KUKA AKTIENGESELLSCHAFT. LBR iiwa. *KUKA: Síla automatizace* [online]. Augsburg: KUKA Aktiengesellschaft, ©2018 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-služby/robotické-systémy/průmyslové-roboty/lbr-iiwa>
8. KUKA AKTIENGESELLSCHAFT, ref. 7
9. KUKA LABORATORIES GMBH. LBR iiwa: Specification [pdf]. Augsburg: KUKA Laboratories, ©2013 [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: na vyžádání u dodavatele
10. ČESKO, Nařízení vlády ze dne 20. prosince 2012, kterým se mění nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, ve znění pozdějších předpisů. In: Sbirka zákonů České republiky. 2013.
11. TILHON, Jiří. Šíře uliček a komunikací na pracovišti. *BOZPinfo.cz: Oborový portál pro BOZP* [online]. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2016 [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/sire-ulicek-komunikaci-na-pracovisti>
12. ČESKÁ NÁRODNÍ BANKA. Kurzy devizového trhu. ČNB Česká národní banka [online]. Praha: Česká národní banka, ©2003-2018 [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: https://www.cnb.cz/cs/financi_trhy/devizovy_trh/kurzy_devizoveho_trhu/denni_kurz.jsp
13. KUKA AKTIENGESELLSCHAFT, ref. 7
14. KUKA LABORATORIES GMBH, ref 9
15. ČEZ A. S. Ceník: Regulované platby za dopravu elektřiny. Skupina ČEZ [online]. Praha: ČEZ, ©2018 [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/elektrina/elektrina-na-neurcito/cenik.html>
16. FERONA A.S. Feron online. Feron online [online]. Praha: FERONA, ©2017 [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/>
17. FERONA A.S., ref. 16
18. FERONA A.S., ref. 16
19. FERONA A.S., ref. 16
20. KUKA LABORATORIES GMBH, ref 9
21. FERONA A.S., ref. 16

22. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. Úvaly: Albra, 2003. ISBN 80-86490,74-2.
23. KALÁB, Květoslav. ČÁSTI A MECHANISMY STROJŮ: pro 2. a 3. ročník bakalářského studia [pdf]. Ostrava, ©2016 [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: Na vyžádání na katedře Částí a mechanismů strojů na VŠB-TU Ostrava
24. KALÁB, Květoslav, ref. 23
25. FERONA A.S., ref. 16
26. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA, ref. 22
27. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA, ref. 22
28. KALÁB, Květoslav, ref. 23
29. FERONA A.S., ref. 16
30. KALÁB, Květoslav, ref. 23
31. KALÁB, Květoslav, ref. 23
32. KALÁB, Květoslav, ref. 23
33. KALÁB, Květoslav, ref. 23
34. FERONA A.S., ref. 16
35. IGUS®. Drylin® R shaft guides. Igus®: plastics for long life® [online]. Kolín: igus®, ©2018 [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <https://www.igus.cz/drylin/round-shaft-guide>
36. IGUS®, ref. 35
37. IGUS®, ref. 35
38. IGUS®, ref. 35
39. IGUS®, ref. 35
40. FERONA A.S., ref. 16
41. KALÁB, Květoslav, ref. 23
42. KALÁB, Květoslav, ref. 23
43. RAVEO S.R.O. DC MOTORY SE ŠNEKOVÝMI PŘEVODOVKAMI. *RAVEO: world of motion* [online]. Otrokovice: RAVEO, 2016 [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/kartacove-dc-motory-se-snekovou-prevodovkou>
44. RAVEO S.R.O., ref. 43
45. RAVEO S.R.O., ref. 43
46. RAVEO S.R.O., ref. 43
47. TYMA CZ S.R.O. Řemenice a upínací pouzdra. *TYMA®: řemeny, převody a dopravní pásy* [online]. Trmice: TYMA CZ, 2014 [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/ke-stazeni/>
48. TYMA CZ S.R.O., ref. 47
49. TYMA CZ S.R.O., ref. 47
50. DRASTÍK, František. *Strojnické tabulky pro konstrukci i dílnu*. 2. dopl. vyd. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-85780-95-X
51. DRASTÍK, František, ref. 50
52. DRASTÍK, František, ref. 50
53. TYMA CZ S.R.O. Max. obvodové rychlosti řemenů. *TYMA®* [online]. Trmice: TYMA CZ, ©2004-2018 [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/caste-dotazy/obvodova-rychlost/>

54. TYMA CZ S.R.O. Klínové, ozubené a ploché hnací řemeny. *TYMA®: řemeny, převody a dopravní pásy* [online]. Trmice: TYMA CZ, 2012 [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/ke-stazeni/>
55. ZKL A.S. Jednořadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem. *ZKL GROUP* [online]. ZKL, ©2012 [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/cat/2013/sracbb>
56. ZKL A.S., ref. 55
57. HIWIN S.R.O. Spirálové kryty. *HIWIN®* [online]. Brno: HIWIN, ©2018 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby/ostatni-prislusenstvi/179_spiralove-kryty
58. HIWIN S.R.O., ref. 57
59. HIWIN S.R.O., ref. 57
60. KMB BARVY. Soldecol PUR HG. *KMB barvy* [online]. Ostrava: KMB barvy, ©2019 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.kmb-barvy.cz/emaily-na-kov/soldecol-pur-hg/>
61. KMB BARVY, ref. 60
62. FISHER. FIS VL 410 C: Chemická injektážní malta pro běžné aplikace. *Fisher* [online]. Czech Republic: fisher, ©2019 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.fischer-cz.cz/cs-cz/vyrobky/chemicke-kotvy/chemicka-malta/chemicka-malta-fis-vl-fis-vl-high-speed/538584-fis-vl-410-c#>
63. FISHER. Fischer kotevní šroub FIS A M 16 x 300 gvz pevnost ocele 8.8: Všestanný kotevní šroub FIS A. *Fisher* [online]. Czech Republic: fisher, ©2019 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.fischer-cz.cz/cs-cz/vyrobky/chemicke-kotvy/kotevni-svornik-kotva-s-vnitrim-zavitem/kotevni-sroub-fis-a/519402-fis-a-m-16-x-300-8-8>
64. FISHER, ref. 63
65. FISHER, ref. 62
66. FISHER, ref. 63
67. IGUS®. Série 1500 - Řetěz, otvíratelná podél vnějšího poloměru. *Igus®: plastics for long life®* [online]. Kolín: igus®, ©2019 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: https://www.igus.cz/iPro/iPro_01_0025_0009_CZcs.htm?c=CZ&l=cs
68. IGUS®, ref. 68
69. KUKA LABORATORIES GMBH, ref. 9
70. KUKA LABORATORIES GMBH, ref. 9
71. IGUS®, ref. 35
72. IGUS®, ref. 35

9. Použitý software

1. AutoCAD LT 2017
2. Autodesk Inventor Professional 2017
3. Microsoft Excel 2016
4. Microsoft Word 2016

10. Seznam výkresové dokumentace

1. Výkres BED173-2019-BP-01S – Nosná konstrukce – sestava
2. Výkres BED173-2019-BP-02 – Pohybová matice
3. Výkres BED173-2019-BP-03 – Nosná patka
4. Výkres BED173-2019-BP-04 – Pohybový šroub
5. Výkres BED173-2019-BP-05 – Nosná deska horní
6. Výkres BED173-2019-BP-06 – Nosná deska spodní
7. Výkres BED173-2019-BP-07 – Spodní patka stojny
8. Výkres BED173-2019-BP-08 – Horní patka stojny
9. Výkres BED173-2019-BP-09 – Stojna 1
10. Výkres BED173-2019-BP-10 – Stojna 2
11. Výkres BED173-2019-BP-11 – Domek
12. Výkres BED173-2019-BP-12 – Fixační příruba malá
13. Výkres BED173-2019-BP-13 – Fixační příruba velká
14. Výkres BED173-2019-BP-14 – Konzola
15. Výkres BED173-2019-BP-15 – Kryt šroubu