



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**KONSTRUKCE ODLEHČENÉHO
MANIPULÁTORU PRO ROBOTICKÉ RAMENO**

DESIGN OF A LIGHTWEIGHT MANIPULATOR FOR A ROBOTIC ARM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Eim

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Vaverka

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Jakub Eim
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Ondřej Vaverka
Akademický rok:	2021/22

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

Konstrukce odlehčeného manipulátoru pro robotické rameno

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při návrhu robotického pracoviště se může stát, že robotická ramena sice přenášejí lehký materiál ale samotný manipulátor je tak těžký, že je potřeba robota výrazněji dimenzovat. Návrh manipulátoru, který bude lehký, rychle sestavitelný a umožní úpravu na konkrétní rozměry by byl hlavně z ekonomického hlediska velice výhodný.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je návrh a výroba modulárního a odlehčeného manipulátoru pro robotická ramena.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše současného stavu,
- koncepční varianty řešení,
- výroba a otestování prototypu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, Ch.R., BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. Překlad 7. vydání, VUTIUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN 978-80-214-2629-0.

MEDELLIN-CASTILLO, H. I., ZARAGOZA-SIQUEIROS, J. Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, vol. 32, iss. 1, s. 1-16. DOI: 10.1186/s10033-019-0368-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem a výrobou modulárního a odlehčeného manipulátoru pro robotická ramena Scara od firmy Epson. Rešerše je věnovaná nyní používaným konstrukcím těžkých manipulátorů a současným možnostem spojování karbonových profilů. Praktická část je zaměřena na vývoj konstrukce pomocí MKP (Metoda konečných prvků) a stavbu manipulátoru. Práce je zakončena váhovým srovnáním nově zkonstruovaného manipulátoru se starým, těžkým manipulátorem, u kterého bylo dosaženo zredukování váhy o 56 % při zachování dostatečné pevnosti konstrukce. V příloze jsou připojené CAD (Computer-aided design) soubory, výkresová dokumentace jednotlivých prvků a fotodokumentace celého procesu.

Abstract

The bachelor's thesis describes the design and manufacturing process of a lightweight and modular manipulator for Scara robotic arms made by Epson. The review part is focused on currently used heavy manipulators and contemporary possibilities of connecting carbon fibre profiles. The practical part of the thesis aims on deliberation about geometry of the manipulator assembly using FEM (Finite element method) and the manufacturing of the assembly. The thesis concludes with a comparison between the currently used heavyweight and the new manipulator assembly. The weight of the assembly has been reduced by 56 % while maintaining sufficient firmness. In the appendix are included CAD (Computer-aided design) files, technical drawings of individual parts and photodocumentaries of the whole process.

Klíčová slova

Manipulátor robotického ramene, karbonové profily, MKP, odlehčení

Keywords

Robotic arm manipulator, carbon fibre profiles, FEM, weight reduction

Bibliografická citace

EIM, Jakub. Konstrukce odlehčeného manipulátoru pro robotické rameno. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140209>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ondřej Vaverka.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Konstrukce odlehčeného manipulátoru pro robotické rameno* vytvořil samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Vaverky, s použitím odborné literatury a materiálů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne

.....
Jakub Eim

Poděkování

Moje poděkování patří především vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Ondřeji Vavrkovi a firmě Opticontrol s.r.o. za ochotu a pomoc při vypracování této práce. Rád bych také poděkoval své rodině za podporu při studiu.

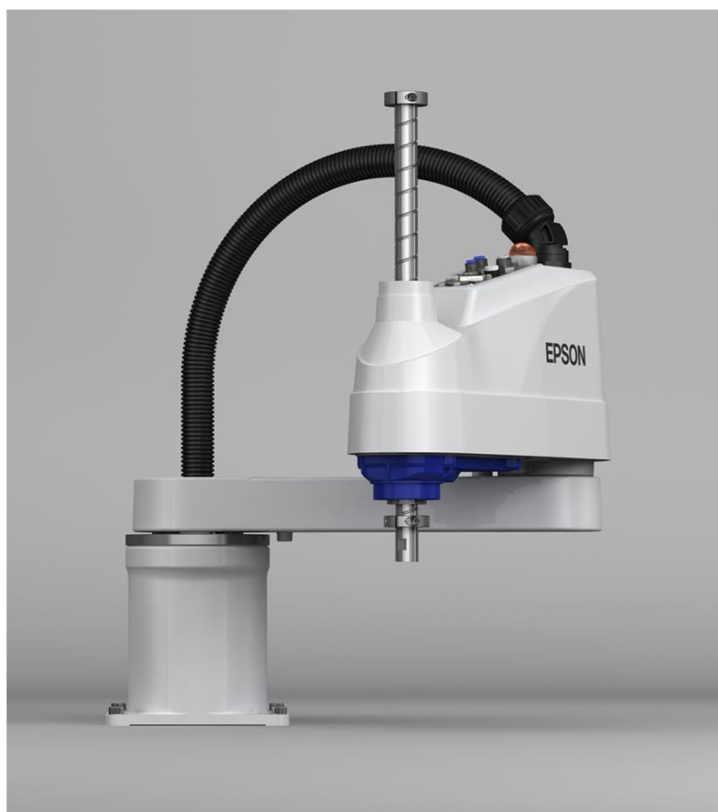
Obsah

1	Úvod	8
2	Cíle práce	9
2.1	Navrhovaný způsob řešení	9
3	Rešerše současného stavu	10
3.1	Konstrukce užívané firmou Opticontrol.....	10
3.2	Konstrukční řešení Tetrafix.....	11
3.3	Možnosti spojování karbonových profilů	12
4	Provozní zatížení robota.....	13
5	Návrh konstrukce	15
5.1	Geometrie rámu konstrukce	15
5.2	Funkční zkouška svěrného spoje.....	20
5.3	Spojovací prvky	23
5.3.1	Obvodový spoj	23
5.3.2	Středový unašeč s úchytem na robota.....	24
5.3.3	Kolíky	25
5.4	Sestava.....	26
5.5	Výpočty v MKP	27
5.6	Utahovací moment šroubových spojů.....	30
6	Stavba a testování konstrukce	31
7	Srovnání.....	32
8	Další vývoj	33
9	Závěr	34
	Použité informační zdroje	35
	Seznam symbolů.....	37
	Seznam zkratk	38
	Seznam obrázků.....	39
	Seznam tabulek	40
	Seznam příloh.....	41
	Elektronické přílohy	41
	Fotodokumentace.....	42

1 Úvod

Robotická ramena typu Scara představil Epson v roce 1983 v lince na výrobu hodinek Seiko. Scara se vyznačuje vysokou přesností i rychlostí a kompaktními rozměry, ale i nízkou nosností. Jedna z nynějších aplikací robotů Scara (obrázek 1:1) je například překládání lehkých věcí ve výrobní lince. Může se jednat o odebrání vícero malých plastových výlisků, překládání větších kartonů, nebo manipulaci s rozměrnějším plastovým výrobkem. Všechny tyto aplikace se vyznačují potřebou několika koncových efektorů, které je nutné rozmístit v prostoru. Dnes se k rozmístění koncových efektorů používají konstrukce složené z normalizovaných hliníkových profilů, které jsou sice pevné a univerzální, ale také rozměrné a těžké. Zejména váha samotné konstrukce často vede k nutnosti použití Scary s násobně vyšší nosností, než je hmotnost manipulovaného výrobku.

S rostoucím tlakem na optimalizaci výroby je potřeba snižovat hmotnost konstrukcí a zvyšovat jejich univerzálnost. Řešením by mohlo být použití aditivně vyráběných plastových částí a karbonových profilů. Redukcí váhy by se mohly použít Scary s nižší nosností a tím pádem zlevnit celé výrobní linky. Lehčí konstrukce by i zrychlila pohyb robota a méně namáhala jeho mechanické součásti, čímž by se zefektivnil provoz výrobní linky.



Obrázek 1:1 Robot Epson Scara LS6-B

2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je návrh a realizace odlehčené konstrukce pro roboty Scara. Tento proces je rozdělen na několik dílčích cílů, které je potřeba postupně splnit:

- Rešerše současného stavu
- Koncepční varianty řešení
- Výroba a otestování prototypu

2.1 Navrhovaný způsob řešení

- 1) Vypracovat rešerši na téma spojování karbonových profilů a současných způsobů tvorby konstrukcí pro koncové efekty robotického ramene.
- 2) Na základě poznatků z rešerše provést geometrický návrh několika typů konstrukce, poté srovnat jejich pevnost, hmotnost a univerzálnost. Po výběru prostorového rozložení namodelovat jednotlivé díly konstrukce a vytvořit koncepční řešení. Pevnost a váhu konstrukce nejdříve ověřit pomocí SW (software).
- 3) Průběžně provádět mechanické zkoušky na vytvořených prototypech a vyhodnocovat zkušební data. Podle výsledků zkoušek a požadavků zadavatele upravovat koncepční řešení.
- 4) Vyrobít a sestavit konstrukci. Porovnat vytvořenou lehkou karbonovou konstrukci s hliníkovou konstrukcí v co nejvíce ohledech. Otestovat pevnost konstrukce při vypočítaném maximálním zatížení.

3 Rešerše současného stavu

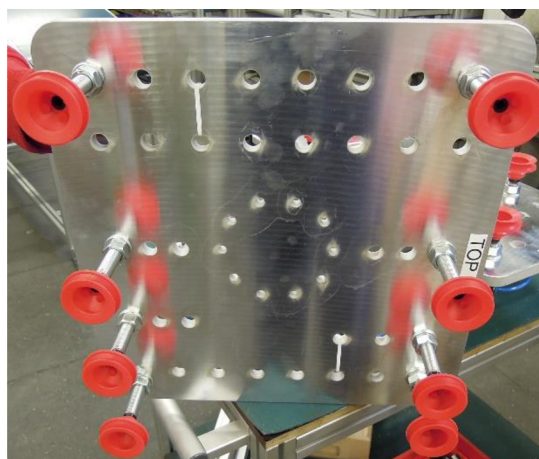
3.1 Konstrukce využívané firmou Opticontrol

Firma Opticontrol dnes k montáži více koncových efektorů na jedno robotické rameno používá především konstrukce z hliníkových profilů (Obrázek 3:1). Tyto profily jsou dobře dostupné a levné. Spojovací prvky profilů umožňují postavit naprosto univerzální konstrukci. Konstrukce z těchto profilů se vyznačují vysokou pevností a díky šroubovým spojům profilů se dá snadno provádět servis i úpravy. Podstatnou nevýhodou zejména pro rychlé a precizní roboty Scara je ale váha těchto konstrukcí, jelikož mají malou nosnost. Opticontrol momentálně používá ke stavbě hliníkové profily a prvky značky Minitec.



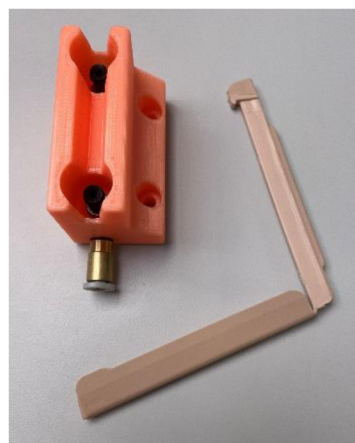
Obrázek 3:1 Konstrukce z hliníkových profilů Minitec

Další variantou je výroba desky CNC (Computer numerical control) obráběním (Obrázek 3:2). Toto řešení je sice velice pevné a jednoduché na montáž, ale také zbytečně těžké a drahé. Je zde spousta nevyužitého materiálu, který s rostoucí vzdáleností od středu desky zatěžuje robota vznikem nežádoucích dynamických sil a momentů při pohybu.



Obrázek 3:2 Nosná deska vakuových efektorů

Ačkoliv ve firmě ještě nebyl použit 3D tisk pro tvorbu nosných konstrukcí, tak je pro stavbu robotických výrobních linek úspěšně využíván už několik let. Vzhledem k tisknutému materiálu (PETG) se ale jedná hlavně o aplikace, kde součást není silově namáhána, jako například odebírání plastových výlisků ze vstřikovacího lisu. Jelikož odebíraná součást má jen několik gramů, dynamické síly zde působící jsou zanedbatelné. Díl na obrázku 3:3 slouží i pro vedení vzduchu. Mezi hlavní výhody 3D tisku patří zejména cena, váha a také fakt, že každá vyrobená robotická linka je odlišná, takže sériová výroba dílů není výhodná.



Obrázek 3:3 Využití 3D tisku

3.2 Konstrukční řešení Tetrafix

Drtivá většina firem na trhu používá pro konstrukce hliníkové profily různých značek. Jsou ale i výjimky, které začínají používat odlehčené konstrukce z karbonových vláken.

Švédská firma Tetrafix [1] vyrábí konstrukce z karbonových profilů (Obrázek 3:4). Několik jejich výrobků je používáno jako držáky vakuových efektorů pro manipulaci s rozměrnějšími díly. Bohužel je staví vždy na zakázku a není o nich mnoho dostupných informací. Z fotek je poznat, že ke spojování používá třecí spoje (objímky), takže nedochází k narušení struktury karbonových vláken vrtáním ani jiným zásahem. Konstrukce od Tetrafixu byly použité pouze na 6osých robotech, kteří jsou obecně mnohem pomalejší než 4osé Scary, takže na konstrukci při pohybu působily menší dynamické síly. Nicméně je tato konstrukce velmi elegantní, lehká a modulární.

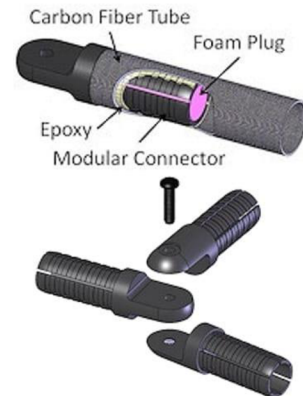


Obrázek 3:4 Konstrukce z karbonových trubek od firmy Tetrafix [1]

3.3 Možnosti spojování karbonových profilů

Dle požadavků zadavatele jsou na konstrukci kladené nároky zejména na jednoduchost spoje a jeho pevnost. [2]

Firma DragonPlate [3] nabízí celou škálu spojovacích prvků, které jsou univerzální a velmi pevné. Spojky (Obrázek 3:5) jsou vyrobené z hliníku, což zajišťuje dostatečnou odolnost. Fungují na principu vlepění dílu do karbonového profilu za použití dvousložkového epoxidového lepidla 3M Scotch-Weld. Před lepením se styčné plochy zdrsní a poté očistí. Po vytvrnutí vzniká extrémně pevný nerozebíratelný spoj. Výhodou této koncepce je, že spojky jsou kompaktní a přenesou velké axiální i momentové síly, nevýhodou časová náročnost a složitost výroby spoje.



Obrázek 3:5 Spojka DragonPlate [3]



Obrázek 3:6 Příklad silového třecího spoje [4]

Další možnost je objímka (obrázek 3:6) [4]. Šroubový spoj v objímce vyvolá při dotažení tření, které pevně spojí karbonovou trubku se spojovacím prvkem. Spoj tak zůstane rozebíratelný. Od spoje je požadováno především zamezení pohybu trubky v axiálním směru. Ačkoliv přenos kroutícího momentu v nosné konstrukci efektorů bude zanedbatelně malý, tak třecí spoj zvládne přenášet i kroutící moment. Mezi klady tohoto spoje patří jednoduchost, rychlá montáž a rozebíratelnost. Je důležité si ale uvědomit problém který by v případě spojování karbonových trubek mohl nastat, a to je praskání či kolaps profilu v důsledku vnějšího tlaku. Tento problém u vlepování konektorů do vnitřního prostoru profilu není. Praskání lze zamezit výrobou vhodného kolíku, který se umístí v místě spoje do karbonového profilu a nedovolí tak jeho zborcení při zatížení vnějším tlakem od silového třecího spoje. Pokud použijeme uložení s přesahem, dojde při montáži kolíku do profilu ke vzniku vnitřního tlaku, který bude působit proti směru tlaku vyvolaného objímkou při svírání. Tyto tlaky se pak následně odečtou, čímž výrazně klesne výsledné silové namáhání samotného profilu.

Firma Enhanced Composites [5] vyrábí spojky (Obrázek 3:7) karbonových profilů pro použití v hobby sektoru, zejména pro stavbu dronů. Tyto konstrukce ale nejsou moc namáhané vzhledem k jejich váze. Ačkoliv jsou spojky pevné, jednoduché i univerzální, tak se do karbonových profilů musí při montáži vrtat, aby se spojky daly zajistit šroubovým spojem. Tímto se výrazně oslabuje jejich pevnost. S ohledem na dynamické zatížení vyvíjené robotem tyto spoje nebude možné použít.



Obrázek 3:7 Hobby spojka [5]

4 Provozní zatížení robota

Aby bylo možné spočítat dynamické zatížení konstrukce, je potřeba vědět, jakého maximálního zrychlení je schopen robot Scara dosáhnout. Pro výpočty bude použit nejdynamičtější případ zrychlení, co může nastat, a to aktivace systému Total-Stop při pohybu nejvyšší rychlostí s napřímeným ramenem, aby byl koncový efektor co nejdál od středu otáčení. Při aktivaci Total-Stopu robot aplikuje největší možnou brzdou sílu, tím pádem vzniká nejvyšší dynamické zatížení.

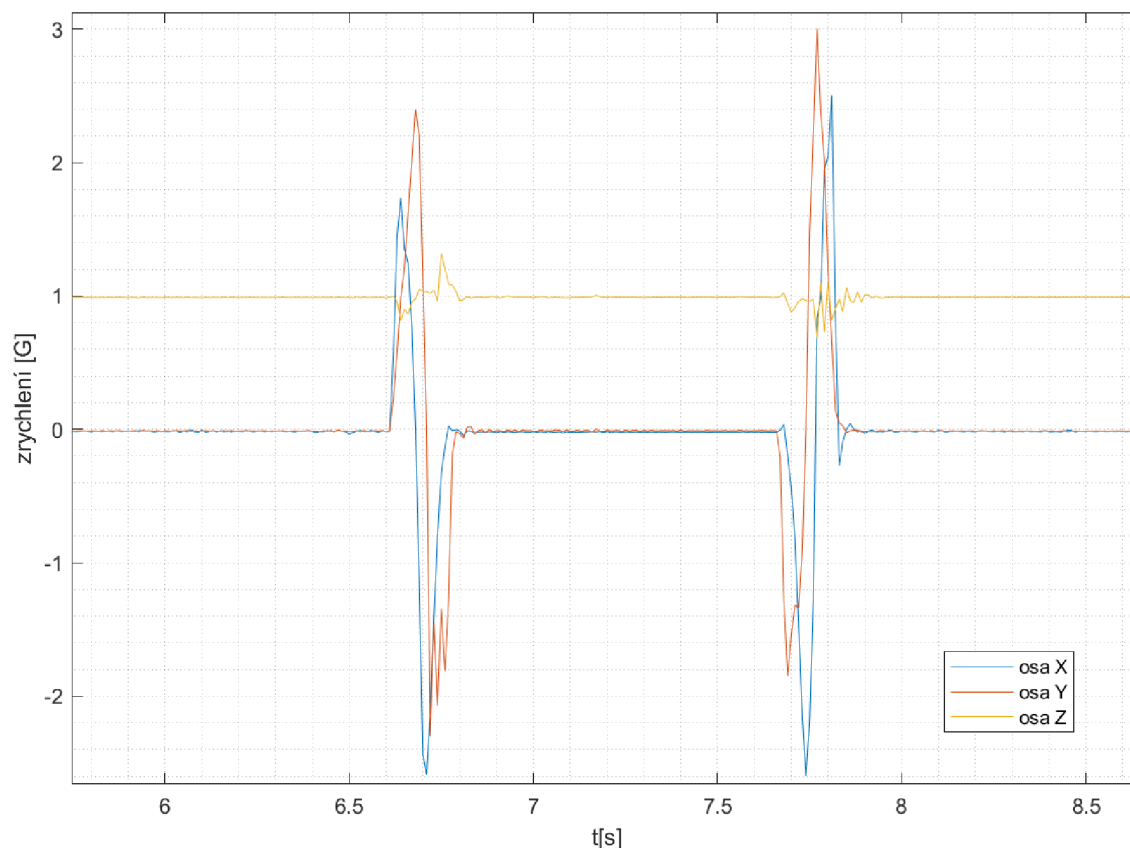
Měření zrychlení proběhlo na robotu Scara LS6-602C pomocí mobilního zařízení iPhone 12 Pro a aplikace Accelerometer. iPhone 12 Pro používá 3osý gyroskop a akcelerometr s obnovovací frekvencí 100 Hz a odchylkou měření 0.011 ms^{-2} [6]. Aplikace Accelerometer zpracovává data ve škále 0 až 10 G. Pro uchycení mobilního telefonu na robota byl v programu Fusion 360 [7] navrhnout a poté pomocí technologie FDM (Fused deposition modeling) vytisknut držák (Obrázek 4:1) s uchycením na hřídel robota.



Obrázek 4:1 Výtisk držáku mobilního telefonu

Robot Scara je ovládaný pomocí softwaru Epson RC+ 7.5.0, kde byl pro měření napsán jednoduchý program, který s nataženým ramenem neustále pohyboval, dokud nebyl manuálně aktivován Total-Stop. Robot byl zatížen pouze tisknutým unašečem a měřícím telefonem. Váha telefonu včetně držáku byla 300 g. SW totiž při větším zatížení automaticky snižuje maximální zrychlení robota, přestože je v programu přikázáno použít 100 % akceleraci, aby nedošlo k poškození harmonických převodovek uvnitř ramene. Proto nízkým zatížením robota bylo dosaženo maximální možné zrychlení.

Bylo provedeno celkem 5 měření. Hodnoty poté byly zpracovány do grafů v programu Matlab [8]. Jak je vidět na obrázku 4:2, zrychlení v ose Z bylo konstantní, a to 1 G od normálního tíhového zrychlení. Pro výpočet maximálního zrychlení bylo potřeba provést vektorový součet akcelerace v ose X a ose Y, jelikož robot nekonal pouze translační pohyb. Postup zpracování je ukázán na měření č.3, kde bylo naměřeno největší zrychlení. Zbylé grafy byly téměř identické, jen s trochu nižšími hodnotami.



Obrázek 4:2 Graf závislosti akcelerace robota na čase

Maximální hodnoty z vektorů akcelerace byly dosazeny do vzorce pro celkové zrychlení

$$a_{max} = \sqrt{a_{x,max}^2 + a_{y,max}^2} = \sqrt{3^2 + 2,5^2} = 3,91 G = 38,31 ms^{-2} \quad (4.1)$$

Stejný postup byl použit pro všechna měření. Průměrné naměřené zrychlení a_{max} vychází z tabulky 4:1

i	$a_{x,max} [ms^{-2}]$	$a_{y,max} [ms^{-2}]$	$a_{max} [ms^{-2}]$
1	16,68	31,98	36,07
2	24,23	26,09	35,61
3	24,53	29,43	38,31
4	24,13	27,66	36,71
5	25,31	18,15	31,14

Tabulka 4:1 Zrychlení robota Scara

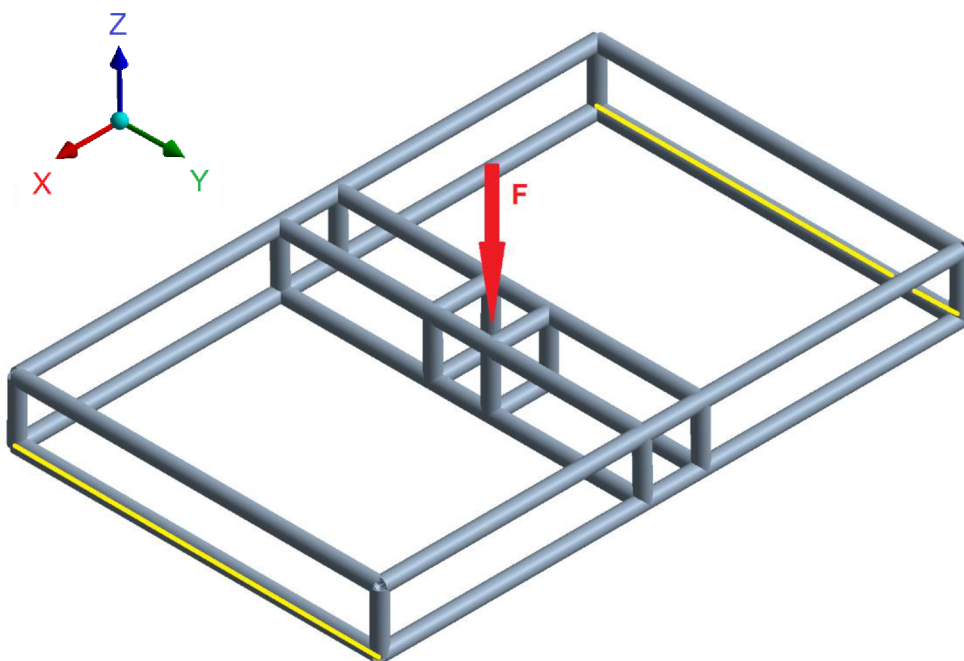
Pro další výpočty konzervativně použijeme největší naměřenou hodnotu zrychlení.

5 Návrh konstrukce

Následující kapitola se bude věnovat návrhu konstrukce a zaměří se na několik konstrukčních uzlů: geometrii rámu konstrukce, typ spojení a tvar středového unašeče a obvodových spojovacích prvků.

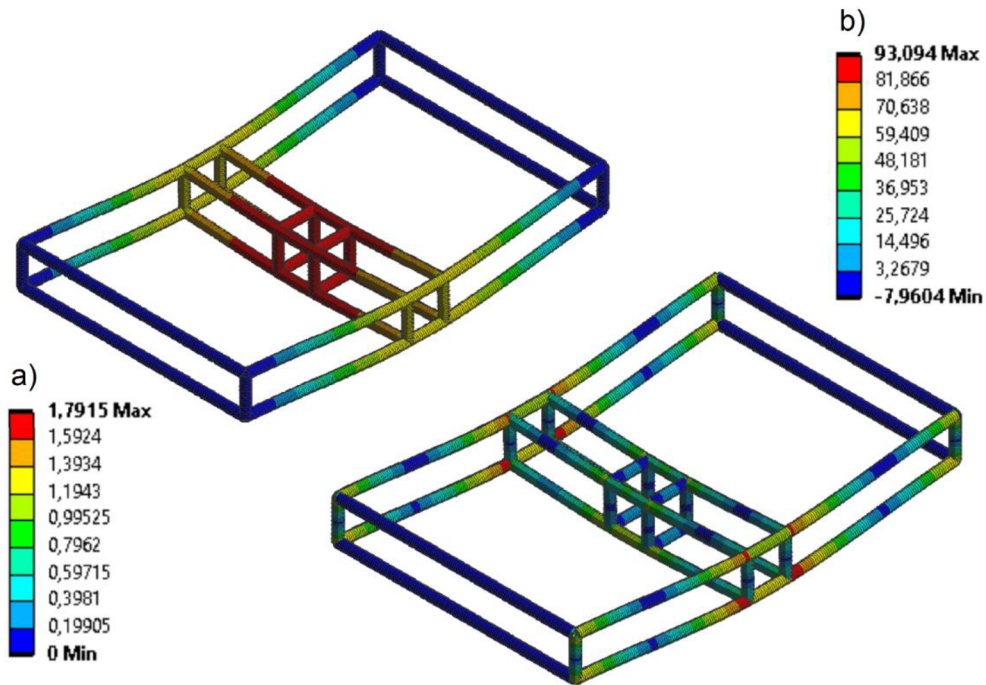
5.1 Geometrie rámu konstrukce

Prostorové rozložení konstrukce je důležité, jelikož svou geometrií udává tvar spojovacích prvků. Tvar konstrukce má také vliv na její pevnost, hmotnost, moment setrvačnosti a modulárnost. Pomocí výpočetní metody MKP bylo v programu Ansys [9] otestováno několik geometrických návrhů, které následně byly porovnány při simulované zkoušce ohybem. Bylo užito prutových prvků typu Beam, u kterých se modeluje jen střednice, ke které se přiřadí průřez profilu a materiál. Velikost prvku pro tvoření sítě je 4 mm. Průřez profilu i materiál byl u všech konstrukcí stejný, a to karbonová trubka o průměru $\varnothing 20$ mm [10] s tloušťkou stěny 1 mm a modulem pružnosti $E = 230$ GPa. Materiálové charakteristiky vychází z technické dokumentace od výrobce profilů. Okrajové podmínky byly následující. Zatěžovací síla F byla zvolena 1000 N a působila vždy uprostřed konstrukce, protože tam dochází ke styku s robotem. Tato síla slouží pouze pro porovnání konstrukcí mezi sebou. Nejdelší rozměr konstrukce má vždy 800 mm, větší rozměry by už zásadně snížily manipulovatelnost Scary. Fixování konstrukce naznačuje žlutá vazba na obrázku 5:1. Srovnáno bude několik modifikací obdélníkové a hexagonální konstrukce.



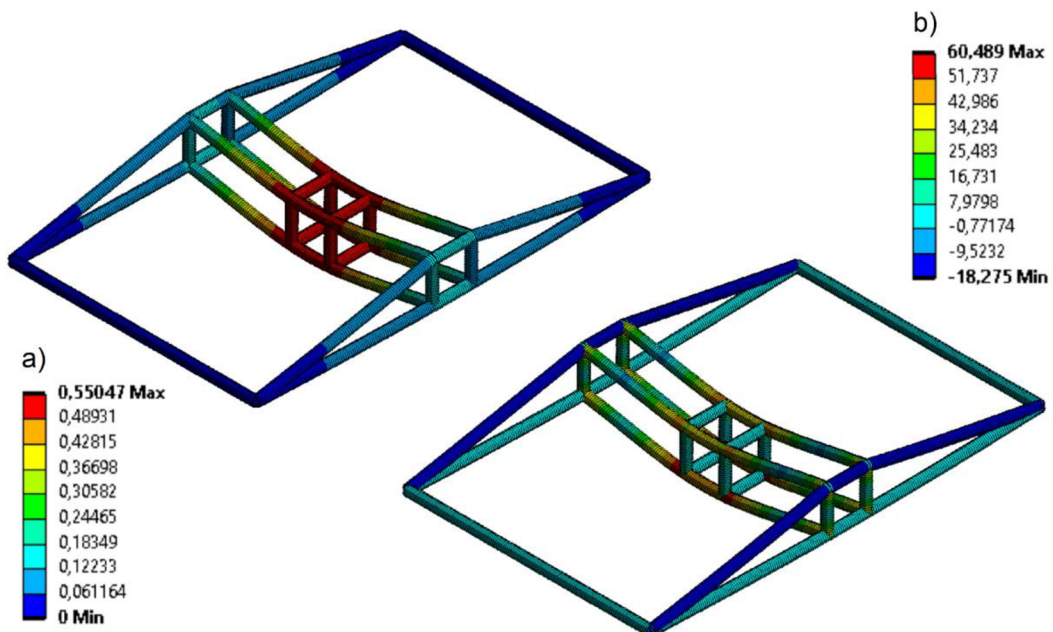
Obrázek 5:1 Okrajové podmínky pro výpočet

Jako první byla simulovaná obdélníková konstrukce. Její velikost závisí pouze na zvolené délce profilů, takže spojovací prvky pro tuto konstrukci jsou modulární a univerzální. Velkou nevýhodou je působení velkých tlakových i tahových sil v konstrukci, jejichž maximum (93 MPa) je navíc mimo střed konstrukce, který je nejpevnějším místem.



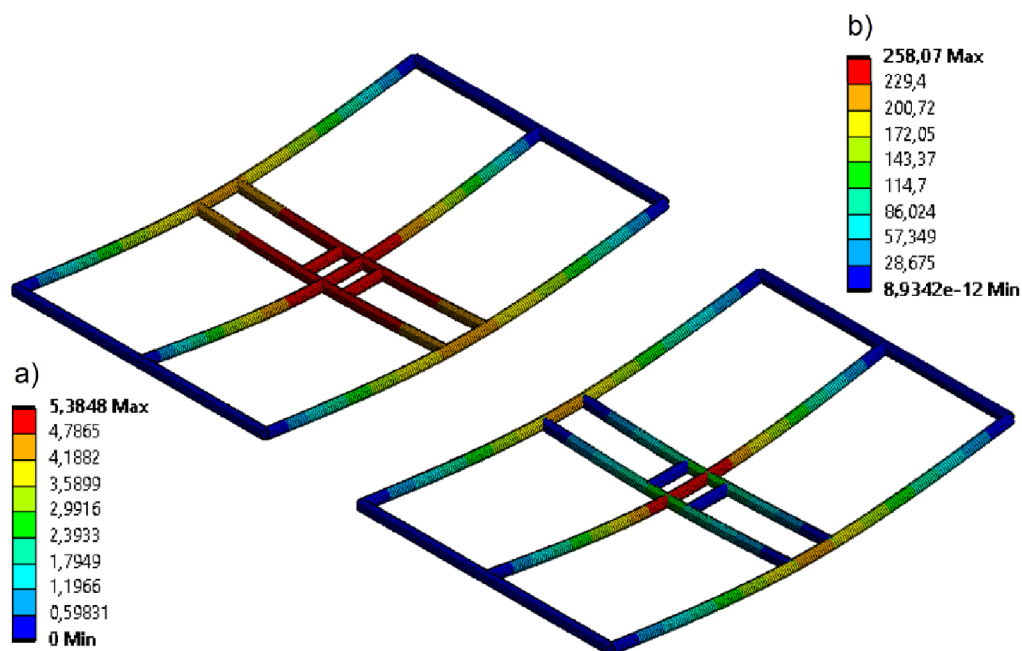
Obrázek 5:2 a) průhyb [mm], b) normálové napětí [MPa] u obdélníkové konstrukce

Pro zvýšení pevnosti konstrukce a snížení normálových sil byla obdélníková konstrukce zavětřovaná. Váha, průhyb i tahové a tlakové síly výrazně poklesly při zachování původních rozměrů. Toto zlepšení je ale vyvážené ztrátou univerzality spojovacích prvků, jelikož pro různé rozměry profilů se mění i úhel zavětřování. Nelze tedy vytvořit univerzální modulární spojovací prvek, což je jeden z důležitých cílů této práce.



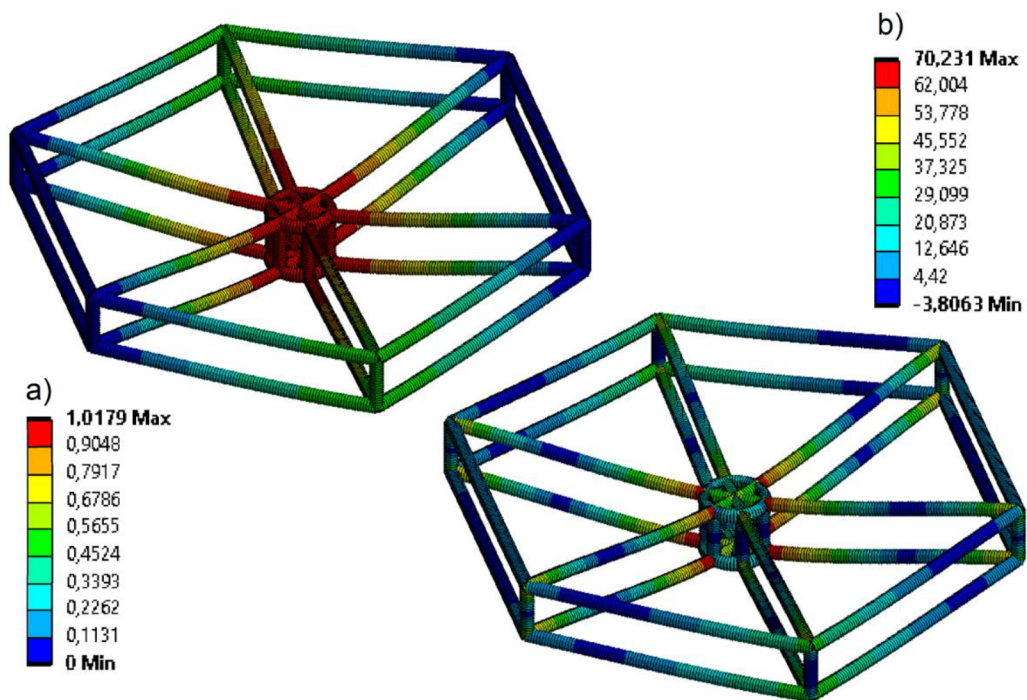
Obrázek 5:3 a) průhyb [mm], b) normálové napětí [MPa] u zavětřované obdélníkové konstrukce

Vzhledem k hlavnímu požadavku na redukci váhy byla simulovaná i rovinná konstrukce. Pokles pevnosti a nárůst normálových napětí a průhybu byl ale naprosto markantní. I pokud by konstrukce pevnostně vydržela působící síly bez vzniku mechanických problémů, docházelo by při prudkých pohybech k 6x větším průhybům než u ostatních konstrukcí, což u některých aplikací, kde se robot pohybuje kolem drahých zařízení, není žádoucí. Rozkmitaná konstrukce by se pak navíc musela uvést do klidu, čímž by se zbytečně prodlužoval čas jednoho cyklu. Snížením hmotnosti konstrukce by mělo dojít ke zkrácení doby cyklu, protože robot nebude muset pomocí SW ubírat tolik zrychlení kvůli velké zatěžovací váze. Tento časový benefit by byl ztracen, pokud by se rozkmitaná konstrukce musela uvádět do klidu.



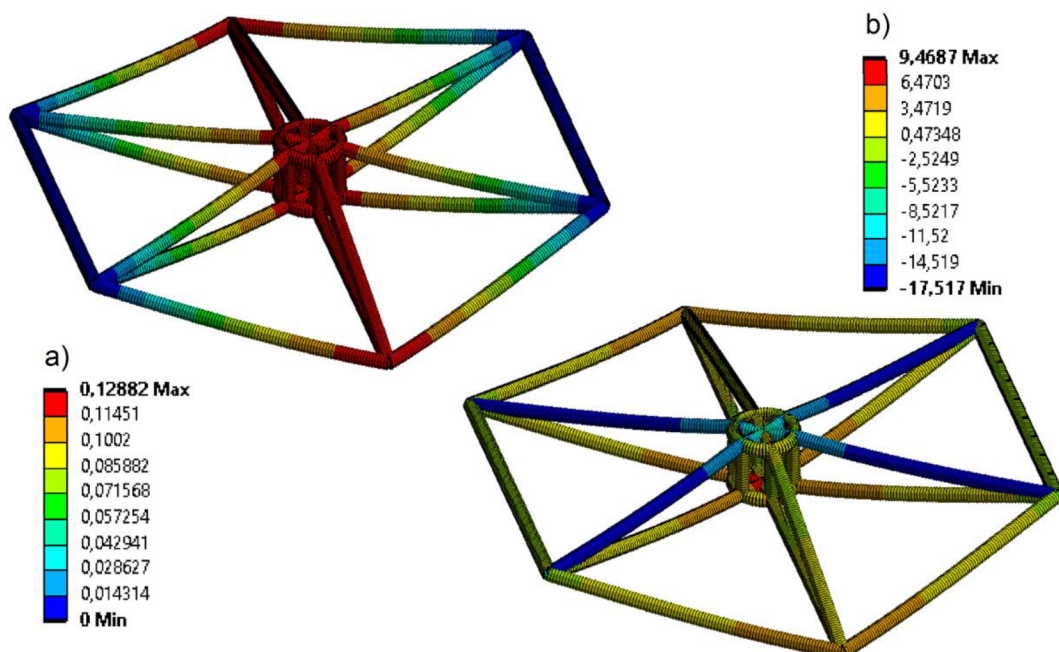
Obrázek 5:4 a) průhyb [mm], b) normálové napětí [MPa] u rovinné konstrukce

Další uvažovaný tvar je hexagon. Konstrukce je rotačně symetrická. Vzhledem ke skutečnosti, že se její velikost ovlivňuje pouze délkou profilů, jsou spojovací prvky plně modulární a univerzální. Jelikož geometrii tvoří několik rovnostranných trojúhelníků, tak všechny karbonové trubky budou mít stejnou délku, čímž se přispěje ke zjednodušení výroby celé konstrukce. Navzdory nárůstu váhy o 23% oproti konstrukci obdélníkové se podařilo zredukovat vnitřní napětí o 24% a hlavně průhyb o 44%. Po rozvaze převládá zmenšení průhybu a zvýšení tuhosti konstrukce nad nárůstem váhy o 277g. Nemalou výhodou hexagonálního tvaru je i to, že nebezpečná místa od normálových napětí jsou u středu konstrukce, který musí být vyroben z hliníku a tím pádem se jedná o nejpevnější místo. Plastový střed by se totiž na ocelové hřídeli robota časem zdeformoval. Naopak po obvodu působí menší síly, což nahrává právě použití dílů vyrobených 3D tiskem, které jsou oproti kovům extrémně lehké.



Obrázek 5:5 a) průhyb [mm], b) normálové napětí [MPa] u hexagonální konstrukce

Poslední uvažovaný tvar je zavětrovaná hexagonální konstrukce. Podle očekávání je lehčí. Důležitý je ale pokles napětí o 86% a pokles průhybu o 88%. Ačkoliv se u zavětrované konstrukce opět vytratila univerzálnost spojovacích prvků, je natolik pevná, že by se v budoucnu dala použít pro jednorázové aplikace. Bude pouze stačit upravit spojovací prvky pro dané rozměry a úhly. Nicméně výroba takové konstrukce, zejména středového prvku, bude technologicky mnohem náročnější.



Obrázek 5:6 a) průhyb [mm], b) normálové napětí [MPa] u zavětrované hexagonální konstrukce

Konstrukce	m_k [g]	σ [MPa]	u [mm]
Obdélníková	911	93,1	1,79
Obdélníková zavětrovaná	773	60,5	0,55
Obdélníková rovinná	490	258,1	5,39
Hexagonální	1188	70,2	1,01
Hexagonální zavětrovaná	884	9,46	0,12

Tabulka 5:1 Porovnání pevnosti

Kromě pevností konstrukcí uvedených v tabulce 5:1 je také důležitým faktorem jejich univerzálnost, v tabulce 5:2 se tedy porovná počet různých spojovacích prvků konstrukcí a počet profilů a jejich délek potřebný pro stavbu konstrukcí. Znak ∞ v tabulce 5:2 vyjadřuje, že pro každý rozměr konstrukce musí být kvůli zavětrování přemodelovány spojovací prvky, takže nelze určit potřebný počet spojovacích prvků pro stavbu univerzální konstrukce.

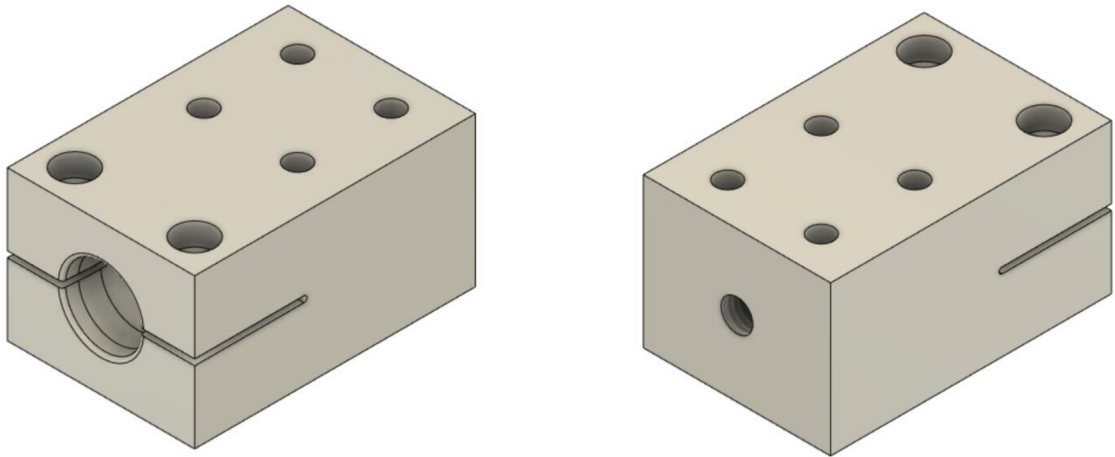
Konstrukce	Počet spojovacích prvků	Počet trubek	Počet délek trubek
Obdélníková	2	20	3
Obdélníková zavětrovaná	∞	18	4
Obdélníková rovinná	3	12	3
Hexagonální	1	24	1
Hexagonální zavětrovaná	∞	18	2

Tabulka 5:2 Porovnání univerzálnosti

Ačkoliv je hexagonální konstrukce nejtěžší ze všech porovnávaných, tak je naprosto univerzální. Jelikož se bude vyrábět jen jeden spojovací prvek a všechny profily se budou řezat na stejnou délku, značně se tím zjednoduší výrobní proces. Proto dále budeme uvažovat hexagonální tvar konstrukce. Váhový rozdíl oproti ostatním konstrukcím není tak důležitý jako univerzálnost, protože při použití profilů z uhlíkových vláken a aditivních metod pro výrobu obvodových spojů by mělo být dosaženo nižší hmotnosti než u hliníkových profilů.

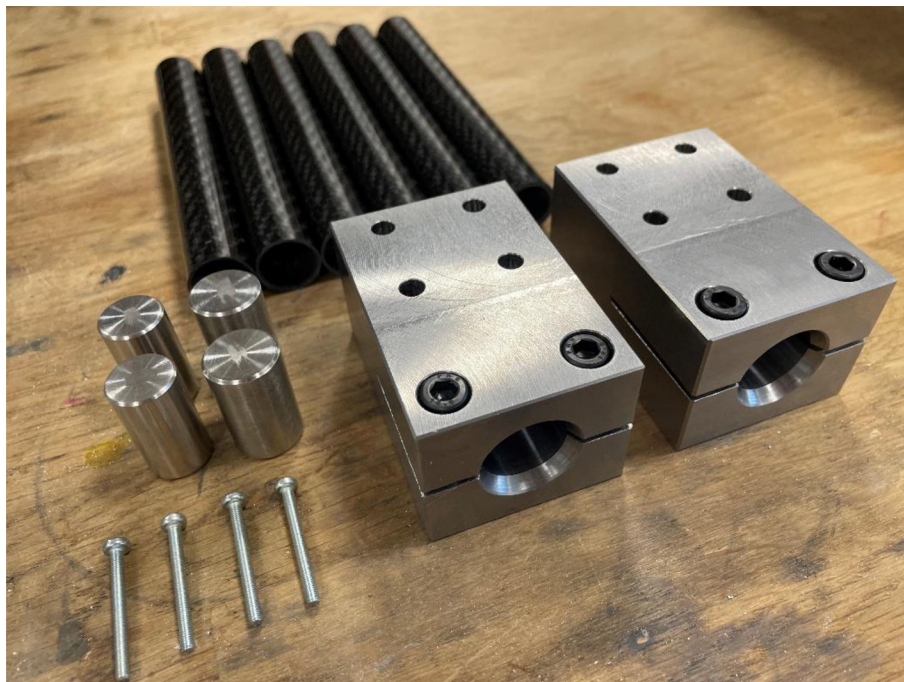
5.2 Funkční zkouška svěrného spoje

Při znalosti maximální akcelerace i geometrie konstrukce je potřeba navrhnout spoj karbonových profilů, který bude dostatečně pevný a odolný. Ještě před samotným návrhem spojovacích prvků byl navrhnout testovací spoj (Obrázek 5:7), na kterém bude provedena funkční zkouška svěrného spoje v tahu. Bude porovnána závislost pevnosti spoje na drsnosti styčných ploch, tloušťce stěny profilu a použití kolíku. Byly vyzkoušeny dvě varianty spoje. Pro jednoduchost výroby byl testován spoj z jednoho kusu a pro lepší rozložení tlaku byl testován spoj ze dvou částí.



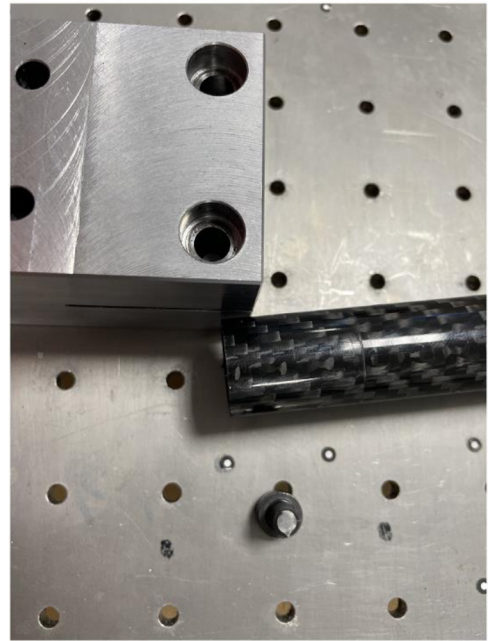
Obrázek 5:7 3D model testovacího silového spoje z jednoho kusu pro zkoušku tahem

Technický výkres je k nalezení v příloze [11] [12] [13]. Testované profily měly průměr 20 mm a tloušťku stěny 1 mm nebo 2 mm. Vzorky profilů se nařezaly na délku 150 mm. Do těchto trubek byly vysoustruženy ocelové kolíky s přechodným uložením.



Obrázek 5:8 Připravené pomůcky pro zkoušku tahem

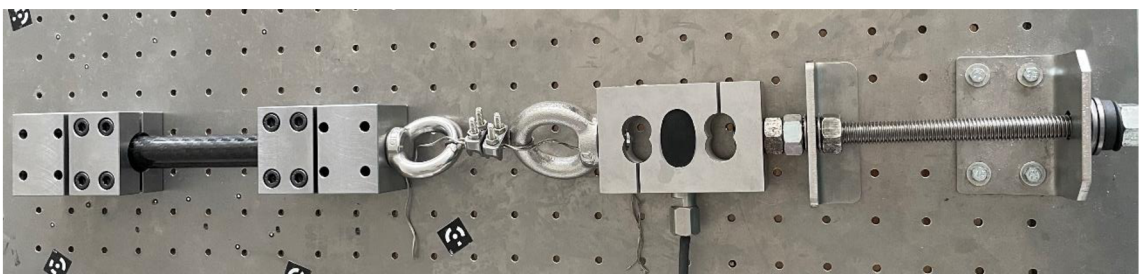
Při mechanické zkoušce se první varianta svěrného spoje z jednoho kusu ukázala nevhodná. Profil byl u konce uložení porušen, jak je vidět na obrázku 5:9, ale přitom uvnitř spoje ještě profil nebyl sevřený. Toto bylo způsobeno nerovnoměrným rozložením tlaku od ohybového momentu, který při dotažení vytvářel šroubový spoj. Při snaze profil co nejvíc utáhnout došlo k překročení povoleného utahovacího momentu 6,4 Nm pro šrouby M6 pevnostní třídy 5.8 a následnému překročení meze pevností šroubů a jejich utržení. Proto byl dále testován jen druhý typ uložení, kde jeden díl byl ve vertikálním směru plovoucí, a tak docházelo k rovnoměrnému tlakovému sevření po celé vnější ploše karbonového profilu, jak je vidět na obrázku 5:10. Finální spoje tedy budou muset být vždy ze dvou kusů a nedojde tak k ulehčení výroby.



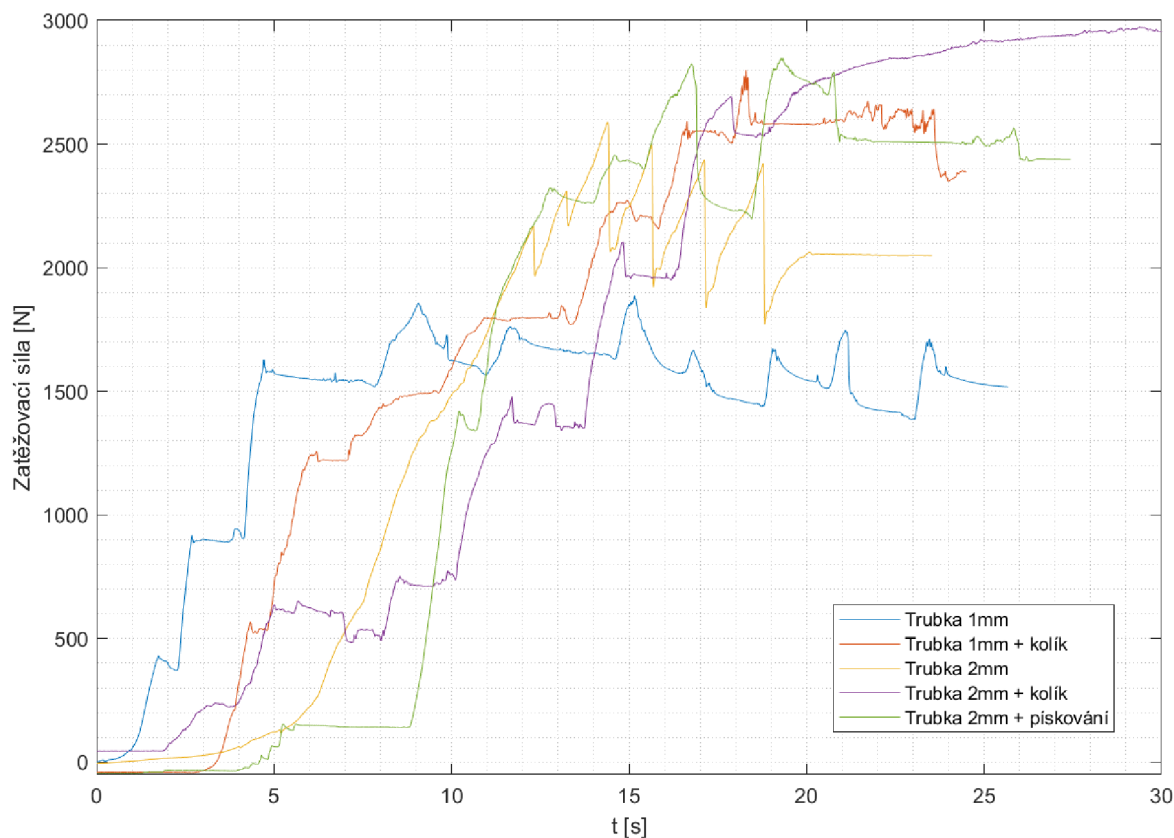
Obrázek 5:9 prasklý šroubový spoj

Působící axiální síly byly změřené tenzometrickým snímačem o rozsahu 3000 N. Přípravky ze dvou částí se uchytily na zkoušecí desku a za pomoci principu matice a závitové tyče M12 (obrázek 5:10 vpravo) se v soustavě vyvozovalo normálové zatížení. Data byly zaznamenávány real-time s obnovovací frekvencí 100 Hz a poté vyexportovány. Vykreslení grafů proběhlo v Matlabu [8]. Zatěžování sestavy probíhalo ručně, proto v grafech nárůst axiální síly není zdaleka lineární, ale spíše skokový. Zkouška byla vždy ukončena až po narušení pevnosti spoje, proto v grafu na obrázku 5:11 trvá každá zkouška jiný časový úsek.

Karbonové profily se po každé zkoušce měnily, aby se zabránilo použití už nějak poškozených profilů a ovlivnění výsledků.



Obrázek 5:10 Finální sestava užitá pro provedení zkoušky tahem



Obrázek 5:11 Závislost axiální síly na typu spoje u tahové zkoušky

Z výsledků měření vynesných do grafu na obrázku 5:11 lze vidět, že dle očekávání nejpevnější spoj vytvořila trubka o tloušťce stěny 2 mm podpořená kolíkem. Problém profilů bez kolíku bylo praskání při stahování, což způsobilo narušení materiálu a zamezilo plnému dotažení šroubového spoje. Toto je z hlediska montáže nežádoucí, protože stačí omylem přetáhnout šroubový spoj a profil se může zničit. Pískování povrchu se osvědčilo, došlo k malému navýšení tření v silovém spoji a tím pádem ke vzrůstu pevnosti spoje. Z důvodu absence pískovacího stroje ve výrobní hale firmy tuto možnost uvažovat nebudeme, jelikož její vliv na pevnost spoje není tak velký, aby se vyplatilo součást pískovat externě. Ze zkoušky mechanických vlastností bylo kvantifikováno, že nejlepší poměr pevnosti a hmotnosti má karbonový profil o tloušťce 1 mm s kolíkem uvnitř, který razantně zvýší pevnost i sníží riziko chyby při montáži konstrukce. Výsledky zkoušky jsou uvedené v tabulce 5:3

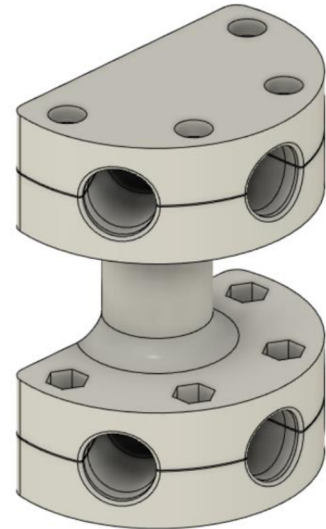
Číslo měření	kolík	Tloušťka stěny	Opracování povrchu	Maximální zátěž [N]
1	×	1 mm	Žádné	1887
2	✓	1 mm	Žádné	2799
3	×	2 mm	Žádné	2589
4	✓	2 mm	Žádné	2974
5	×	2 mm	Pískování	2848

Tabulka 5:3 Srovnání testovaných spojů

5.3 Spojovací prvky

5.3.1 Obvodový spoj

Jako první byly navrženy [11] [12] [13] obvodové spoje, ve kterých je sevřený karbonový profil s kolíkem. Tyto spoje budou vyráběny pomocí FDM technologie. Vzhledem k univerzálnosti a modulárnosti konstrukce bude stačit navrhnout jeden díl. Jak bylo ověřeno v mechanické zkoušce spoje, pro pevný spoj je třeba karbonový profil podpořit kolíkem a stáhnout šrouby. Jelikož spoj bude vyráběn aditivní technologií, nemůže se do něj vyřezat závit, ale musí se použít šrouby a matice, jak je vidět na obrázku 5:12. Pro modelování byly stanovené geometrické okrajové podmínky, a to šířka konstrukce 600 mm a vzdálenost horní a spodní vrstvy 80 mm. Tyto rozměry vycházejí z dosahu Scary. Větší konstrukce už by výrazně omezovala pohybové možnosti robota. Úhly mezi jednotlivými spoji vychází z prostorového rozložení konstrukce a mají všude 60°. Spoj bude vytisknut z materiálu PA12+CF15 [14], což je nylon s 15 % příměsí uhlíkových vláken.



Obrázek 5:12 Obvodový spoj



Obrázek 5:13 Prototyp obvodového spoje

V rámci testování proběhl tisk několika prototypů (Obrázek 5:13), u kterých se měnil průměr díry pro profil a mezera (zápich) ve spoji. Průměr díry bylo potřeba testovat zejména kvůli rozměrovým tolerancím 3D tisku. Vzhledem k elasticitě nylonu bylo žádoucí zabránit nadměrnému průhybu při montáži co největším zmenšením mezery mezi horním a spodním dílem. Důležitou součástí bylo také otestovat odolnost spoje pro různé orientace tiskových vrstev, jelikož výtisky mají tendenci praskat právě v nich.

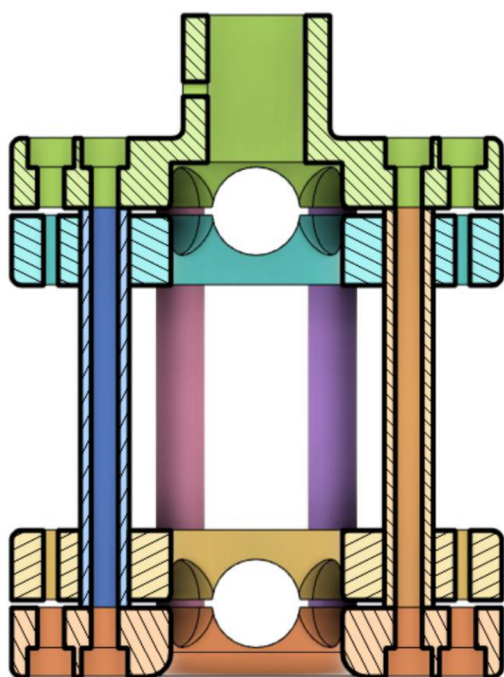
Číslo prototypu	Velikost zápichu [mm]	Ø Díry [mm]
1	1,5	20,3
2	1	20,2
3	0,4	20,2
4	0,4	20,1

Tabulka 5:4 Srovnání testovaných obvodových spojů

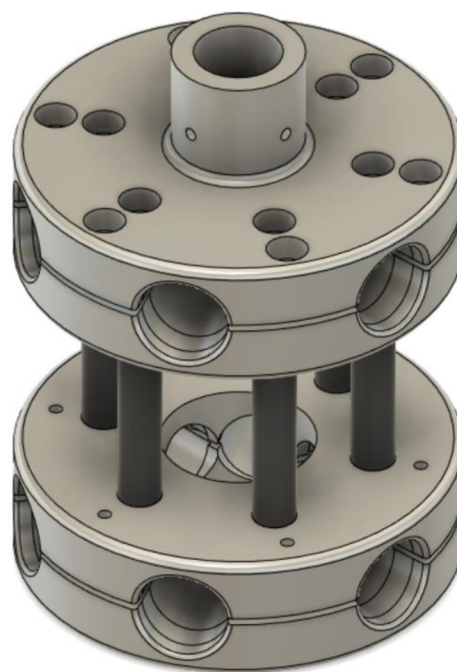
Obvodový prvek slouží zároveň i jako držák koncového efektoru. Tyto efektor mají ale celou škálu možností uchycení, lišící se průměrem i stoupáním závitu a rozmístěním i počtem šroubů [15] [16]. Proto není možné do obvodového spoje integrovat univerzální díru či závit pro uchycení gripperů, ale je potřeba pro každý použitý koncový efektor přizpůsobit jeho uchycení.

5.3.2 Středový unašeč s úchytem na robota

Pro středový unašeč je použit identický styl uchycení profilu jako u obvodového spoje. Jelikož bude unašeč obroben z hliníku na CNC stroji, odpadá potřeba užití matic jako u plastových spojů a závit bude vyfrézován přímo do díry, čímž se usnadní kompletace. Byl také zvětšený zápich pro použití standardně užívaných nožů na CNC. Toto vzhledem k pevnosti hliníku nijak neovlivní vlastnosti spoje. Dále bylo provedeno odlehčení, které zároveň přidalo možnost vést středem a spodem prvku elektrické kabely i pneumatické hadičky (Obrázek 5:15). Před samotnou výrobou proběhlo ověření a upravení geometrie na tisknutém prototypu, aby se zamezilo pozdějším úpravám obrobeného dílu. Jak je vidět na obrázku 5:14, díry pro karbonové trubky jsou průchozí, ale s osazením. Osazení v díře je z důvodu ulehčení montáže. Pro zachování geometrie celé konstrukce je horní a spodní díl nejprve dotažen pomocí rozpěrných tyčí a až poté se dotáhnou karbonové profily. Toto řešení zamezí nerovnoměrnému utahení profilů a tím vyosení celého středového unašeče. Výkres je v příloze [11] [12] [13].



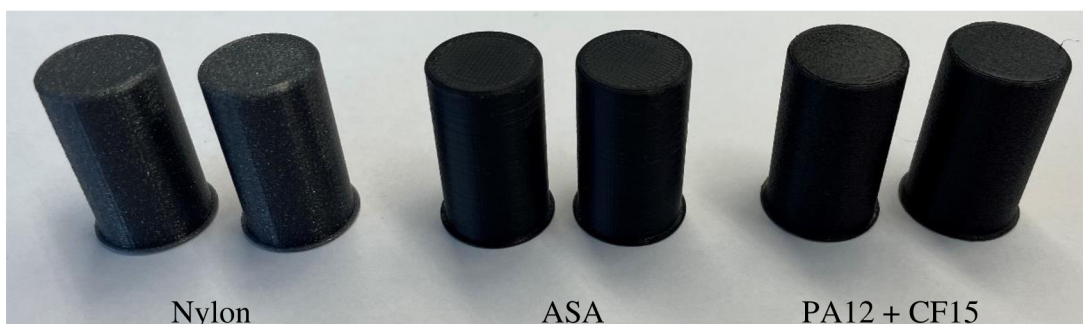
Obrázek 5:14 Řez středovým unašečem [7]



Obrázek 5:15 Středový unašeč

5.3.3 Kolíky

Hlavním úkolem této práce je redukce váhy při zachování pevnosti konstrukce. Ačkoliv ocelové kolíky při funkční zkoušce svěrného spoje fungovaly výborně, tak jeden kolík o průměru 16 mm váží 47 g a u kolíku o průměru 18 mm se váha vyšplhá na 60 g. Při celkovém počtu 48 kolíků je jejich váha 2256 g, respektive 2880 g, což je vzhledem k nosnosti robota 6 kg téměř polovina zatížení, takže je to nevhodné. Proto proběhly testy sevření kolíků tisknutých FDM technologií (obrázek 5:15) v dřívě použitém unašeči pro funkční zkoušku svěrného spoje. Testovaný materiál byl nylon, ASA (Acrylic Styrene Acrylonitrile) a PA12+CF15 [14]. Dále byly v karbonových profilech kvůli rozměrovým tolerancím 3D tisku testovány různé průměry kolíků pro vytvoření uložení s mírným přesahem.



Obrázek 5:16 Typy testovaných kolíků

Číslo prototypu	materiál	Průměr kolíku	Utahovací moment šroubového spoje
1	ASA	20 mm	×
2	ASA	20,02 mm	×
3	ASA	20,01 mm	2,6 Nm
4	Nylon	20,01 mm	3,1 Nm
5	PA12+CF15	20,01 mm	4 Nm

Tabulka 5:5 Testované parametry kolíků

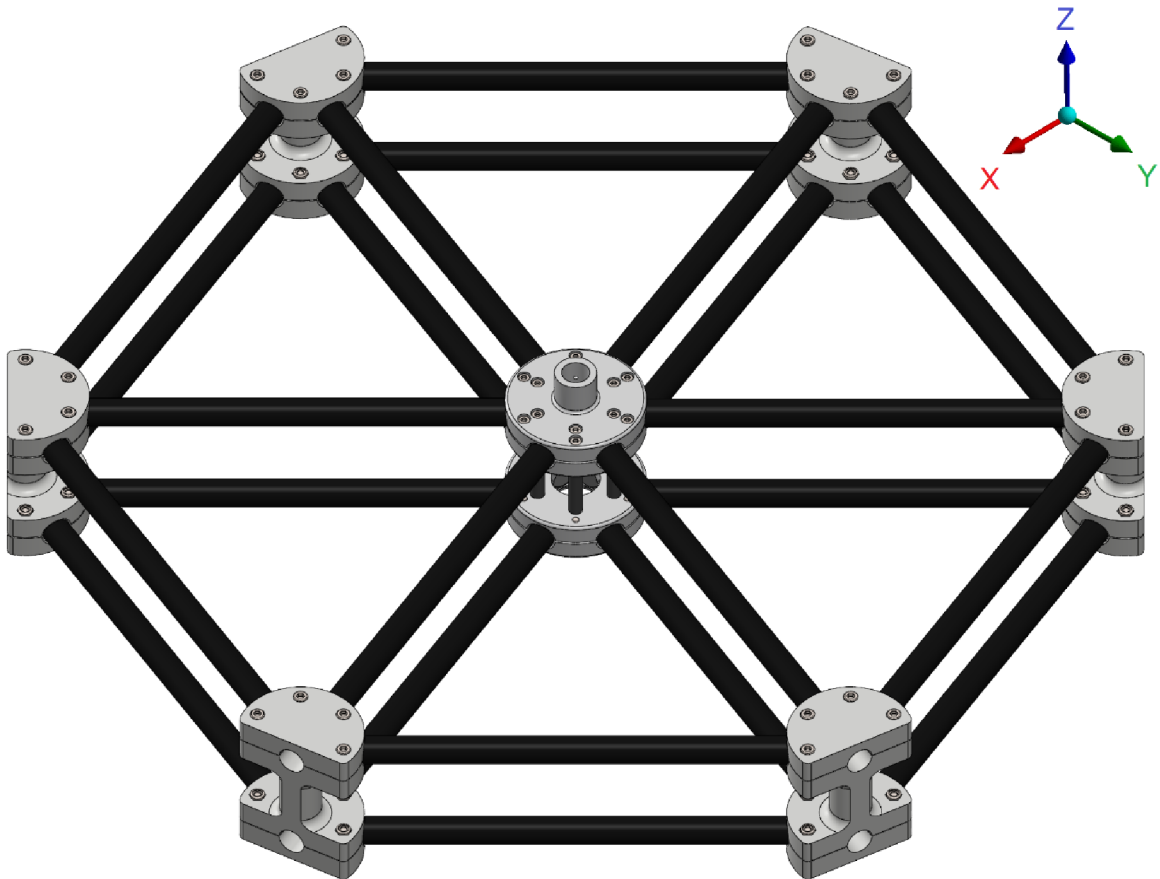
Dle tabulky 5:5 má nejlepší vlastnosti materiál PA12+CF15 [14]. Obvodový spoj je také tisknut ze stejného materiálu, takže tam nehrozí poškození kolíku při sevření. Při nedodržení stanoveného utahovacího momentu se začne elasticky deformovat (nikoliv praskat) samotný spojovací prvek, nikoliv trubka nebo kolík. Díky tomuto chování lze ihned poznat špatné utažení šroubového spoje. Nedostatečná pevnost oproti oceli ale může být problém ve středovém spoji, který je hliníkový. Při větších utahovacích momentech se kolík i karbonová trubka [10] zdeformovaly (Obrázek 5:17), z čehož vyplynula nutnost jiného kolíku pro středový spoj. Otestován byl proto identicky vysoustružený kolík ze silonové tyče [17], který se ukázal jako dostatečně pevný na to, aby vydržel maximální dovolený utahovací moment šroubů M6 třídy 5.8.



Obrázek 5:17 Deformace kolíku

5.4 Sestava

Byl vytvořen model (Obrázek 5:18) a výkres sestavy [11] [12] [13], který je umístěn v příloze. V tabulce 5:6 je definovaná celková váha konstrukce umístěná na robota. Znalost hmotnosti je důležitá pro výpočet dynamického zatížení spojů a určení momentů pro dotažení šroubových spojů. Z hmotnosti konstrukce se určila i maximální nosnost efektorů vzhledem k nosnosti robota. Na hotovém modelu soustavy také proběhnu výpočty MKP v programu Ansys [9].



Obrázek 5:18 Kompletní model sestavy

Díl	ks	m_i [g]
Karbonové profily $\varnothing 20$ mm	24	663
Šrouby M5×25 mm	24	120
Šrouby M6×30 mm	48	336
Matice M6	48	48
Kolíky $\varnothing 18$ mm (PA12+CF15)	36	216
Kolíky $\varnothing 18$ mm (silon)	12	108
Obvodový spoj	6	870
Středový unašeč	1	1230
Celková hmotnost [g]		3591

Tabulka 5:6 Hmotnosti prvků konstrukce

Prototyp konstrukce bude používán na robotu Scara LS-602C, který má maximální nosnost 6 kg. Rozsah nosnosti běžně používaných robotů Scara je od 3 do 10 kg. Pro výpočet maximální dynamické síly tedy budeme uvažovat zatížení robota 10 kg. Opět budeme velmi na konzervativní straně, jelikož SW nedovolí robotu Scara, který je zatížen statickou tíhovou silou 98,1 N dosáhnout maximálního naměřeného zrychlení. Pro výpočet zatížení byl použit II. Newtonův zákon (rovnice 5.1 a 5.2). Maximální zatěžovací síla je násobena dynamickým koeficientem $k_D = 4$. Vysoká bezpečnost je požadavek zadavatele, protože když se robot pohybuje kolem velmi drahých výrobních linek nebo vstřikovacích lisů, tak by při porušení integrity konstrukce mohlo dojít k jejich poškození, což je nepřijatelné. Horizontální rovina je dle obrázku 5.18 definovaná jako rovina XY.

$$F_{xy,max} = m \times a_{max} \times k_D = 10 \times 38,31 \times 4 \cong 1530 \text{ N} \quad (5.1)$$

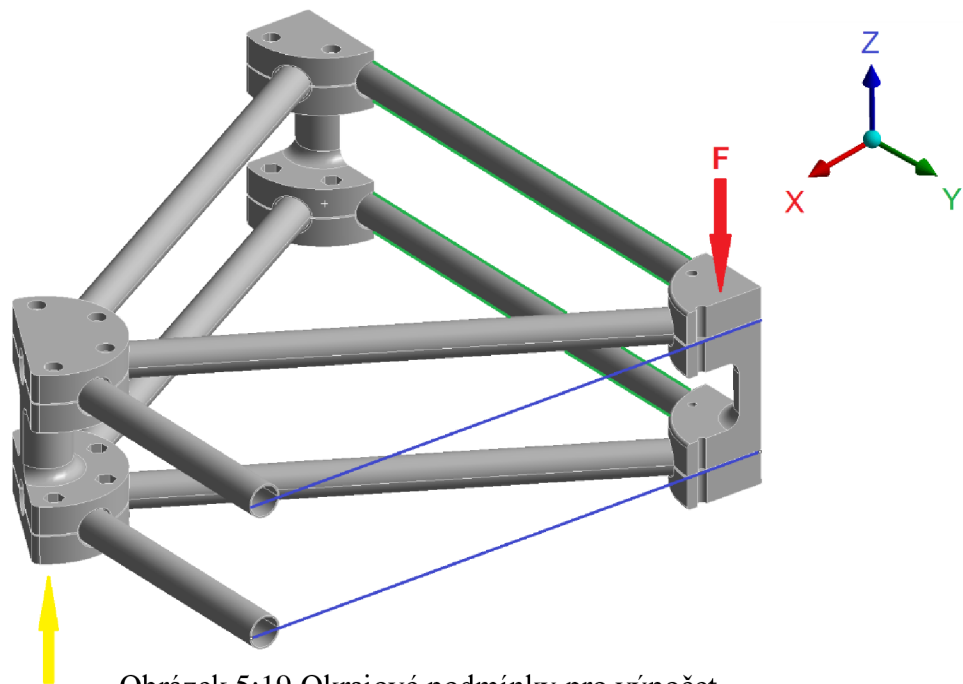
Nyní díky znalosti dynamických sil působících na konstrukci můžeme simulovat deformace a normálové silové účinky při zatížení konstrukce v horizontálním směru.

V programu Epson RC+ 7.5.0 bylo v simulátoru zjištěno, že maximální zrychlení v ose Z je o 10 % menší než v horizontální rovině. Pro zatížení konstrukce ve vertikální ose bude tedy uvažováno dynamické a gravitační účinky působící v ose Z. Vertikální osa je dle obrázku 5.18 definovaná jako osa Z.

$$F_{z,max} = m \times (a_{z,max} \times k_D + g) = 10 \times (34,48 \times 4 + 9,81) \cong 1480 \text{ N} \quad (5.2)$$

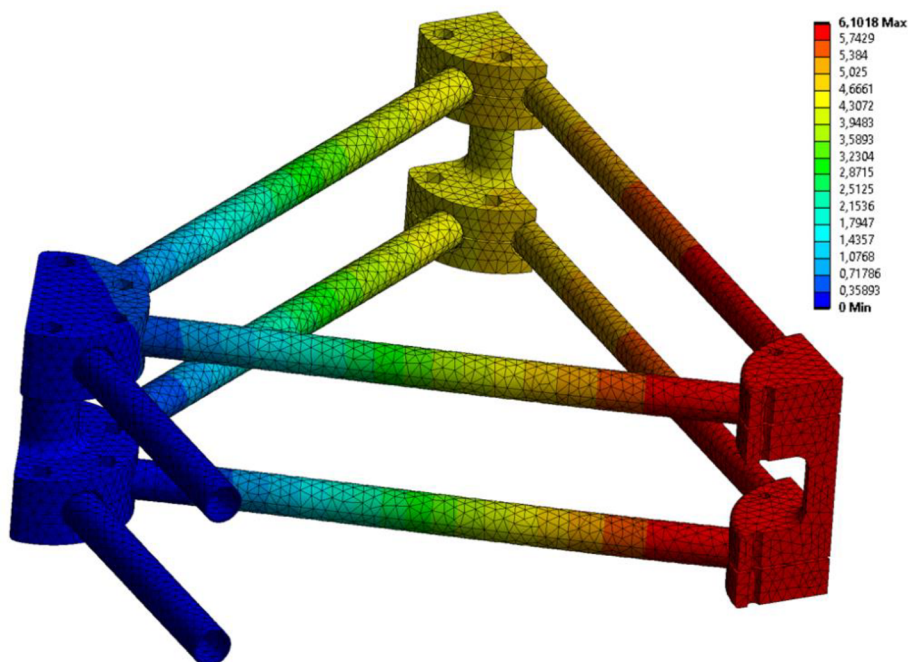
5.5 Výpočty v MKP

Okrajové podmínky jsou podobné jako v předchozích výpočtech v kapitole 5.1. Fixovanou plochu naznačuje žlutá šipka na obrázku 5:19, zelená a modrá barva značí užití symetrie. Zatěžovací síla na středu konstrukce působící v ose Z je kvůli symetrii 382,5 N.

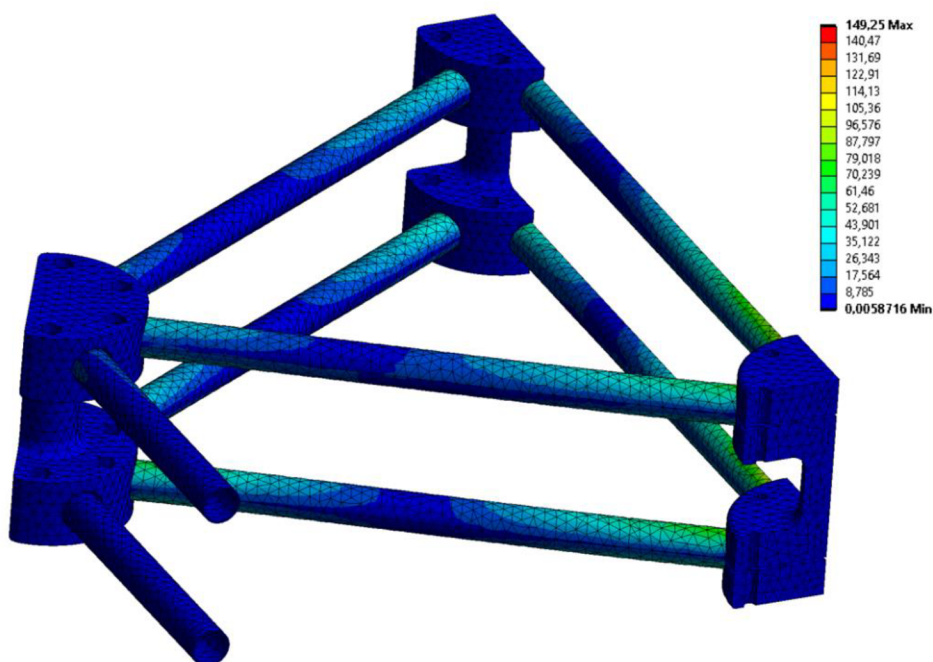


Obrázek 5:19 Okrajové podmínky pro výpočet

Simulace deformací a normálových napětí proběhla už na kompletním CAD modelu soustavy. Model byl pro potřeby MKP zjednodušen, byly odstraněny prvky zejména ze středového unašeče, jelikož jeho pevnost vůči simulovanému zatěžování řádově převyšuje pevnost obvodových spojů i karbonových profilů. Aby se snížila náročnost simulace, bylo využito rotační symetrie modelu. Z důvodu nesymetrických vazeb ale nešlo simulovat pouze 1/12 soustavy. Konstrukce byla testovaná jak v horizontální, tak vertikální rovině. V horizontální rovině proběhla simulace ohybu od maximální dynamické síly v ose Z. Maximální průhyb konstrukce 6 mm při takovém zatížení je v normě, stejně tak normálové špičky 150 MPa v karbonovém profilu s mezí pevnosti 600 MPa [18].

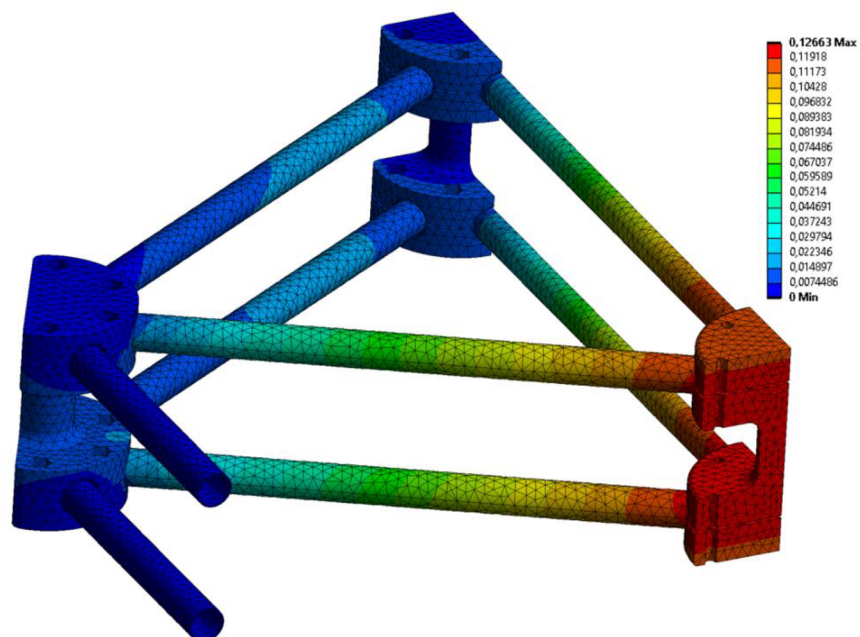


Obrázek 5:21 Zátěž od dynamické síly ve vertikální ose (průhyb [mm])

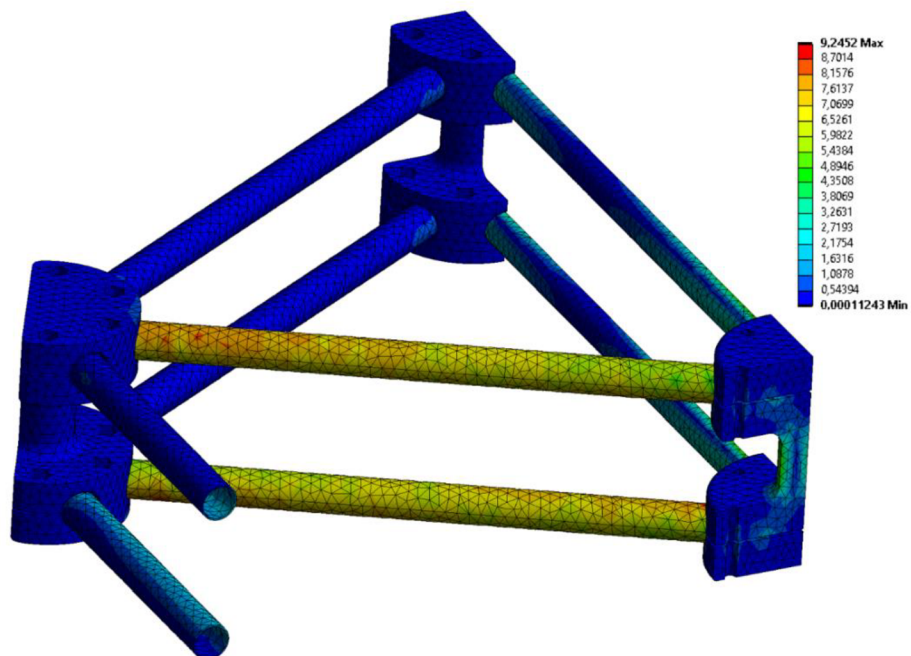


Obrázek 5:20 Zátěž od dynamické síly ve vertikální ose (normálové napětí [MPa])

Dle předpokladů je konstrukce velmi odolná vůči zatěžování v horizontální rovině, jelikož jsou karbonové trubky namáhané v axiálním směru, nikoliv na ohyb. Proto jsou deformace i napěťové špičky vznikající zejména v karbonových profilech zanedbatelné.



Obrázek 5:22 Zátěž od dynamické síly v horizontálním směru (průhyb [mm])



Obrázek 5:23 Zátěž od dynamické síly v horizontálním směru (normálové napětí [MPa])

5.6 Utahovací moment šroubových spojů

Aby se určil pro výrobu potřebný utahovací moment šroubových spojů, je nejprve třeba stanovit koeficient tření v daném silovém spoji. Pro výpočet koeficientu tření mezi hliníkem a karbonovým profilem vyjdeme z mechanické zkoušky svěrného spoje. 4 šrouby M6 byly dotaženy na maximální předepsaný utahovací moment 6,4 Nm. Při zkoušce užitý silový spoj vydržel axiální namáhání o velikosti 2800 N. Ze vztahu (5.3) pro výpočet utahovacího momentu šroubu jsme schopni určit sílu předpětí působící v jednom šroubu. Součinitel utahovacího momentu K pro pozinkovaný šroub je dle tabulkových hodnot 0,2.

$$M = F_i \times d \times K \quad (5.3)$$

$$F_i = \frac{M}{d \times K} = \frac{6,4 \text{ Nm}}{0,006 \text{ m} \times 0,2} = 5334 \text{ N}$$

Tuto sílu vyvozenou jedním šroubem použijeme pro výpočet koeficientu tření ve spoji

$$F_t = F_i \times i \times k_t \quad (5.4)$$

$$k_t = \frac{F_t}{i \times F_i} = \frac{2800 \text{ N}}{4 \times 5334 \text{ N}} = 0,13$$

Vypočtený koeficient je velmi blízký tabulkovému koeficientu ($k_t = 0,14$) [19]. Pro výpočet utahovacího momentu je třeba znát axiální zatížení spoje. Maximální zatěžovací síla se ve středovém dílu rozloží do 12 silových spojů, které jsou utáhnuty 12 šrouby M5. Toto zjednodušení vychází z předpokladu rovnoměrného rozložení síly do všech spojů, ačkoliv reálně budou některé spoje zatížené více a některé méně. Z tohoto důvodu je rovnice (5.3) pro utahovací moment šroubu násobena koeficientem bezpečnosti $k = 2$. Za sílu vyvozenou jedním šroubem bylo dosazeno ze vztahu (5.4)

$$M_s = \frac{F_t}{i \times k_t} \times d \times K \times k = \frac{1530}{12 \times 0,13} \times 0,005 \times 0,2 \times 2 \cong 2 \text{ Nm}$$

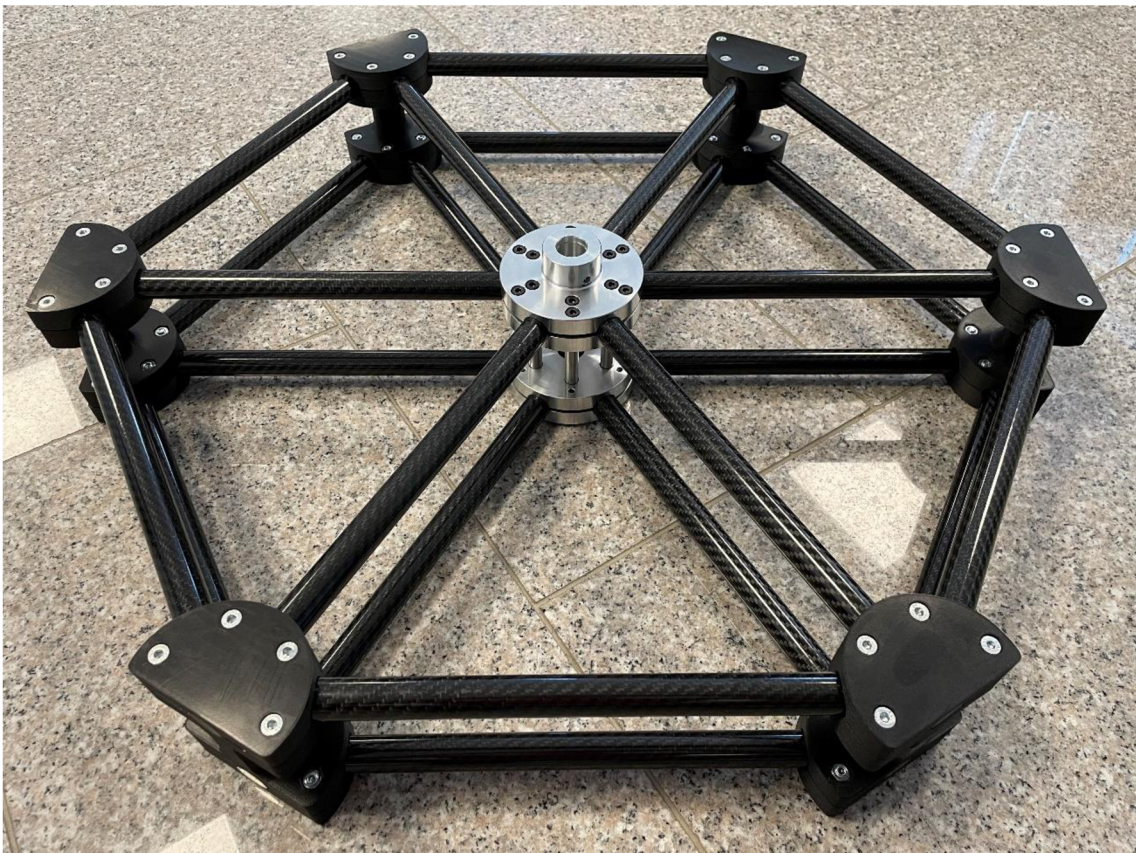
Za použití rovnice 5.3 a 5.4 byl odvozen utahovací moment šroubů obvodového spoje, kde je 6 profilů utáhnuto 8 šrouby M6. Koeficient tření byl stanoven opět mechanickou zkouškou svěrného spoje. Jelikož je obvodových spojů 6, tak opět za předpokladu rovnoměrného rozložení síly bude jeden obvodový spoj namáhán silou 255 N.

$$M_o = \frac{F_t}{i \times k_t} \times d \times K \times k = \frac{255}{8 \times 0,04} \times 0,006 \times 0,2 \times 2 \cong 2 \text{ Nm}$$

Vzhledem k požadovanému utahovacímu momentu nebudou použity pevnostní šrouby.

6 Stavba a testování konstrukce

Dle výkresu sestavy byl složen finální prototyp odlehčené konstrukce, jak je vidět na obrázku 6:1. Ačkoliv výroba jednotlivých dílů je náročnější než koupě hliníkových profilů, tak požadavek zadavatele na jednoduchost stavby a univerzálnost konstrukce lze považovat za splněný. Pila se předem nastavila na jeden rozměr (300 mm) a nařezalo se 24 karbonových profilů. Tyto profily se osadily příslušnými kolíky a následně se vložily na doraz do středového unašeče a utáhly se šroubové spoje na předepsané 2 Nm. Po obvodu se rozložily obvodové spoje společně s dalšími profily a vše se postupně utáhlo momentem 2 Nm. Šroubové spoje ve středovém dílu se dotahovaly v pořadí 1-4-5-2-3-6, aby nedošlo k nerovnoměrnému utažení.



Obrázek 6:1 Sestavená konstrukce

Správnost výpočtů byla ověřena zatěžovací mechanickou zkouškou. Konstrukce se podepřela pod všemi šesti obvodovými spoji a následně se středový unašeč začal zatěžovat. Při dosažení statické zatěžovací síly 1500 N, která by dle postupů použitých v této práci neměla nikdy nastat, se na konstrukci neprojeví žádné známky mechanického poškození. Výpočty tak lze považovat za ověřené.

7 Srovnání

Byla sestavena konstrukce z hliníkových profilů Minitec, viz obrázek 7:1, s podobným dosahem efektorů jako má nově vytvořená hexagonální sestava. Dimenzovaná byla také na zatížení dynamickou silou 1500 N. Tabulka 7:1 srovnává všechny důležité parametry obou konstrukcí. Nutno podotknout, že váha hliníkové konstrukce uvažuje i hmotnost dílu pro uchycení na robota, který není na obrázku 7.1.

	Hliníková konstrukce Minitec	Odlehčená karbonová konstrukce
Váha [kg]	8,2	3,6
Čas stavby [h]	2	50
Obtížnost stavby	Jednoduchá	Střední
Cena robota [Kč]	400 000,00 Kč (LS-10B)	320 000,00 Kč (LS-6B)
Cena konstrukce [kč]	6 500,00 Kč	10 500,00 Kč
Čas cyklu [s]	1,789	1,311

Tabulka 7:1 Srovnání parametrů obou konstrukcí

Ačkoliv je konstrukce z karbonových profilů na výrobu obtížnější a finančně i časově náročnější, tak vůči hliníkové konstrukci je o 56 % lehčí. Toto má za důsledek zrychlení jednoho cyklu robota o 26 % a hlavně možnost použití o řád nižšího robota při váze přenášených výrobků do 2 kg, což způsobí cenovou úsporu při stavbě robotické linky.



Obrázek 7:1 Hliníková konstrukce Minitec

8 Další vývoj

Momentální řešení konstrukce uvažuje vedení elektrické kabeláže a pneumatických hadiček vně karbonových profilů. Kabeláž je tak zajištěna pouze pomocí stahovací pásky. Z bezpečnostního i estetického hlediska by bylo dobré přizpůsobit obvodové prvky a kolíky k vedení těchto svazků uvnitř trubek. Středový prvek už tomuto byl uzpůsoben, jak lze vidět ve výkresové dokumentaci. Bylo by potřeba do kolíků vyrobít díru dostatečně velkou, aby se skrz ně mohla protáhnout potřebná kabeláž. Následně je ale nutné otestovat, zda budou mít tyto kolíky dostatečnou pevnost, aby se při dotahování profilu šroubovým spojem nezhroutily.

Pro snížení výrobní ceny konstrukce by bylo vhodné provést pevnostní testy méně kvalitních filamentů pro 3D tiskárny. Momentálně užívaný nylon s 15 % příměsí karbonových vláken [14] se sice řadí k nejlepším a nejpevnějším materiálům na trhu, ale taky je poměrně drahý a náročný na samotný tisk.

Dále by bylo možné vyrobít univerzální prvek, který by se dal kdekoli po konstrukci vertikálně umístit mezi dva karbonové profily. Opět by se využilo silového šroubového spoje, aby nedošlo k narušení karbonové struktury vrtáním. Na tyto prvky by se pak v případě potřeby daly umístit další efekторы, čímž by se opět výrazně zlepšila univerzálnost konstrukce a její pevnost, ale zvýšila by se tím hmotnost.

Pokud by se tato odlehčená konstrukce v praxi osvědčila, bylo by určitě vhodné navrhnout středový díl tak, aby se přímo do něj integroval protikus měniče nástrojů, a sestava tak byla připravená na použití i pro aplikace, kde jeden robot ve výrobním procesu ovládá více koncových nástrojů a průběžně si je sám mění.

Posledním vylepšením by mohla být topologická optimalizace středového ušaseče a následná výroba pomocí aditivních technologií z kovu. Tento vývojový krok by se vzhledem k výrobní ceně pravděpodobně nikdy neuchytl v praxi, ale bylo by zajímavé zjistit, jak moc se může zredukovat hmotnost konstrukce za použití moderních technologií.

9 Závěr

V této práci byla jako první provedena řešerše momentálně používaných konstrukcí a spojovacích prvků pro karbonové profily. S využitím těchto poznatků proběhl návrh jednotlivých dílů sestavy, jejich následné výpočetní ověření pomocí MKP a otestování v mechanických zkouškách. Postup se průběžně konzultoval se zadavatelem práce.

V první části se práce věnuje zjištění provozního zatížení robota a následnému geometrickému návrhu konstrukce. Při modelování dílčích prvků konstrukce bylo použito svěrného spoje, jehož princip i příklad je uveden v řešerši. Tento navržený spoj byl poté testován mechanickou zkouškou v tahu pro ověření pevnosti.

V druhé části se již modelovaly jednotlivé díly konstrukce, do kterých se implementoval svěrný spoj otestovaný v části první. Pevnost celé konstrukce byla ještě výpočetně ověřena pomocí MKP. Z hmotnosti konstrukce jako celku se dopočítaly utahovací momenty šroubových spojů.

V poslední, třetí, části proběhla výroba, stavba a testování vyvinuté konstrukce. Pro ověření dosažených výsledků byla pro porovnání vyrobena i hliníková konstrukce s podobným dosahem efektorů i nosností.

Cílem této práce bylo vyrobit odlehčenou konstrukci, která ale bude mít stejný dosah i pevnost jako momentálně užívané hliníkové konstrukce. Po zhodnocení dosažených výsledků a porovnání obou konstrukcí v kapitole 7 lze konstatovat, že tato práce vedla k vytvoření funkční odlehčené konstrukce za použití karbonových profilů a aditivních technologií. Došlo k poměrně výrazné redukci váhy o 56 % a zrychlení cyklu robota o 26 %. Snížení hmotnosti upevněné na robotické rameno také umožní pro určité aplikace použít Scaru s nižší nosností, čímž se celá výroba zlevní. Pro použití v průmyslu nicméně bude třeba tuto metodu dále rozvíjet, zejména co se týče vedení kabeláže a rozmístění koncových efektorů.

Použité informační zdroje

- [1] LIGHTGRIP-END-OF-ARM TOOLING. *Tetrafix* [online]. Tetrafix, ©2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <http://www.tetrafix.se/en/plastic-moulding.html>
- [2] HOW TO: Making Simple Carbon Fiber Tube Connectors. [video] *YouTube* [online]. DarkAero, 2020 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=d4riggc3IZk>
- [3] MODULAR CARBON FIBER TUBE CONNECTORS. *DragonPlate* [online]. DragonPlate, ©2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://dragonplate.com/Modular-Carbon-Fiber-Tube-Connectors>
- [4] Držák trubky 20 mm, hliník, série A. *Kovaz* [online]. Kovaz, ©2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.kovaz.cz/drzak-trubky-20mm-hlinik-serie-a-velikost-3-din-3015-raa320x-48428/>
- [5] Aluminium T joint connector – 20×20 mm. *Enhanced Composites* [online]. Enhanced Composites, ©2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://enhancedcomposites.com.au/shop/aluminium-t-joint-connector-20x20-mm/>
- [6] Sensor database. *PhyPhox* [online]. PhyPhox, ©2022 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://phyphox.org/sensordb/>
- [7] Fusion 360. *Fusion 360* [online]. Adeon CZ s.ro., 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.fusion360.cz/>
- [8] *Matlab* [online]. MathWorks, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [9] Ansys Mechanical. *Ansys* [online]. Ansys, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>
- [10] KARBONOVÁ TRUBKA 20 / 1 MM, 1,8 M. *FireLovers* [online]. DarkAero, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://firelovers.com/cs/karbonove-trubky/206437-karbonova-trubka-20-1-mm-18-m.html>
- [11] SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. *Základy konstruování*. Vydání osmé, přepracované a doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2020. ISBN 978-80-7623-034-7.
- [12] SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Vydání šesté, přepracované a doplněné. Brno: CERM, akademické nakladatelství, 2019. ISBN 978-80-7623-010-1.

- [13] PAGÁČ, Marek. *Učebnice SolidWorks*. 2. vydání. V Brně: Vydavatelství Nová média, [2020]. ISBN 978-80-270-8730-3.
- [14] Filament PA12+CF15. *MATERIALPRO 3D* [online]. MATERIALPRO 3D, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/nylon-filament/nylon-pa12-cf15-cerny-1-75mm-500g-fiberlogy/>
- [15] Přisavky PIAB. *Vakuum Technik* [online]. Vakuum Technik, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.vakuumtechnik.cz/prisavky/>
- [16] *SCHUNK Grippers*. 3rd ed. Mengen, 2020.
- [17] Silonová tyč. *PRO-DOMA* [online]. PRO-DOMA, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.pro-doma.cz/eshop-silon-tyc-20-mm-bily-pa6-detail-1051>
- [18] Mechanical Properties of Carbon Fibre. *Performance Composites Ltd.* [online]. Performance Composites, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp
- [19] Friction Coefficients. *The Engineering ToolBox* [online]. The Engineering ToolBox, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html

Seznam symbolů

m_k	[g]	Hmotnost
σ	[MPa]	Normálové napětí
u	[mm]	Maximální průhyb konstrukce
$a_{x,max}$	[ms ⁻²]	Zrychlení robota Scara LS6 v ose X
$a_{y,max}$	[ms ⁻²]	Zrychlení robota Scara LS6 v ose Y
a_{max}	[ms ⁻²]	Zrychlení robota Scara LS6 v rovině XY
m_i	[g]	Hmotnosti prvků konstrukce
m	[kg]	Maximální nosnost robota Scara LS10
k_d	[-]	Dynamický koeficient
$a_{z,max}$	[ms ⁻²]	Zrychlení robota Scara LS6 v rovině XY
g	[ms ⁻²]	Tíhové zrychlení
$F_{xy,max}$	[N]	Maximální dynamická síla v rovině XY
$F_{z,max}$	[N]	Maximální dynamická síla v ose Z
d	[m]	Průměr šroubu
K	[-]	Konstanta úpravy povrchu a stavu šroubu
k	[-]	Koeficient bezpečnosti
F_i	[N]	Předpětí šroubového spoje
M	[Nm]	Utahovací moment šroubového spoje
F_t	[N]	Třecí síla v mezi karbonovým profilem a silovým spojem
i	[-]	Počet šroubů
M_s	[Nm]	Utahovací moment šroubového spoje ve středovém unašeči
M_o	[Nm]	Utahovací moment šroubového spoje v obvodovém spoji

Seznam zkratk

ASA	Acrylic Styrene Acrylonitrile
CAD	Computer-aided design
CNC	Computer numerical control
FDM	Fused deposition modeling
FEM	Finite element method
MKP	Metoda konečných prvků
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol
SW	Software
VUT	Vysoké učení technické

Seznam obrázků

Obrázek 1:1 Robot Epson Scara LS6-B	8
Obrázek 3:1 Konstrukce z hliníkových profilů Minitec	10
Obrázek 3:2 Nosná deska vakuových efektorů.....	10
Obrázek 3:3 Využití 3D tisku	11
Obrázek 3:4 Konstrukce z karbonových trubek od firmy Tetrafix [1]	11
Obrázek 3:5 Spojka DragonPlate [3]	12
Obrázek 3:6 Příklad silového třecího spoje [4]	12
Obrázek 3:7 Hobby spojka [5].....	12
Obrázek 4:1 Výtisk držáku mobilního telefonu.....	13
Obrázek 4:2 Graf závislosti akcelerace robota na čase.....	14
Obrázek 5:1 Okrajové podmínky pro výpočet.....	15
Obrázek 5:2 a) průhyb [mm], b) normálové napětí [MPa] u obdélníkové konstrukce...	16
Obrázek 5:3 a) průhyb [mm], b) normálové napětí [MPa] u zavětrované obdélníkové konstrukce	16
Obrázek 5:4 a) průhyb [mm], b) normálové napětí [MPa] u rovinné konstrukce	17
Obrázek 5:5 a) průhyb [mm], b) normálové napětí [MPa] u hexagonální konstrukce ...	18
Obrázek 5:6 a) průhyb [mm], b) normálové napětí [MPa] u zavětrované hexagonální konstrukce	18
Obrázek 5:7 3D model testovacího silového spoje z jednoho kusu pro zkoušku tahem	20
Obrázek 5:8 Připravené pomůcky pro zkoušku tahem	20
Obrázek 5:9 prasklý šroubový spoj	21
Obrázek 5:10 Finální sestava užitá pro provedení zkoušky tahem.....	21
Obrázek 5:11 Závislost axiální síly na typu spoje u tahové zkoušky	22
Obrázek 5:12 Obvodový spoj	23
Obrázek 5:13 Prototyp obvodového spoje.....	23
Obrázek 5:14 Řez středovým unašečem [7]	24
Obrázek 5:15 Středový unašeč	24
Obrázek 5:16 Typy testovaných kolíků	25
Obrázek 5:17 Deformace kolíku.....	25
Obrázek 5:18 Kompletní model sestavy	26
Obrázek 5:19 Okrajové podmínky pro výpočet.....	27
Obrázek 5:20 Zátěž od dynamické síly ve vertikální ose (průhyb [mm])	28
Obrázek 5:21 Zátěž od dynamické síly ve vertikální ose (normálové napětí [MPa])	28
Obrázek 5:22 Zátěž od dynamické síly v horizontálním směru (průhyb [mm])	29
Obrázek 5:23 Zátěž od dynamické síly v horizontálním směru (normálové napětí [MPa])	29
Obrázek 6:1 Sestavená konstrukce	31
Obrázek 7:1 Hliníková konstrukce Minitec	32

Seznam tabulek

Tabulka 4:1 Zrychlení robota Scara.....	14
Tabulka 5:1 Porovnání pevnosti	19
Tabulka 5:2 Porovnání univerzálnosti	19
Tabulka 5:3 Srovnání testovaných spojů	22
Tabulka 5:4 Srovnání testovaných obvodových spojů	23
Tabulka 5:5 Testované parametry kolíků	25
Tabulka 5:6 Hmotnosti prvků konstrukce	26
Tabulka 7:1 Srovnání parametrů obou konstrukcí	32

Seznam příloh

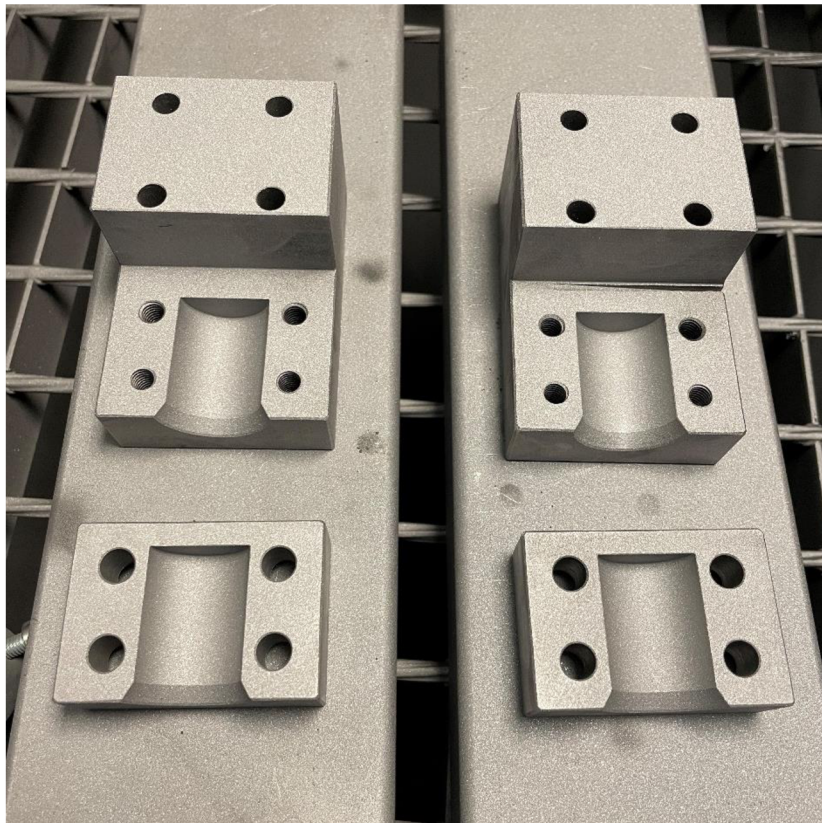
Elektronické přílohy

- Výkresová dokumentace
- CAD modely pro 3D tisk
- Fotodokumentace

Fotodokumentace



(1) Test provozního zatížení robota



(2) Pískovaný unašeč trubky



(3) Prototyp středového unašeče



(4) Spojovací prvek konstrukce Minitec



(5) Vtloukání silonových kolíku [17]



(6) Detail obvodového spoje