



## **Středoškolská technika 2023**

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT**

# **EXOSKELET**

**Jiří Jambor**

VOŠ a SPŠ Žďár nad Sázavou  
Studentská 1, Žďár nad Sázavou



## Studentský projekt:

### ANOTACE

V mé práci se zaměřuji na obecné, ale i konkrétní obory ve kterých lze používat exoskelety pro usnadnění manipulace s těžkými předměty nebo pro použití exoskeletu k rehabilitacím pacientů. Konkrétní body této práce jsou navržení konkrétního exoskeletu pro průmyslové odvětví s levnější a dostupnější použití v širokém odvětví.

**Klíčová slova:** Exoskelet; kostra; efektivita; spolehlivost;

### ANNOTATION

In my project I focus at exoskeletons. How can we use it and where we use this kind of machine. Exoskeleton can be use for lifting heavy items or for rehabilitation of patients. My project is focus on propose exoskeleton which will be used in industry or other many sectors.

**Keywords:** Exoskeleton; Skeleton; efficiency; reliability;



## OBSAH

1	ÚVOD PRÁCE .....	4
2	Co jsou exoskelety a k čemu jsou určeny.....	5
2.1	První použití .....	6
2.2	Druhy exoskeletů.....	8
2.3	Použití v praxi .....	10
3	NÁVRH A KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ .....	12
3.1	Vlastní řešení exoskeletu.....	12
3.2	Volba konstrukce exoskelet .....	13
3.3	Prvotní vizuální návrh exoskeletu .....	15
3.4	Finální 3D vizualizace exoskeletu.....	16
3.5	Řešení problematiky konkrétních částí .....	19
3.6	Výpočty vybraných součástí .....	24
3.7	Zhotovení modelu exoskeletu a jeho částí .....	27
3.8	Porovnání exoskeletu s konkurencí.....	29
3.9	Budoucí úpravy a další možno vylepšení.....	31
4	Použití exoskeletů od rehabilitace pro pacienty až po armádní účely.....	31
5	ZÁVĚR.....	33
	Seznam použité literatury.....	34
	Seznam obrázků .....	35



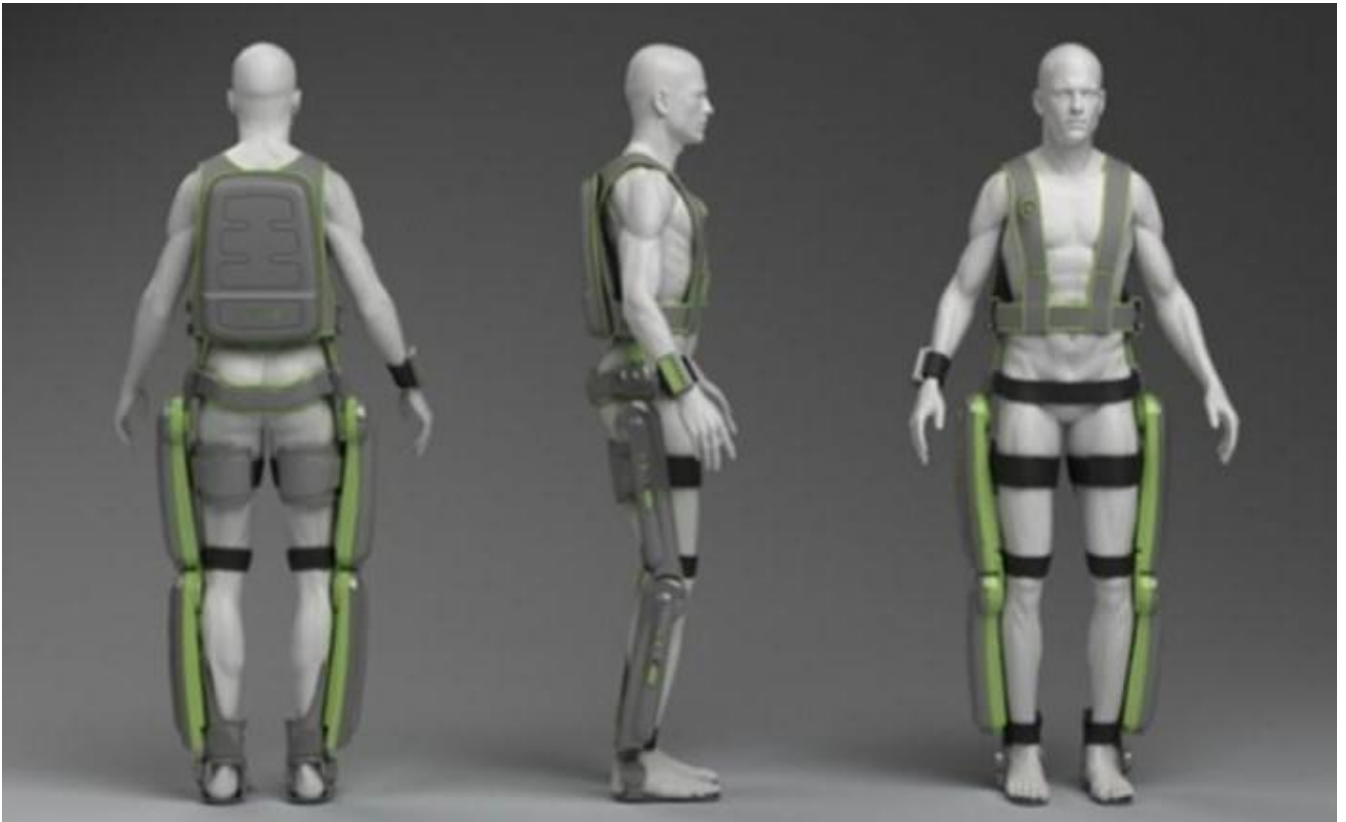
## 1 ÚVOD PRÁCE

Navrhl jsem exoskelet pro průmyslovou montáž, který bude sloužit pro obsluhu montáže nebo při výrobě, k menší fyzické námaze při jejich denní práci. Je určen pro snadnou a rychlou manipulaci s nástroji, které jsou upnuty v prstenci hybného ramena. Při poškození součásti lze všechny jednotlivé části snadno vyměnit bez odborného servisu. Přínos tohoto zařízení je zvýšit efektivnost výroby, spokojenost a bezpečnost obsluhy montáží nebo ve výrobních závodech.



## 2 Co jsou exoskelety a k čemu jsou určeny

Jsou to konstrukce, díky nimž můžeme posílit naše svaly nebo sílu zatěžující naše tělo, přenést na opěrnou konstrukci. Exoskelet (tzv. vnější kostra) je řízena člověkem na kterém je celé zařízení osazeno. Pro pohon exoskeletů můžeme vybírat z několika pohonných medií, takže jejich variabilita je široká.



*Obrázek 1: Příklad jednoduchého exoskeletu*



## 2.1 První použití

- Vývoj těchto konstrukcí započal v druhé polovině 20. století, a to konkrétně v roce 1960 kdy začali na americké půdě ve společnosti GE (General Electric) vznikat první mechanizované roboty, kteří měly napodobovat lidské pohyby jako například chůze a nebo zvedání předmětů rukou.
- S nástupem 21. století vznikl první produkčně vyráběný exoskelet, který sloužil jako pomocník při rehabilitaci pacientů v nemocnici. Tento produkčně vyráběný koncept s názvem Lokmat, který vyšel v roce 2001 v roce 2013 firma Ge oznámila že vyrobila a prodala 500 těchto velkých rehabilitačních přístrojů pro velké nemocniční úseky. S nástupem úspěchu tohoto exoskeletonu se začala velká výzkumná střediska zabírat a vymýšlet různé koncepty a prototypů pro armádu, aby vojákům na bojišti zvyšovaly sílu respektive možnost nošení těžší výstroje jako například zbraně, batohy apod. Příkladem jsou toho exoskelety s názvem Raytheon XOS a další jeho nástupce, který byl navržen aby dokázal unést velké batohy popř. výbavu vojáka “Human Universal LoadCarrier” (HULC).



Obrázek 2: První používaný exoskelet



Obrázek 3: Exoskelety v armádě pro nabití houfnic



- S nástupem roku 2010 se začalo zaměřovat na asistenční exoskelety, které měli pomoci vozíčkářům zbavit se vozíčku a pohybovat se opět na nohách s pomocí těchto přístrojů jako například Rewalkdevice nebo Indegoexoskeleton v roce 2016 firma **Revalk** oznámila, že 100 těchto exoskeletů už používají lidé, kteří byli odkázáni na invalidní vozík.
- S nástupem roku 2014 až 2016 se firmy, které konstruovaly exoskelety, zaměřovaly spíše na funkčnost a minimalizaci součástí díky kterým exoskelet fungoval tak jak měl. S menší vahou a relativně stejnou funkčností se stal populární exosuit. Tento koncept byl primárně vytvořený z textilie a může být nošeno jako oblečení s ocelovou výztuží. Tento návrh, na kterém začali pracovat vědci z celého světa a také technologičtí experti z Oxfordské university, kteří chtějí vytvořit exosuit pro široké odvětví do roku 2018.
- Rok 2016 byl převratný, protože lidé se začali více zajímat o toto odvětví a nemalé se to projevilo na prodeji exoskeletů a exosuitů. Lidé se chtěli více dozvědět o robotice, informatice a společně s tím i v odvětví exoskeletů. V tomto roce se pořádala také propagační akce na rozvoji exoskeletů pro lidi odkázané vozíku popřípadě s jinými zdravotními problémy. Sportovní utkání pro fyzicky postižené lid, kteří s použitím exoskeletů a bionických končetin dokázali nastavit sportovní příčky podobné jako u zdravého jedince.



*Obrázek 4: Exoskelety pro podporu chůze ochrnutých lidí*





## 2.2 Druhy exoskeletů

- Rozdělení je podle funkčnosti zařízení, které se liší způsobem pohanění součástí a to:
  - Elektricky
  - Hydraulicky
  - Pneumaticky
  - Pružinami
- Další rozdělení může nastat dle funkčnosti a to je:
  - posílení
  - podpůrné
  - pomocné
  - kombinace
- Druhy posilovacích a asistenčních zařízení:  
Exoskeleton: Většinou je nevětší a také toho nejvíce zvládne utáhnout. S jeho pomocí lze zvedat těžká břemena do několika stovek kilogramů. je velmi robustní. V jeho konstrukci se nacházejí větší součásti jako písty a samotný pohon.



Obrázek 5: Kombinovaný exoskelet s rukou Zero G-arm

Exosuit: Připomínají část oblečení a jsou velmi nenápadné. Nedokáží sice snášet větší zatížení, ale jako asistent v pohybu nebo podpora vyšší výkonnosti při různých aktivitách je velmi dobrá volba. Méně ocelových částí spíše textilní materiály.





**Bionic:** Z větší části jsou zhotoveny z elektroniky a čidel. Používají se pro umělé protézy rukou nebo nohou. Jsou zapotřebí tam kde je nutno citlivá manipulace jako jsou pohyby rukou. Dokáží spíše být asistenční prvek než ten, který by přenášel velké zatížení.

**Kombinace:** Spojíme-li, všechny klady předcházejících zařízení dostaneme exoskelet, který dokáže přenášet velké zatížení a společně s tím je velmi citlivý pro pohyb. Jedna z jeho velkých nevýhod je že tyto zařízení jsou většinou velmi drahé nebo jsou teprve nasazeny k testování ve výzkumných střediskách.



Obrázek 7: Exosuit používaný na staveništi pro podporu rukou

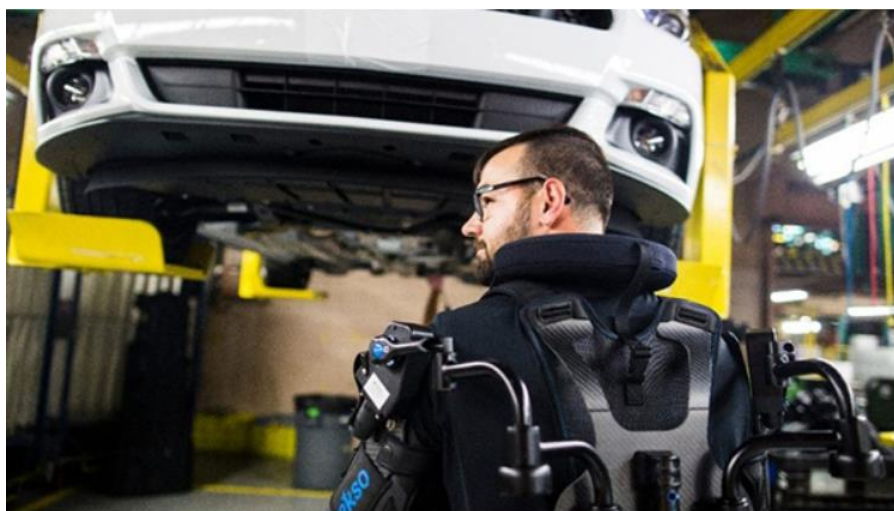


Obrázek 6: Vývoj bionické končetin pro jejich používání nejen pro lidi bez končetin



## 2.3 Použití v praxi

- Dnešní využití exoskeletů ve zdravotnictví i v armádě  
Dnešní používání exoskeletů a jeho výzkumy, které se snaží minimalizovat některé pohonné části, a hlavně se dostat do větší škály působnosti. Rozvíjí se také mezi mladými lidmi zájem o tyto přístroje (*jako je například má maturitní práce*). Lidé staví a zdokonalují své vlastní exoskelety které používají pro své osobní zájmy jako je například zvedání těžkých věcí nebo přenášet zátěž na konstrukci. Role působnosti těchto zařízení se za poslední léta prohloubila do spoustu odvětví to například do zdravotního průmyslu, kde pomáhají lidem s rehabilitacemi pomocí podpůrné konstrukce nebo osobních asistentů pro starší lidi, kteří se za pomocí nich dokáží pohybovat lépe a rychleji a také mají menší zatížení pro klouby. Další ze zdravotnického odvětví je jsou takzvané bionicle arms. Jsou to přístroje zaměřující se spíše na elektronické a přesné měření pohybu reálných končetin, a tedy jejich pokus napodobit tento pohyb za pomocí senzoru které snímají reakce a pohyb svalů, a tedy bionická končetina zjistí o jaký pohyb se jedná a následně podle výpočtů provede jeho pohyb tak přesný, jak jen jde. Další a poměrně užitečným odvětvím je průmysl, a to jako efektivita výroby nebo usnadnění zaměstnancům při časté fyzické námahy z práce. Jako příklad bych zde uvedl Ford, který do své firmy zavedl 15 nových exoskeletů díky nimž mohou zaměstnanci i po 8 hodinové pracovní době mít dostatek energie, když přichází z práce. Ford také oznámil, že díky exoskeletům se zvýšila spokojenost zaměstnanců, které tyto exoskelety používají. Vojenské prostředky, které jsou s exoskelety taky spjaty se tu také nemohou ztratit. Hlavní využití je tedy přímo pro operující vojáky jako podpora nohou díky kterým mohou nosit daleko více výstroje jak ochranné, tak i zbraně nebo batohy. Další z mnoha použití je pro dělostřelectvo, kde střely dosahují několik desítek kil. Většinou tyto nábojnice musí při nabíjení nosit dva až tři muži nebo za pomoci pomalého hydraulického zvedáku přímo zabudovaný na houfnici. Pomocí exoskeletu může jeden voják přebít celé dělo, a to za zlomek sekund jak hydraulický zvedák na houfnici.



Obrázek 8: Exosuit používaný na linkách automobilky Ford



Využití těchto pohyblivých konstrukcí můžeme vidět v praxi málo, protože většina těchto projektů je v rané fázi vývoje.

- V dnešní době se prototypy těchto strojních zařízení používá převážně ve zdravotnictví.  
jsou u pacientů, kteří nemohou chodit, popřípadě mají trvalé následky a snaží se o preventivní rehabilitaci pohyblivého aparátu, horní části těla jako jsou ruce nebo záda.
- Tento výrobek je určen pro širší odvětví. Díky své kompatibilitě může být použit v různých odvětvích průmyslu používán pro dělníky k usnadnění prací. V lékařství ke zlepšení života lidem s horší pohyblivostí. A je mnoho dalších možností použití exoskeletu.
- Moje práce je taková vytvořit základ, který se bude za pomoci dalších takzvaných modulů moci rozšiřovat. Díky tomuto bude moci být použit v konkrétním prostředí nebo pro konkrétní úkony. Z tohoto hlediska volím úkony, které se týkají Strojírenství a výroby ve strojírenství. Zlepšení a větší efektivita na pracovišti za pomoci použití exoskeletů, který bude moci dělník používat na různé montážní úkony, nebo například na místa kde by se musela použít větší a dražší technika pro usnadnění přístupu pracovníka s těžkými nástroji. Zde by stačil pouze lehká nosná konstrukce připnutá na tělo dělníka, který by za pomoci manipulačního ramena připojené ke konstrukci tedy exoskeletu se může jednoduše a daleko efektivněji dostat na ono těžce dostupné místo a zde provést onu operaci. Zde bych uvedl příklad, který je spjatý s demontáží zařízení s velkou stavební výškou. Za pomoci exoskeletu si upne nástroj na rameno a namísto velkých podpůrných konstrukcí jak pro nástroj, tak i pro samotného člověka si člověk vykonávající tuto činnost postačí se sebou samotným a exoskeletem.



Obrázek 9: Používání exoskeletu k rehabilitacím pacientů





## 3 NÁVRH A KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ

### 3.1 Vlastní řešení exoskeletu

Při navrhování exoskeletu jsem se inspiroval již existujícími konstrukcemi, které jsou ještě teprve ve vývojových fázích, anebo méně dostupné pro veřejnost. Po dlouhém studování a následnou konzultací většiny prvků exoskeletu jsou si vybral ze všech prototypů exoskeletů ty věci, které jsou u konkrétního modelu výhodou. Následné prvky jsem se pokusil skloubit do sebe a vytvořit tak samostatný exoskelet se všemi různými výhodami daných prototypů. Hlavním hlediskem mého exoskeletu je pohyblivost, které pro značnou manipulaci musí být přirozená s lidským tělem. To znamená natáčení nohou v malém úhlu nebo flexibilnější podrážky přídržné podstavy nohou. Jako další bod jsem si určil cenovou dostupnost celého výrobku, která by měla být menší než u komerčně prodávaných konstrukcí a k tomu se přidává další bod, a to celková výměna všech prvků na konstrukci. Možnost vyměnit si díly a nemuset tak řešit profesionální servis u odporně znalé osoby. Schopnost nechat celý exoskelet dal rozvíjet a zlepšovat samotnými zákazníky, a to výměna dílů podle libosti nebo montáže dalších pomocných zařízení, které nejsou předem dané konstrukčně. Konstrukce by měla zvládat lehké i střední práce jako například upevňování nástrojů do nástrojového prstence. Ze kterými obsluha může dále manipulovat po delší časový interval, aniž by došlo k velkému unavení paže při držení nástroje. Dále tu jsou věci ohledně upevňování exoskeletu na člověka, které by mělo být nastavitelné upínání pásků pro lepší pohodlí obsluhy. Jako konečnou úlohu jsem zvolil že celý exoskelet bude možno použít i v dalších odvětvích, a to nejen v průmyslu a možnosti dalšího vylepšování.



Obrázek 10: Exosuit používaný v automobilce Ford



### 3.2 Volba konstrukce exoskelet

Volba konstrukce exoskeletu vycházela převážně z funkčního prototypu exoskeletu s manipulátorem Zero G-arm.

Uchycení nohou jsem volil pomocí stahovatelných pásků, které lze snadno měnit podle velikosti nohou daného člověka. Spodní část nohy jsem vymyslel z více prvků, a to základní pevná část, kterou je pata a následné ohebnou částí nohy která tvoří přední část nohy. Pružící prvky, kterými jsou planžety a plní také funkci která vrací pružnou část zpátky do prvotní polohy tedy klidové a pomoci tak k lepšímu pohybu exoskeletu.

Návrh podpůrné konstrukce jsem volil z jednoduchých dvou tyčí, díky kterým je lepší nahraditelnost součástí při jejich poškození a lepší nosnou vlastností. Další schopnost, kterou mohou dvě nosné tyče splňovat je to, že se na ně díky svěrným spojům dá připevnit další pomocné prvek které by bylo nutno pevně spojit s nosnou konstrukcí, a tedy zmenšovat nosný průřez nosných tyčí. Jako příklad zde lze uvést součást díky které lze spojit exoskelet nosných tyčí s nohou člověka.

S konstrukcí zad a vyvažovacího mechanismu jsem volil proto aby bylo možné zvedat či mít delší rameno uchycovače nástroje a to proto, aby se celý exoskelet společně s člověkem nepřevrátil. Závaží je usazeno kluzně na pevném hřídeli. Se Závažím lze pohybovat dozadu tím pádem lze měnit jeho těžiště.



Obrázek 11: Funkční exoskelet používaný k průmyslové výrobě



Návrh pohyblivých kloubů a možnosti pohybovat s nimi. Vzhledem k lepší pohyblivosti, než u komerčně prodávaných exoskeletu jsem volil větší flexibilitu celé konstrukce a s tím jeho další konstrukční prvky, které byly nutno použít pro to, aby toto hledisko bylo realizovatelné s dodržением patřičných pevnostních podmínek pro provoz a bezpečnost exoskeletu. U kloubů bylo zapotřebí vymyslet zcela nový způsob pro to, aby se klouby mohli otáčet a o malý uhel naklápět pro lepší ovladatelnost. Vzhledem k patřičným zákonitostem, které je nutno dodržet byl vytvořen přímo pro tento exoskelet konstrukční řešení pro tuto problematiku a je možno jí použít při vylepšování dnešních exoskeletů a jejich problémů s pohyblivostí.

Návrh spočíval ve tvarovém prvku, který byl mezi dvěma součástmi, které se měli pohybovat. Tento prvek zamezoval přetočení kloubu o nebezpečný úhel a nebýt toho tak by při značné zátěži mohlo dojít k přetočení celé nohy tedy oporné konstrukce exoskeletu a mohlo by dojít ke zranění člověka. Jedna ze součástí má tvarový výstupek s omezováním nebezpečného úhlu. Druhá součást má v svém těle jeho protikus, které do sebe zapadají, a tak společně tvoří tvarový prvek zamezující nebezpečnému přetočení. Následně tento tvarový prvek měl splňovat funkci naklápěcí to bylo uskutečněno zaoblením tvarového prvku díky kterému se mohl jeho protikus naklápět po daném rádiusu stěny jednoho z tvarových prvků.

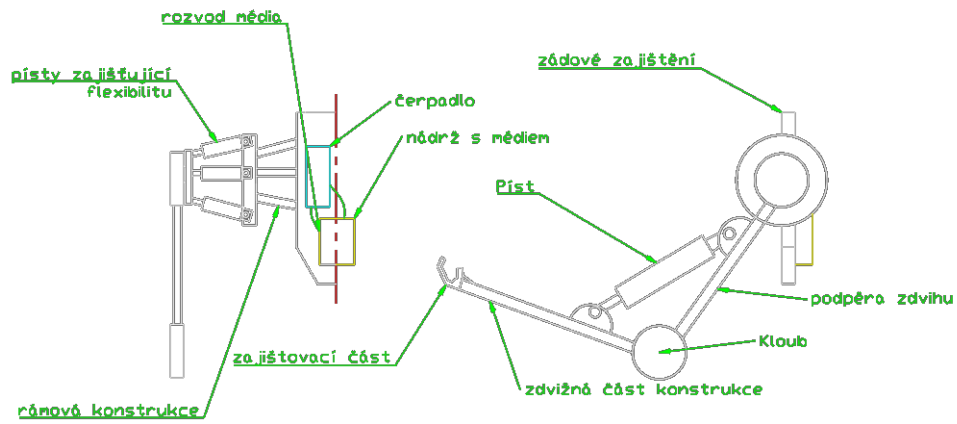


*Obrázek 12: Rehabilitační exoskelet používaný v nemocnicích*

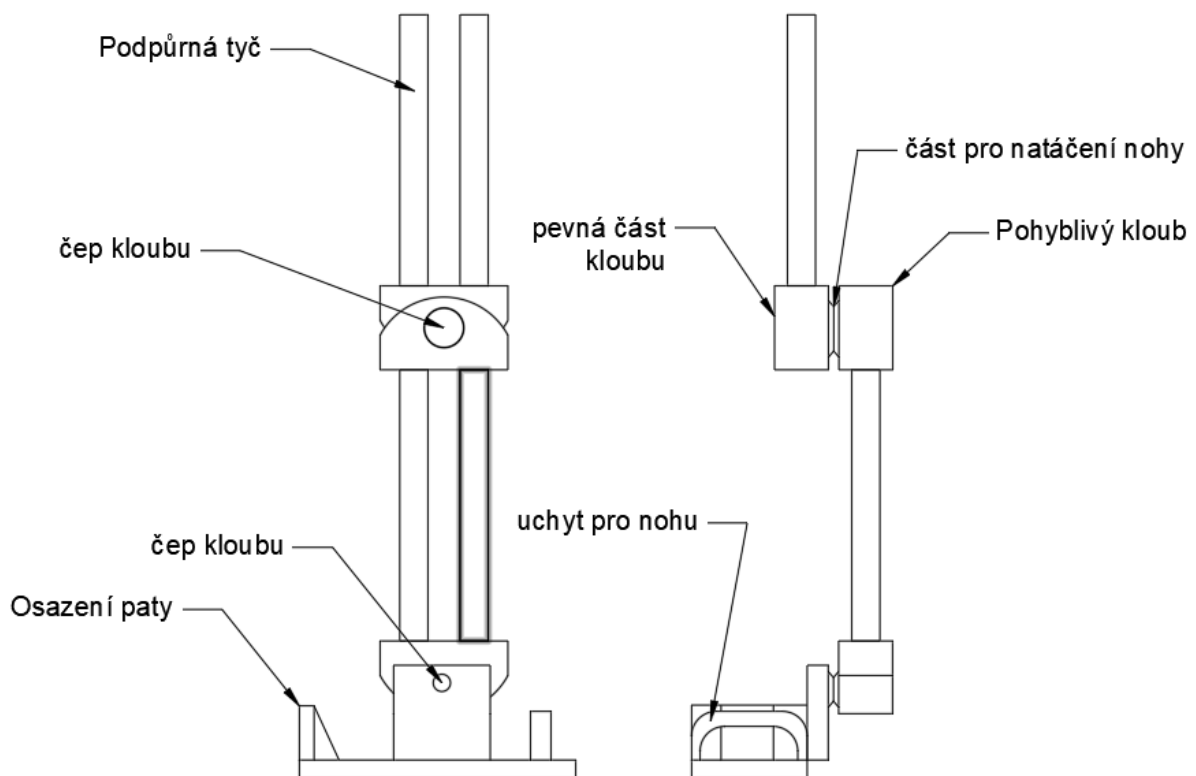


### 3.3 Prvotní vizuální návrh exoskeletu

První vizuální koncepty exoskeletu, i ty které nakonec použity nebyly.



Obrázek 14: První náčrt ruky exoskeletu, který se ale nezhotovil

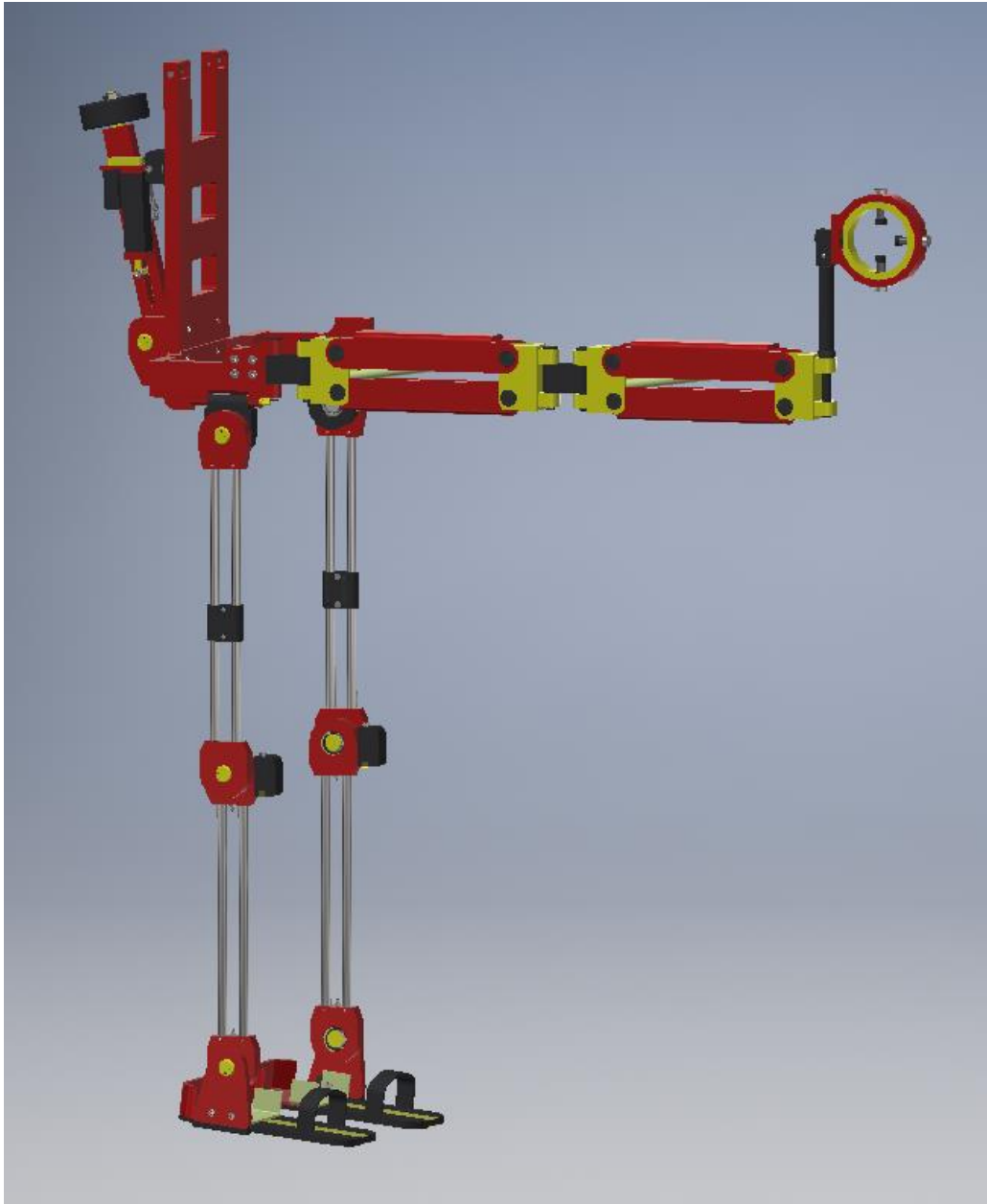


Obrázek 13: První úplný náčrt nohou a první úvaha nad tvarovým prvkem

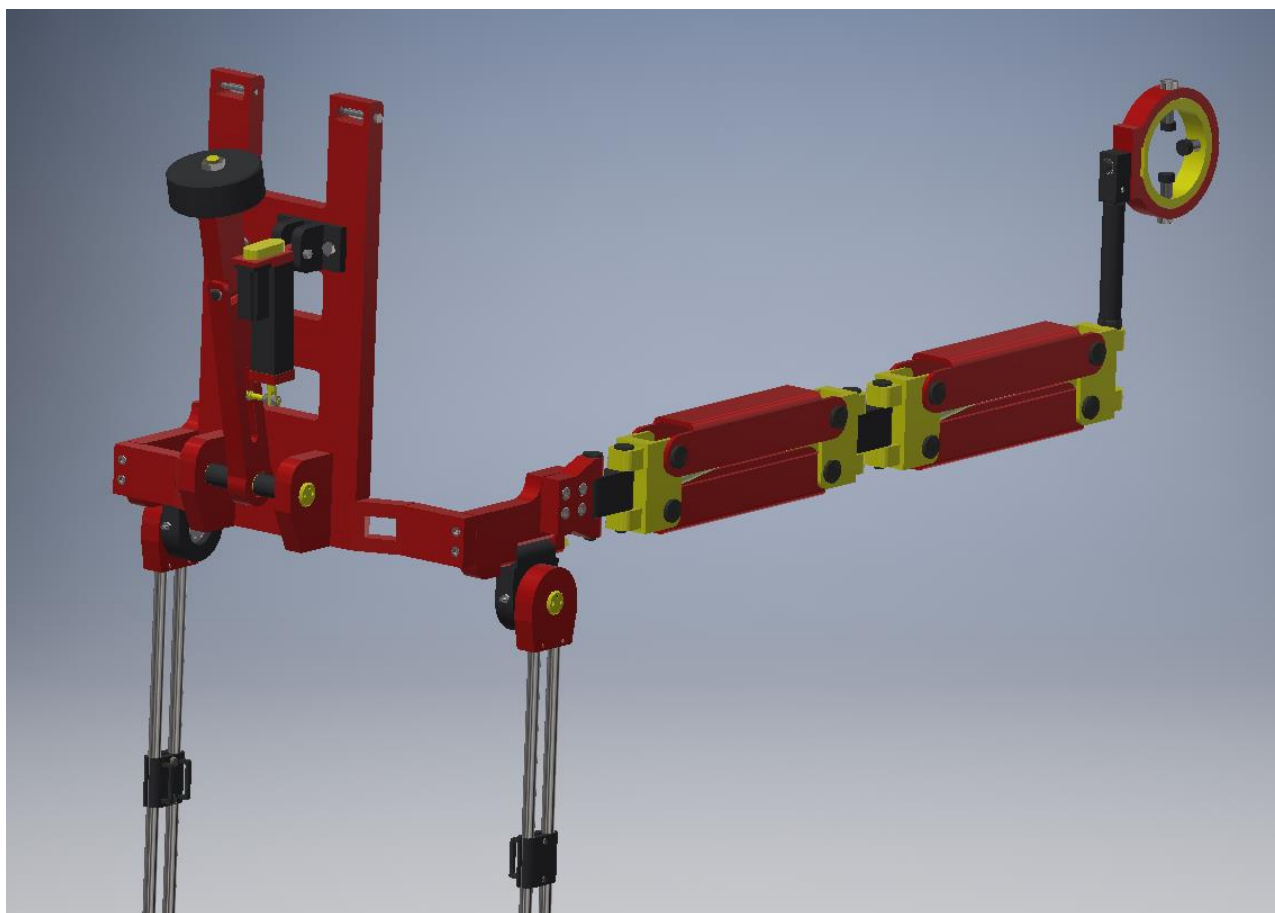


### 3.4 Finální 3D vizualizace exoskeletu

Finální vizualizace exoskeletu konstrukcí nohou, zad a ramene.



Obrázek 15: Bok exoskeletu s pohledem na pracovní rameno



*Obrázek 16: Záda exoskeletu a pohled na závažový systém*

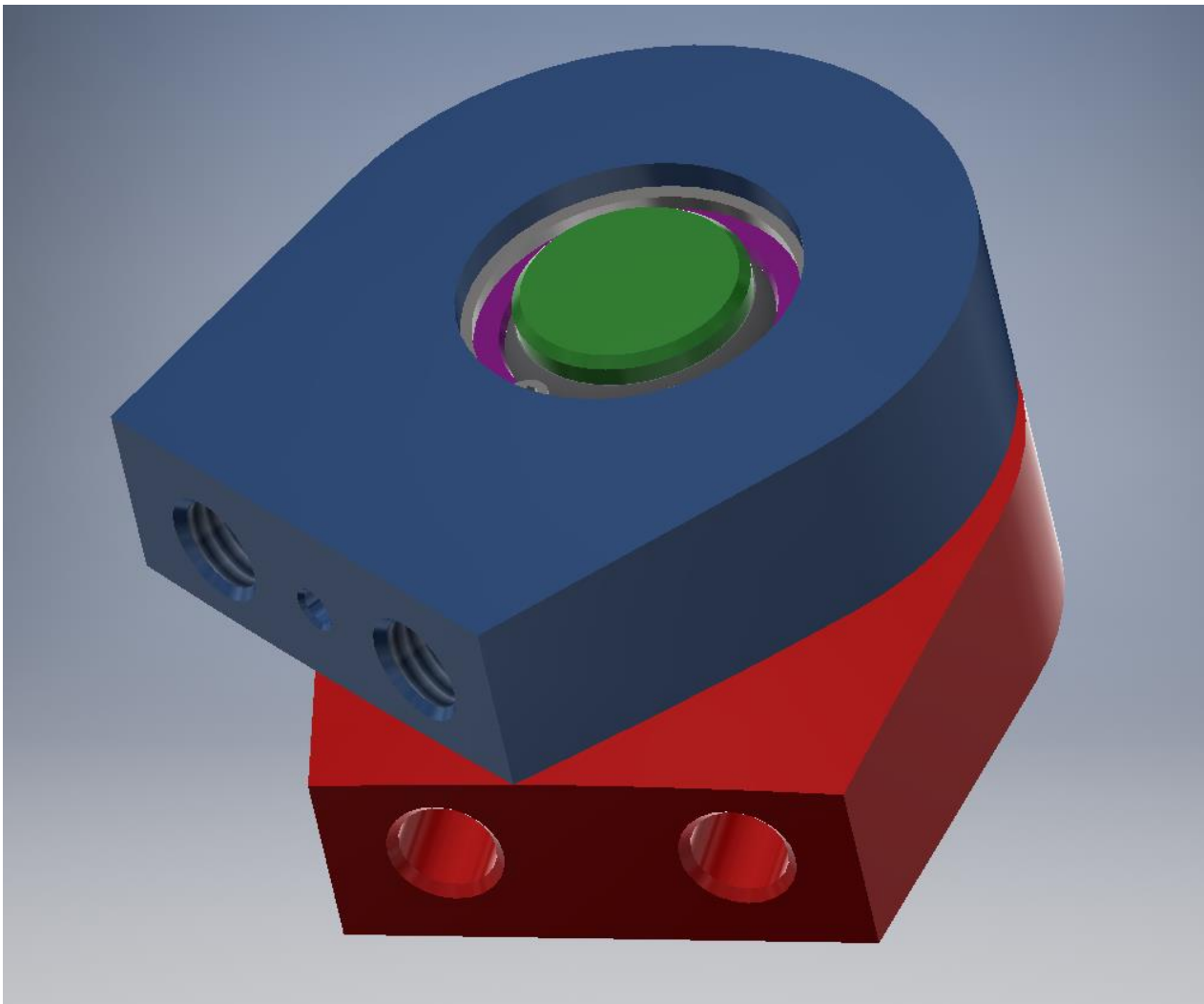


*Obrázek 17: Finální průmyslový exoskelet z přední strany*



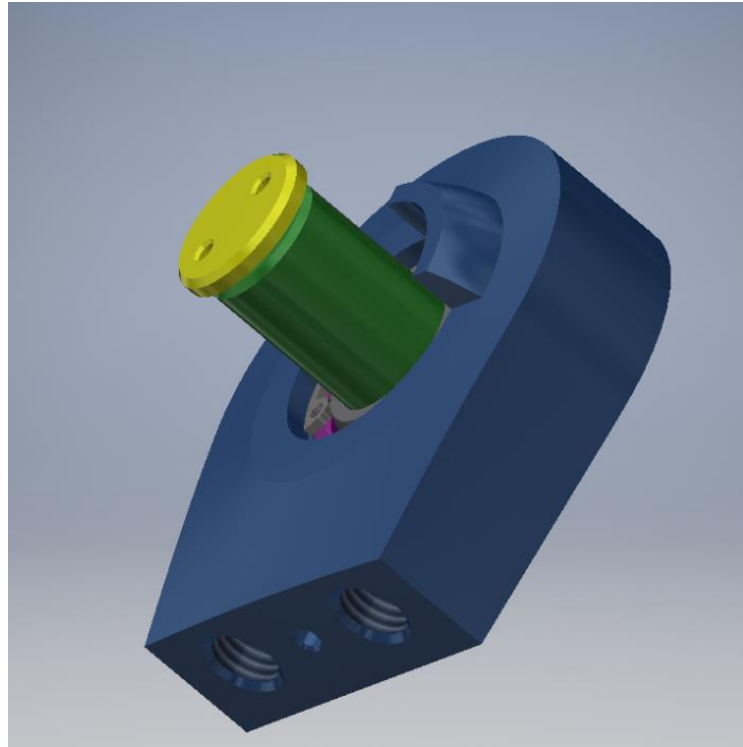
### 3.5 Řešení problematiky konkrétních částí

Řešení problematiky nohou byla jedna z nejvíce problematičtějších částí celého exoskeletu. Největší Problém byl s navrhnutí tvarového prvku, který musí splňovat dobrou pohyblivost končetiny společně s nosnou konstrukcí exoskeletu a mírné naklonění kloubu pro lepší práci s exoskeletem. Bylo zapotřebí vymyslet celkově nový systém kloubu, který se nevyužívá v komerčně prodávaných exoskeletech a je tímto díky použití tohoto řešení jedinečný.

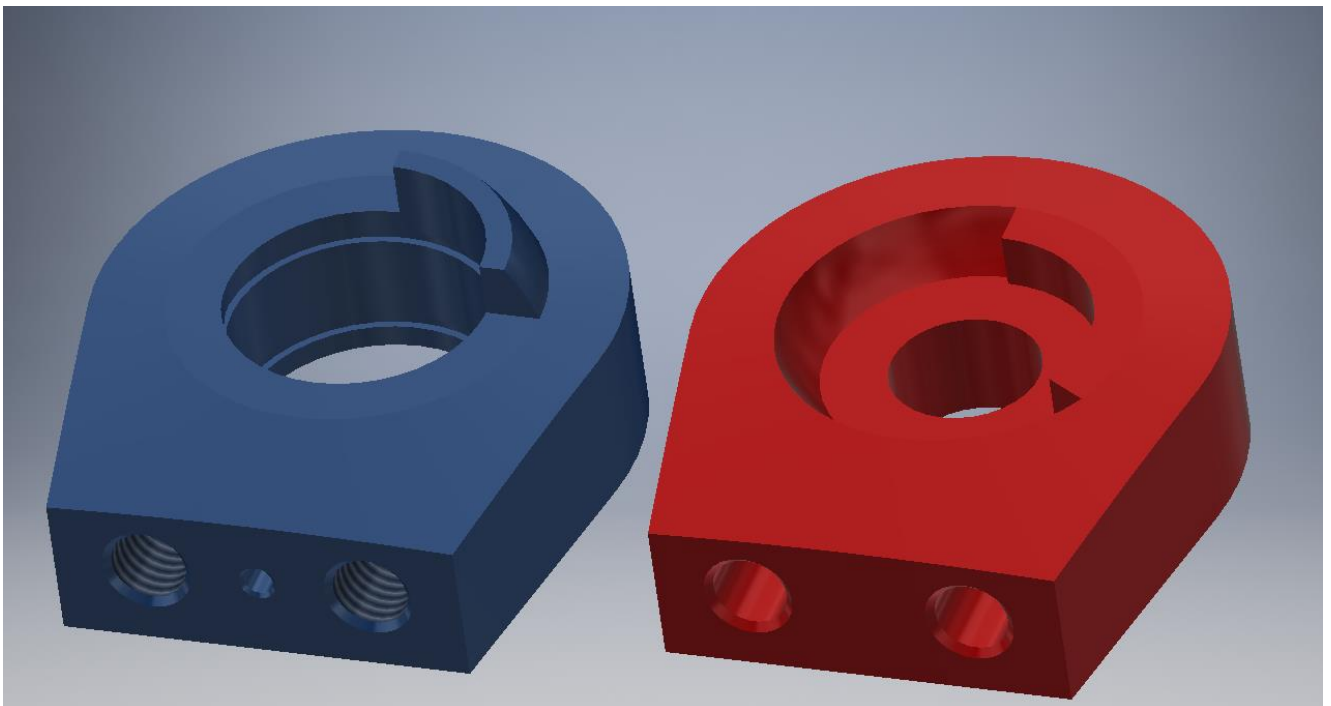


Obrázek 18: Funkční poloha kloubů

Byla zde nutno použít kulovou plochu pro plnou funkci kloubového ložiska, které díky tvarovému prvku a jeho kulové ploše funguje dobře a bezpečně pro obsluhu exoskeletu.



*Obrázek 20: Ukázka tvarového prvku se zaoblením*

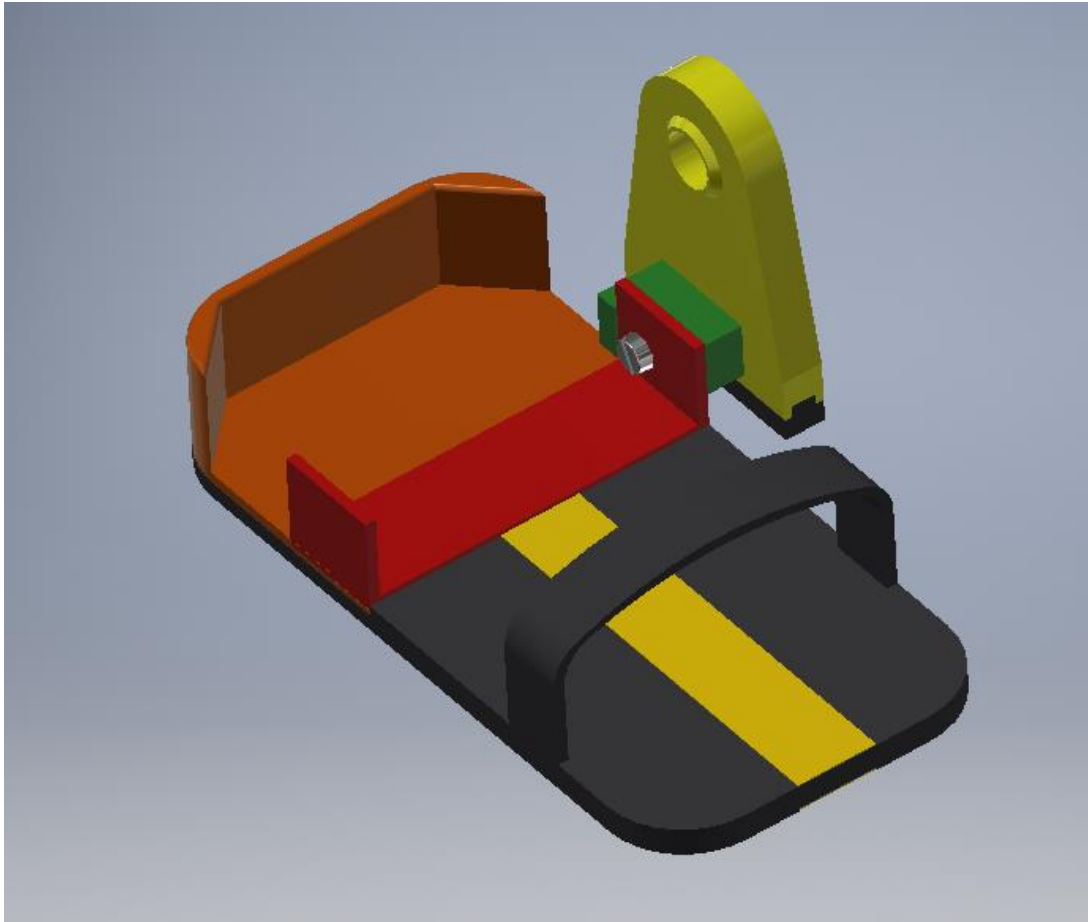


*Obrázek 19: Klouby s tvarovými prvky*





Další součástí, která byla použita pro konstrukci podpůrné soustavy exoskeletu byla konstrukce podrážky, která se skládá z jednoho pevného dílce podrážky, který je spojen s přípojným členem dolní podpůrné konstrukce podstavy. U tohoto konstrukčního řešení bylo nutné použít více druhů materiálu tak aby se dosáhlo spolehlivé funkce podrážky exoskeletu. Samotná podpůrná konstrukce se nachází hned vedle podrážky, ve které se upíná pracovní obuv obsluhy tak aby se mohlo manipulovat s podpůrnou konstrukcí exoskeletu.



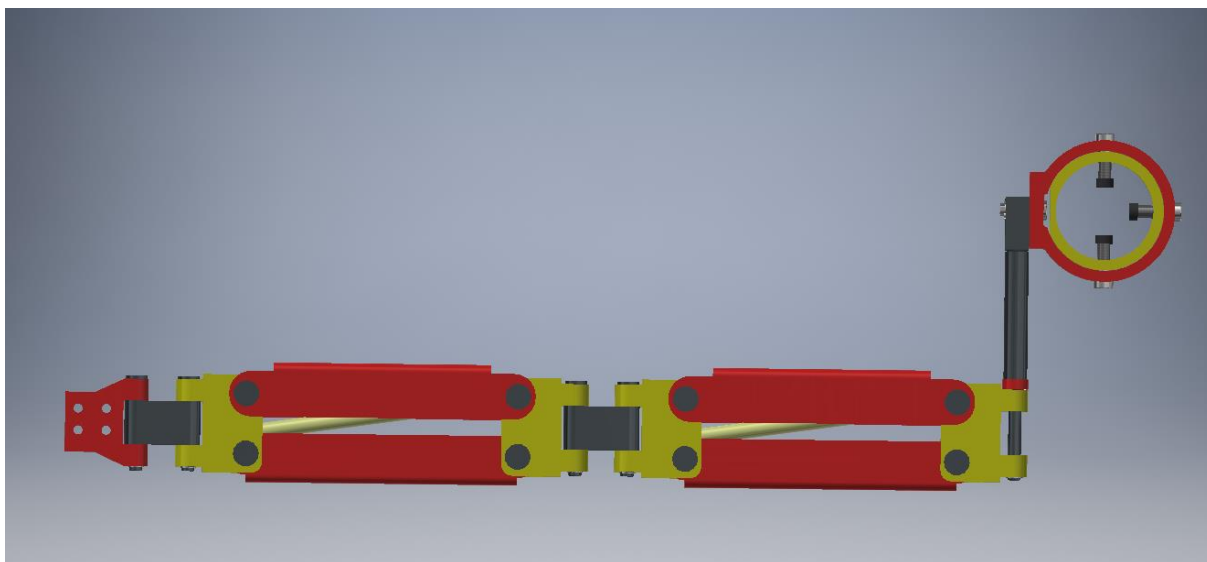
*Obrázek 21: Podstava exoskeletu s nosnou konstrukcí*

Použité materiály zde byly kombinované, a to hlavně kvůli pružnosti podstavy a dodržení přirozené chůze v pracovní obuvi. Hlavní část s nasazovacím řemínkem tvoří pryžová část, která díky své ohebnosti předčí i některé jiné zvolené konstrukce u kterých jsem uvažoval také jejich použití. Tato část takto plní funkci proti skluzu celého exoskeletu na kluzkých podložích jak v budově, tak i ve volném prostoru. Dále jsou zde krátké ploché planžetové pásky, které jsou přilepeny k pryžové části. Pásky zde uskutečňují lepší vracení pryžové části do klidové polohy a také pomáhají obsluze s pohybem končetiny nohy. Jako hlavní část je zde ocelová zadní konstrukce s přidržováním paty pracovní obuvi.

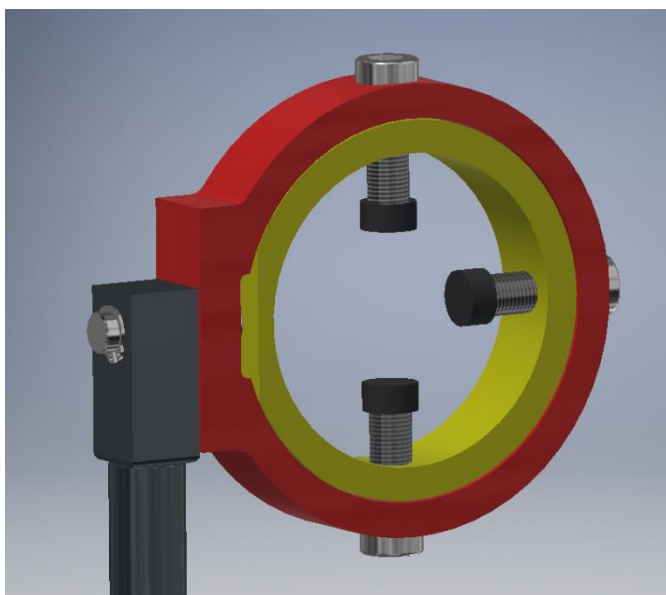


### 3.5 Řešení problematiky pohyblivého ramene

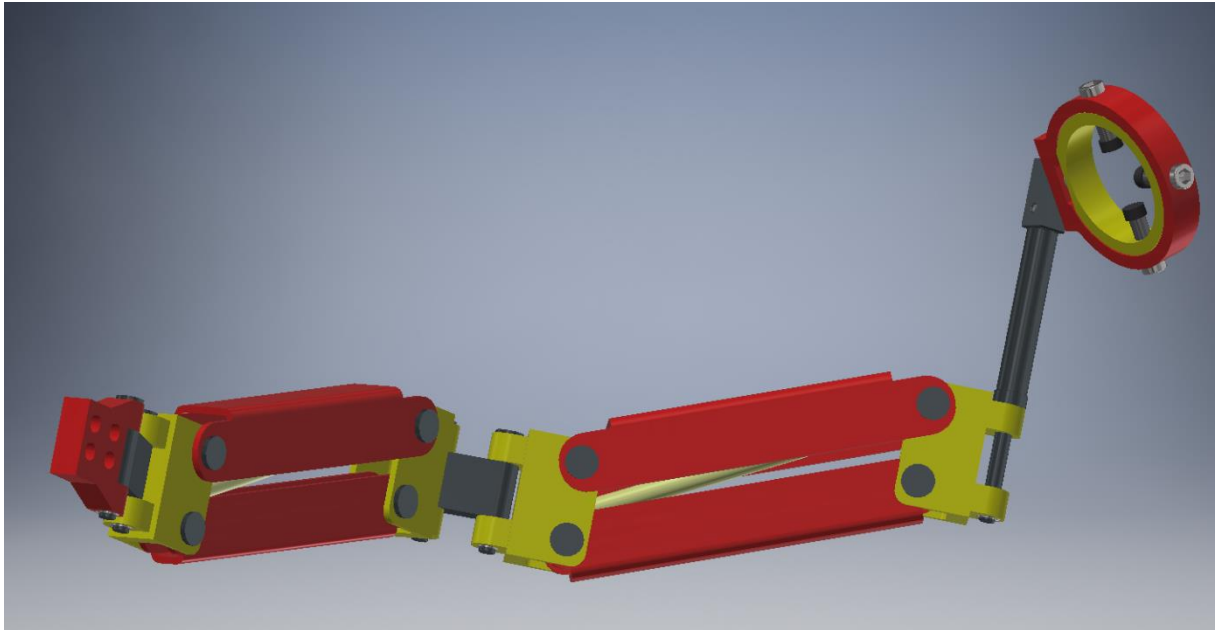
Pracovní rameno, které se mělo pohybovat a zároveň udržet upnutý předmět v upínce držený pořád tam kde ho obsluha exoskeletu nechala tak aby zůstal ve stejné výšce nezávisle na pohybu s exoskeletem a nepadal směrem k zemi díky váze nástroje upnutého v upínce. Tento problém byl vyřešen díky konstrukčnímu řešení použití pístů s tlačnou pružinou, která díky síle od pružiny tlačí druhou část ruky směrem nahoru, a tak dochází k tomu, že nástroj zůstává ve stejné výšce tak, kde ho obsluha zanechala. Nemalou součástí bylo navrhnutí plechové konstrukce ruky a jejího pohybu tak aby neomezovala píst vně a mohlo dojít k montáži a demontáži bez určitých problémů. Dále zde platí tak jako v celém svém exoskeletu, že každá součást může být jednoduše zaměněna, anebo při poškození snadno vyjmuta a nahrazena i bez odborné znalosti či profesionálního náradí.



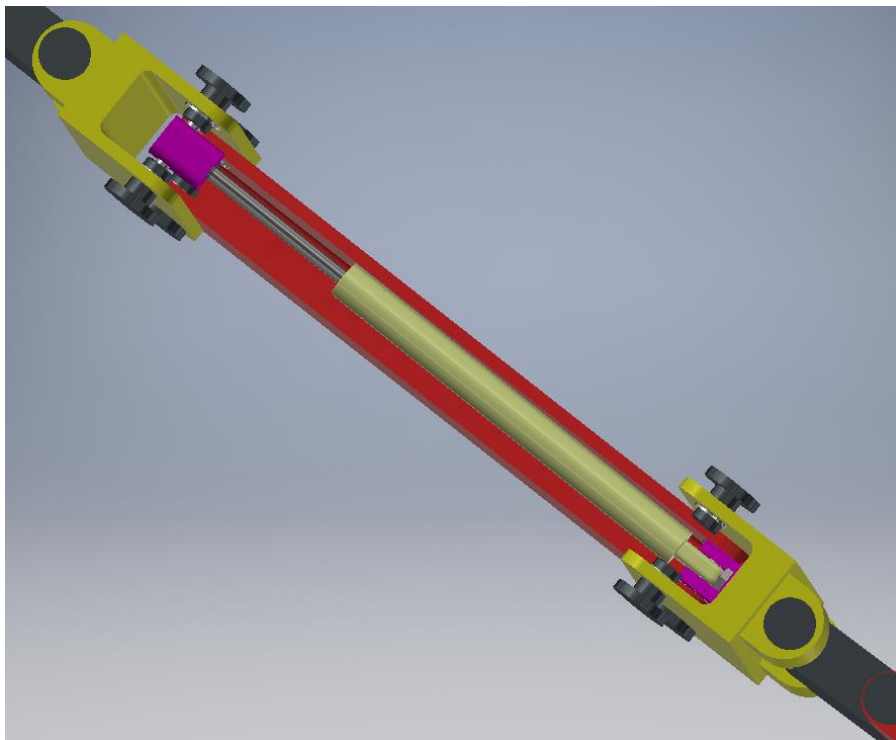
Obrázek 22: Polohovatelné rameno



Obrázek 23: Prstenec pro upínání nástrojů



*Obrázek 24: Rameno s prstencem v pracovní poloze*



*Obrázek 25: Pohled na píst s tlačnou pružinou uvnitř ramene*



### 3.6 Výpočty vybraných součástí

Kontrola podpůrné soustavy na vzpěr:

délka zatěžovaných tyčí:  $L = 377$  mm

průměr tyčí:  $d = 13$  mm

zatěžovaná síla maximální =  $(m_{rameno} + m_{nástroj}) \cdot g = (7 + 10) \cdot 10 = 170$  N

Výpočty:

Tyče:

$d = 13$  mm

délka tyčí od jejich ukotvení: 377 mm

materiál: 12 061

$$\text{vzpěr: } j_{min} = \sqrt{\frac{j_{min}}{S}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot d^4}{64}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}} = \sqrt{\frac{d^2}{16}} = \frac{d}{4} = \frac{13}{4} = 3,25$$

štíhlost pístnice:

$$\lambda = \frac{l_{red}}{2 \cdot j_{min}} = \frac{377}{2 \cdot 3,25} = 58 \quad \lambda_m = 60$$

$$\lambda < \lambda_m$$

$58 < 60$  Vyhovuje.

Kontrola na tlak:

$d = 13$  mm

$F = 170$  N

$$p = \frac{F}{S} \leq p_d$$
$$= \frac{F}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{170}{\frac{\pi \cdot 13^2}{4}} = 1,28 \text{ MPa}$$

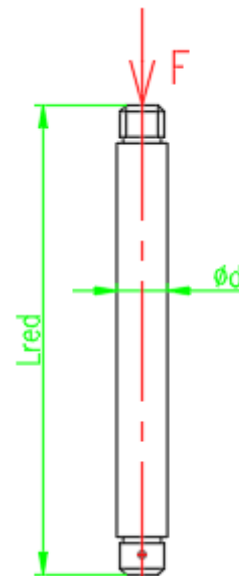
$$p \leq p_d$$

$2,81 < 300$  MPa Vyhovuje.

$K = s$  ohledem na bezpečnost obsluhy volím součinitel bezpečnosti 10.

$$R_m = (570 \div 1\ 130) = 1000 \text{ MPa}$$

$$p_d = 3 \cdot \sigma_t = 3 \cdot \frac{R_m}{k} = 3 \cdot \frac{1000}{10} = 3 \cdot 100 = 300 \text{ MPa}$$



Obrázek 26: Schéma tyče spojující klouby, zatěžované na vzpěr



Kontrola na otláčení čepů kloubu:

$$\begin{aligned}b_1 &= 12 \text{ mm} \\b_2 &= 16 \text{ mm} \\b_3 &= 12 \text{ mm} \\\varnothing d &= 20 \text{ mm}\end{aligned}$$

Dovolené napětí počítané z meze kluzu

materiál: 11 600

$$R_e = 295 \text{ MPa}$$

$$p_D = \frac{R_e}{4} = \frac{295}{4} = 75 \text{ MPa}$$

Dovolené napětí míjivé

$$p_D = 75 \text{ MPa}$$

$$p_{DII} = 0,65 \cdot p_D = 0,65 \cdot 75 = 50 \text{ MPa}$$

Minimální síla působící na čep otláčením

$$m = 45 \text{ Kg}$$

$$g = 10$$

$$F_{min} = m \cdot g$$

$$F_{min} = 45 \cdot 10$$

$$F_{min} = 450 \text{ N}$$

Kontrola na otláčení:  $p_1, p_3'$

$$F_{min} = 450 \text{ N}$$

$$b_{1,3'} = 12 \text{ mm}$$

$$\varnothing d = 20 \text{ mm}$$

$$p_1 = p_3' = \frac{F_{min}}{S_{pl_{1,3'}}} = \frac{F_{min}}{b_{1,3'} \cdot d} = \frac{450}{12 \cdot 20}$$

$$p_1 = p_3' = 1,9 \text{ MPa} < 50 \text{ MPa} \quad \text{Vyhovuje.}$$

Kontrola na otláčení:  $p_2, p_3$

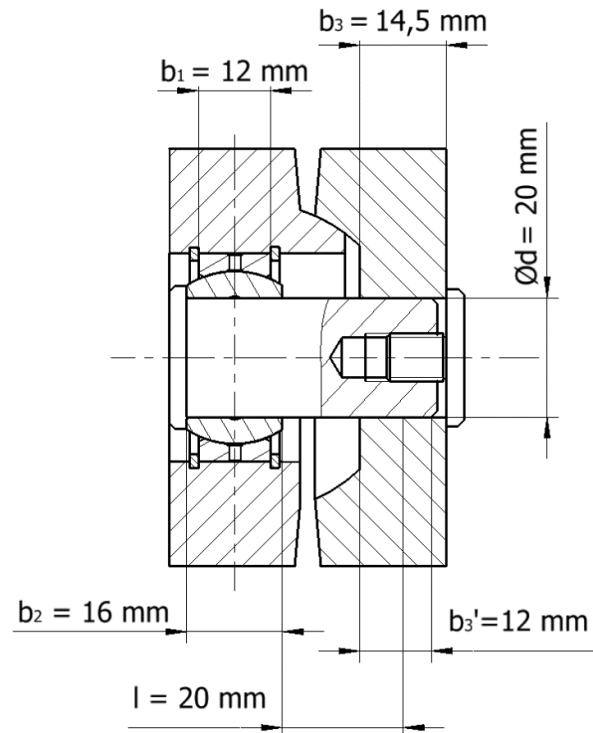
$$F_{min} = 450 \text{ N}$$

$$b_{2,3} = 16 \text{ mm}$$

$$\varnothing d = 20 \text{ mm}$$

$$p_2 = p_3 = \frac{F_{min}}{S_{pl_{2,3}}} = \frac{F_{min}}{b_{2,3} \cdot d} = \frac{450}{16 \cdot 20}$$

$$p_1 = p_3' = 1,4 \text{ MPa} < 50 \text{ MPa} \quad \text{Vyhovuje.}$$



Obrázek 27 Schéma a rozměry pro výpočet namáhání



Dovolené napětí pro smyk:

$$\sigma_{tD} = (150 \div 230) \text{ MPa} \rightarrow 150 \text{ MPa}$$

$$\tau_{sD} = (0,6 \div 0,7) \cdot \sigma_{tD} = 0,65 \cdot 150 = 97,5 \text{ MPa}$$

$$\tau_{sDII} = 0,65 \cdot \tau_{sD} = 0,65 \cdot 97,5 = 63,375 \text{ MPa} \rightarrow 63,4 \text{ MPa}$$

Kontrola na smyk čepů kloubu:

$$F_{min} = 450 \text{ N}$$

$$\varnothing d = 20 \text{ mm}$$

$$\tau_s = \frac{F_{min}}{Spl} \leq \tau_{sDII}$$

$$\tau_s = \frac{F_{min}}{Spl} = \frac{F_{min}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{4 \cdot F_{min}}{\pi \cdot 20^2}$$

$$\tau_s = 1,4 \text{ MPa}$$

$$\tau_s \leq \tau_{sDII}$$

$$1,4 < 63,4 \text{ Vyhovuje.}$$

Kontrola na ohyb čepů kloubu:

$$F_{min} = 450 \text{ N}$$

$$l = 20 \text{ mm}$$

$$\varnothing d = 20 \text{ mm}$$

$$\sigma_{D_{oII}} = (125 \div 180) \text{ MPa} \rightarrow 125 \text{ MPa}$$

Výpočet ohybového momentu

$$M_o = F_{min} \cdot l$$

$$M_o = 450 \cdot 20$$

$$M_o = 9000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Výpočet průřezového modulu

$$W_o = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

$$W_o = \frac{\pi \cdot 20^3}{32}$$

$$W_o = 785,4 \text{ mm}^3$$

Kontrola na ohyb

$$M_o = 9000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$W_o = 785,4 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \leq \sigma_{D_{oII}}$$

$$\frac{9000}{785,4} \leq 125 \text{ MPa}$$

$$11,5 < 125 \text{ MPa Vyhovuje.}$$





### 3.7 Zhotovení modelu exoskeletu a jeho částí

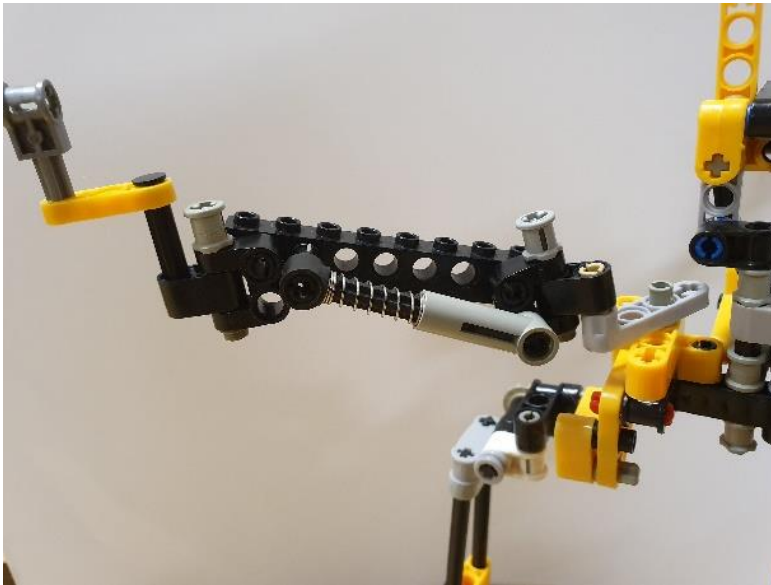
Modely byly vytvořeny za pomoci stavebnice Lego. Všechny části, které dále rozebírám ve své práci jsou snadno viditelné na modelu exoskeletu. Na fotkách je možno vidět konkrétní části exoskeletu.



Obrázek 29: Model exoskeletu

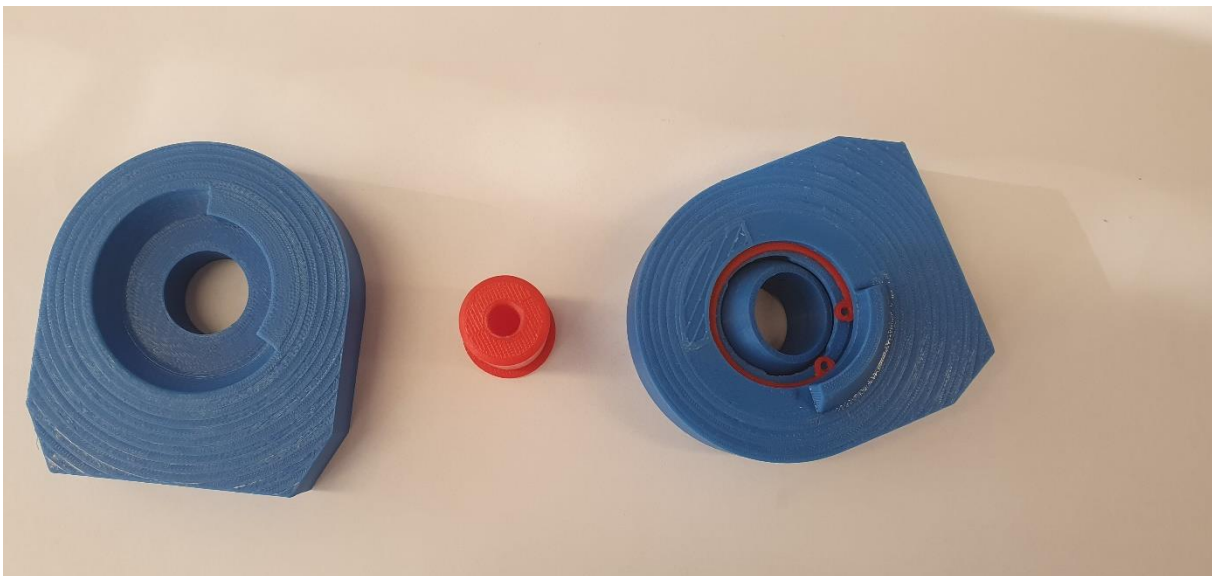


Obrázek 28: Hlavní kloub



*Obrázek 30: Rameno exoskeletu*

Dále byla za pomoci 3D tiskárny, vytisknuta podsestava Hlavního kloubu. Za pomoci studentů VOŠ bude vytvořen výrobní postup tvarového prvku v aplikaci CAM. Následně bude tento prvek zhotoven na školním obráběcím centru a později i předveden.



*Obrázek 31: Podsestava Hlavního kloubu vytvořená za pomoci 3D tisku.*



### 3.8 Porovnání exoskeletu s konkurencí

#### FORTIS



Cena: 23 320,- dolarů, 532815,-Kč  
systém:mechanický  
materiál: ocel, slitiny hliníku

*Obrázek 32: Exoskelet Fortis pro práci s nástroji*

Exkoslet je připraven pro průmyslové použití s výsuvným ramenem Zero-G arm. Používá se v terénu, ale i pro halové práce, kde je nutno používat velké a těžké nástroje ve vysokém časovém intervalu pro jednu osobu. Je používán také pro záchrany životů, a to zejména u hasičů kdy s porovnání třech lidí musí držet hydraulické nůžky. Zde stačí pouze jeden s oblekem Fortis a je daleko efektivnější než první varianta.

Porovnání: Tento oblek disponuje stejnými prvky jako navrhovaný je taktéž mechanicky ovládaný, ale bez podpory dalšího rozšiřování zejména pohybové médium. Díly musí být vyměňovány přímo určenými díly pro tento typ obleku, což u mého řešení být nemusí. Konstrukce je dražší, ale disponuje prvky, které jsou při nošení pro obsluhu pohodlnější, a to zejména plastovými díly, které svým tvarem pohodlněji upevněné končetiny pro bezpečné zapnutí exoskeletu na obsluhu exoskeletu.



ARKE

Cena: 80 000 dolarů, 1 827 840,-Kč  
systém: plně elektrizovaný  
materiál: ocel, slitiny hliníku a  
karbonová vlákna



*Obrázek 33: Exosuit Arke pro rehabilitace a podporu chození*

Tento exoskelet se používá pro rehabilitace v nemocnicích a specializovaných centrech pro lidi, kteří nemohou chodit nebo s omezenou chůzí. Tento exoskelet používá senzory pro synchronizování pohybu s lidským tělem, a to pomocí reakci svalů tak aby mohl fungovat s lidmi, kteří se sami pohybovat nemohou.



### 3.9 Budoucí úpravy a další možno vylepšení

Pro budoucí úpravy exoskeletu bych zde zahrnul různé odvětví, na které bych se rád v budoucnu zaměřil a to například:

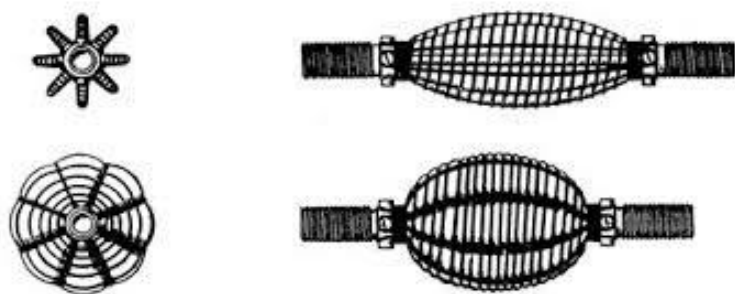
**Pohyblivost** – Větší pohyblivost a volnost konstrukce se stejnou ne-li větší pevností. Ergonomičtější součásti, které by přímo lícovaly na tělo obsluhy. Volba modernějšího hybného prvku, a to například Fluidní sval.

**Použití elektromotorů nebo pneumatických válců** - Díky použití jiného média například na nohou je možno zvedat větší váhu nebo mít více pohyblivých prvků jako například celo pohyblivé ruce.

**Možnost nastavitelných tyčí pro konkrétní velikost obsluhy** - přidání teleskopických tyčí namísto pevných tyčí u nohou pro regulování výšky exoskeletu a to samé u zad.

**Zbraňový průmysl** - přidání elektromotorů pro rychlejší a silnější reakce exoskeletů a následné přidání plátů z neprůstřelného materiálu pro zajištění bezpečnosti vojáka, přidání hrudní výztuže s neprůstřelnými deskami a helmy pro zvýšení bezpečnosti.

**Zdravotnictví** - přidání snímačů nervové aktivity a elektromotorů s jemnou regulací pro zajištění rychlého a přesného pohybu rehabilitovaného pacienta nebo pro vozíčkáře



Obrázek 34: Ukázka a funkce fluidních pístů



Obrázek 35: První neprůstřelný exoskelet





#### 4 Použití exoskeletů od rehabilitace pro pacienty až po armádní účely

Exoskelety jsou dnes sice na vzestupu, ale díky rychlým inovacím, které se vyvíjí dostatečně rychle se exoskelety stanou víc a víc používanou věcí. Vzhledem k budoucnosti a zvyšování efektivity a nahraování lidské síly roboty se člověk těmito plně automatizovanými funkcemi rovnat nemůže, ale jsou tu věci, které stroj dělat nemůže nebo na to není dostatečná technologie k jejich realizaci. Tedy mluvíme o tom že tuto práci vykonává člověk, kterému se díky exoskeletu může ušetřit drahocenný čas a hlavně námaha, která postupem času ničí lidské tělo. Jsou tu i jiné oblasti kde exoskelet pomáhá jako je například rehabilitace lidí po dopravních nehodách nebo podpora chůze člověka na vozíku a udělat ho soběstačným. Účely exoskeletu a jeho potenciál se začíná uplatňovat ve více oblastech. V armádních podmínkách už exoskelety nasazené jsou a tedy mluvíme o jejich dokonalejších sourozencích na rozdíl od těch v ostatních sférách použití. Zde mluvíme o exoskeletech jako o podpoře vojáků v boji či na bojišti. Výšší zdatnost vojáků nebo podpora pro nošení těžkých batohů a dalšího vojenského vybavení. Převazy těžkých beden s municí či tepelně řízenými raketami na letadlových lodích pro zásobování přistávaných letadel. Zde všude se těžká technika nedostane a tak lze použít exoskelety k vykonávání této funkce s ohledem na nižší náklady a menší hmotnost zařízení a samozřejmě i velikost a přeprava.

V oblasti zdravotnictví se exoskelety velmi uplatňují a to zejména v oblastech pro rehabilitaci pacientů, kterým lze efektivněji pomoci s jejich rehabilitací. Podpůrné exoskelety jsou zde teprve ve vývojových fázích stejně jako s bionickými končetinami, které jsou těmito typům skeletu podobné, ale s jejich hybností jsou stále problémy a to je jejich nepřirozený pohyb končetin.



Obrázek 37: Vojenský exo-oblek HULC



Obrázek 36: Exoskelet pro vozíčkáře a jejich rehabilitaci





## 5 ZÁVĚR

Během konstruování, řešení problémů a konzultacemi celého exoskeletu jsem si prakticky zopakoval, ne-li zdokonalil své znalosti, se kterými jsem se během svého studia seznamoval a snažil pochopit. Díky těmto této nemalé zkušenosti, která mě otevřela oči a vnesla do pozice konstruktéra, který musí řešit opravdové problémy spjatý přímo s navrhovanou prací. Následovalo to, že jsem si tuto práci vyzkoušel a věci které jsem zde použil mi otevřeli oči a vnesly směr, kterým bych se rád v dalších etapách svého života rad nechal zasvětit. Znalosti a zkušenosti použít v této práci mě ne male prohloubily v oblasti 3D navrhování a komplexního přemýšlení nad celým problémem. Následovně je na tom prohloubení znalostí ohledně exoskeletu a používání a kombinování různých dalších odborných proudů. Uznávám, že mi tato práce přinesla velké plus do mého života a jeho další cesty se mi teprve s postupem času otevřou.



*Obrázek 38: První létající exoskelet na světě*



## Seznam použité literatury

- [1] Strojnické tabulky druhé doplňkové vydání  
Pomocná učebnice pro školy technického zaměření Ing. Jan Leinveber, Ing. Pavel Vávra 2005  
ISBN 80-7361-011-6
- [2] <https://cs.carolchanning.net/domashniy-uyut/7682-ekzoskelet-svoimi-rukami-kak-sdelat-ekzoskelet-stalkera.html> - Obrázek 1
- [3] <http://cyberneticzoo.com/man-amplifiers/1966-69-g-e-hardiman-i-ralph-mosher-american/> -  
Obrázek 2
- [4] <https://www.abicko.cz/clanek/video/15624/supermoderni-vojaci-co-dovedou-dnesni-exoskelety.html>- Obrázek 3
- [5] <https://zpravy.aktualne.cz/roboticka-kostra-pomaha-ochrnutym-mohou-znovu-chodit/r~i:article:615095/?redirected=1551807708> - Obrázek 4
- [6] <http://ekonomicky-denik.cz/exoskelet-zrozeni-superdelnika/>- Obrázek 5
- [7] <https://www.thenbs.com/knowledge/exoskeleton-set-to-take-the-strain-for-construction-workers>- Obrázek 6
- [8] <https://www.pbs.org/newshour/show/robotic-arms>- Obrázek 7
- [9] <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2017/11/09/ford-exoskeleton-technology-pilot.html>- Obrázek 8
- [10] <https://plus.rozhlas.cz/exoskelet-rewalk-zvlada-i-chuzi-po-schodech-rika-obchodni-reditel-izraelskeho-7209665>- Obrázek 9
- [11] <https://www.torque.com.sg/news/ford-factory-integrates-iron-man-suits-assembly-line/>-  
Obrázek 10
- [12] <https://pawli.eu/lockheed-martins-exoskeleton.html>- Obrázek 11
- [13] <https://pawli.eu/lockheed-martins-exoskeleton.html>- Obrázek 12
- [14] <https://exoskeletonreport.com/product/fortis/>- Obrázek 27
- [15] <https://exoskeletonreport.com/product/arke/>- Obrázek 28
- [16] <https://www.mmspektrum.com/clanek/umele-svaly-cast-2-pneumaticke-svaly.html>- Obrázek 29
- [17] <https://onemansblog.com/2007/05/17/the-trojan-worlds-first-body-armor-exoskeleton/>-  
Obrázek 30
- [18] <https://exoskeletonreport.com/2016/07/military-exoskeletons/>- Obrázek 31
- [19] [https://www.ted.com/talks/eythor\\_bender\\_demos\\_human\\_exoskeletons?language=en](https://www.ted.com/talks/eythor_bender_demos_human_exoskeletons?language=en)-  
Obrázek 32
- [20] <https://www.nextbigfuture.com/2017/03/real-life-flying-iron-man-exoskeleton.html>- Obrázek 33



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Příklad jednoduchého exoskeletu .....	5
Obrázek 2: První používaný exoskelet .....	6
Obrázek 3: Exoskelety v armádě pro nabíjení houfnic .....	6
Obrázek 4: Exoskelety pro podporu chůze ochrnutých lidí .....	7
Obrázek 5: Kombinovaný exoskelet s rukou Zero G-arm .....	8
Obrázek 6: Vývoj bionické končetin pro jejich používání nejen pro lidi bez končetin .....	9
Obrázek 7: Exosuit používaný na staveništi pro podporu rukou .....	9
Obrázek 8: Exosuit používaný na linkách automobilky Ford .....	10
Obrázek 9: Používání exoskeletu k rehabilitacím pacientů .....	11
Obrázek 10: Exosuit používaný v automobilce Ford .....	12
Obrázek 11: Funkční exoskelet používaný k průmyslové výrobě .....	13
Obrázek 12: Rehabilitační exoskelet používaný v nemocnicích .....	14
Obrázek 13: První úplný náčrt nohou a první úvaha nad tvarovým prvkem .....	15
Obrázek 14: První náčrt ruky exoskeletu, který se ale nezhotovil .....	15
Obrázek 15: Bok exoskeletu s pohledem na pracovní rameno .....	16
Obrázek 16: Žáda exoskeletu a pohled na závažový systém .....	17
Obrázek 17: Finální průmyslový exoskelet z přední strany .....	18
Obrázek 18: Funkční poloha kloubů .....	19
Obrázek 19: Ukázka tvarového prvku se zaoblením .....	20
Obrázek 20: Klouby s tvarovými prvky .....	20
Obrázek 21: Podstava exoskeletu s nosnou konstrukcí .....	21
Obrázek 22: Polohovatelné rameno .....	22
Obrázek 23: Prsteneček pro upínání nástrojů .....	22
Obrázek 24: Rameno s prstencem v pracovní poloze .....	23
Obrázek 25: Pohled na píst s tlačnou pružinou uvnitř ramene .....	23
Obrázek 26: Schéma tyče spojující klouby, zatěžované na vzpěr .....	24
Obrázek 27: Schéma a rozměry pro výpočet namáhání .....	25
Obrázek 28: Model exoskeletu .....	27
Obrázek 29: Hlavní kloub .....	27
Obrázek 30: Rameno exoskeletu .....	28
Obrázek 31: Podsestava Hlavního kloubu vytvořená za pomoci 3D tisku .....	28
Obrázek 32: Exoskelet Fortis pro práci s nástroji .....	29
Obrázek 33: Exosuit Arke pro rehabilitace a podporu chůze .....	30
Obrázek 34: Ukázka a funkce fluidních pístů .....	31
Obrázek 35: První neprůstřelný exoskelet .....	31
Obrázek 36: Exoskelet pro vozíčkáře a jejich rehabilitace .....	32
Obrázek 37: Vojenský exo-oblek HULC .....	32
Obrázek 38: První létající exoskelet na světě .....	33