

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270017 - Konstruování strojů a
technických zařízení

Studijní specializace: Konstruování zdravotnické a kooperativní
techniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Konstrukční řešení stavebnicového systému exoskeletonu

Autor: Bc. Zuzana TOMANOVÁ

Vedoucí práce: Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Zuzana TOMANOVÁ**
Osobní číslo: **S21N0068P**
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**
Specializace: **Konstruování zdravotnické a kooperativní techniky**
Téma práce: **Konstrukční řešení stavebnicového systému exoskeletonu**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Cílem diplomové práce je konstrukční návrh stavebnicového systému exoskeletonu určeného pro méně pohyblivé osoby. Technické řešení by mělo obsahovat specifikaci požadavků s ohledem na správnou funkčnost, snadnou manipulaci a respektování potřebných norem a předpisů. Konstrukční návrh systému by měl obsahovat rozbor technických možností jednotlivých řešení, splňovat požadavky technické jednoduchosti s respektováním bezpečnostních požadavků. U výsledného řešení provést komplexní zhodnocení navržených technických parametrů.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Vypracování rešerše včetně systematického popisu funkce.
2. Vypracování rozboru technických parametrů.
3. Vypracování vybrané varianty řešení včetně výpočtového hodnocení.
4. Zhodnocení vybraného konstrukčního návrhu.

Konzultant: Ing. Jiří Kořínek, ZČU, FST – KKS

Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] MARTINEK, R. Senzory v průmyslové praxi. BEN, Praha, 2004
 - [2] ROUBÍČEK, O. Elektrické motory a pohony. BEN – technická literatura, 2004
 - [3] ŘAŠA, J., ŠVERCL, J.: Strojnické tabulky. Scientia, Praha, 2004
 - [4] SHIGLLEY, J., E., MISCHKE, C., R., BUDYNAS, R., G. Konstruování strojních součástí. VUT v Brně, Brno, 2010
- Podkladový materiál, výkresy, prospekty, katalogy apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **30. listopadu 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. listopadu 2022

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala mému vedoucímu práce doc. Ing. Josefovi Formánkovi, Ph.D. za poskytnutí odborných a věcných rad při řešení samotné problematiky. Velké díky patří Ing. Pavlovi Jedličkovi, který mě seznámil s metodou motion capture a dále umožnil samotné měření pomocí této metody na Fakultě aplikovaných věd.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Tomanová	Jméno Zuzana		
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Formánek, Ph.D.	Jméno Josef		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Konstrukční řešení stavebnicového systému exoskeletonu			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	63	TEXTOVÁ ČÁST	52	GRAFICKÁ ČÁST	11
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce obsahuje konstrukční návrh stavebnicového systému exoskeletonu pro dolní končetiny. Samotné konstrukci předcházelo získání kinematiky pohybů pomocí metody motion capture. Technický systém je podroben pevnostním výpočtům pomocí metody MKP.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	exoskeletony, dolní končetiny, chůze, zdravotnické pomůcky

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Tomanová	Name Zuzana	
STUDY PROGRAMME	N0715A270017 Design engineering of machines and technical devices		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Formánek, Ph.D.	Name Josef	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Structural design of the modular exoskeleton system		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	63	TEXT PART	52	GRAPHICAL PART	11
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis contains a structural design of a modular exoskeleton system for the lower limbs. The actual design was preceded by the acquisition of kinematics of the movements using the motion capture method. The technical system is subjected to strength calculations using the FEM method.
KEY WORDS	exoskeletons, lower limbs, walking, medical aids

Obsah

Prohlášení o autorství	2
Poděkování	3
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	3
Seznam obrázků	4
Seznam tabulek	6
1. Úvod do problematiky	7
2. Historie exoskeletonů.....	8
3. Druhy exoskeletonů	10
3.1. Exoskeletony pro lékařské účely	10
3.1.1. Exoskeletony určené k rehabilitaci	11
3.1.2. Nositelné exoskeletony	11
3.2. Exoskeletony pro průmyslové odvětví	12
3.2.1. Zádové.....	12
3.2.2. Ramenové.....	13
3.2.3. Hýžd'ové.....	13
3.2.4. Celoolblekové.....	14
4. Možnosti využití ve zdravotnictví	15
4.1. Dětská obrna	15
4.2. Cévní mozková příhoda.....	15
4.3. Mozkové záněty (encefalitida)	15
4.4. Roztroušená skleróza	15
4.5. Epileptický záchvat.....	15
4.6. Úrazy	15
5. Základní kinematické pohyby dolních končetin	16
5.1. Stojná fáze	18
5.1.1. Počáteční kontakt	18
5.1.2. Stádium zatěžování	18
5.1.3. Střední stojná fáze	18
5.1.4. Konečná stojná fáze	18
5.1.5. Předšvih.....	18
5.2. Švihová fáze	19
5.2.1. Počáteční švih.....	19

5.2.2. Střední švih.....	19
5.2.3. Konečný švih.....	19
6. Konstrukce exoskeletonů a umístění akčních členů	20
7. Parametry populace.....	23
8. Praktická část	24
8.1. Úvod do problematiky	24
8.2. Cíl	24
8.3. Návrhy řešení.....	24
8.4. Inženýrsko-manažerská specifikace požadavků na konstrukční návrh TS	26
8.4.1. SWot hodnocení vhodnosti výchozího a konkurenčního TS pro specifikované požadavky.....	31
8.4.2. SWot hodnocení potenciálu konkurenceschopnosti výchozího a konkurenčního TS	32
8.5. Návrh funkční struktury.....	33
8.6. Úvod do měření pomocí systému motion capture	33
8.7. Příprava před měřením	34
8.7.1. Příprava subjektu a kalibrace	34
8.8. Scénář měření	35
8.9. Blender.....	36
8.10. Konstrukční návrhy jednotlivých kloubů.....	37
8.11. Konstrukční řešení v Siemens NX.....	39
8.12. Pevnostní výpočet konstrukčního návrhu exoskeletonu	42
8.13. Použití servomotorů	45
8.14. Možnost naprogramování chůze	47
8.15. Zhodnocení	48
9. Závěr	49
Seznam použitých zdrojů	50
PŘÍLOHA č. 1	i
Inženýrsko – manažerské specifikace požadavků na vlastnosti navrhovaného TS.....	i
PŘÍLOHA č. 2.....	ii
Ukázka kódu chůze v Tinkercad	ii

Přehled použitých zkratk a symbolů

FST	Fakulta strojní
KKS	Katedra konstruování strojů
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
cm	centimetr
mm	milimetr
m	metr
s	sekunda
Nm	newtonmetr
tzv.	tak zvaný
lat.	latinsky
angl.	anglicky
TS	Technický systém
TS0	Výchozí technický systém
TSA	Konkurenční technický systém
TS1	Navržený technický systém
Siemens NX	CAD/CAM/CAE program
CAD	Počítačem podporované navrhování
CAM	Počítačem řízená výroba
CAE	Počítačem podporované konstruování

Seznam obrázků

Obr. 1: Exoskeleton Rex [1].....	7
Obr. 2: Hardiman [2].....	8
Obr. 3: Kinematický chodec [3].....	9
Obr. 4: Aktivní oblek [3].....	9
Obr. 5: Rozdělení exoskeletonů [5].....	10
Obr. 6: Lékařské exoskeletony – rehabilitace [6].....	11
Obr. 7: Nositelné exoskeletony [7]	11
Obr. 8: Snížení zátěže s využitím zádových exoskeletonů [4].....	12
Obr. 9: Zádové exoskeletony [4].....	12
Obr. 10: Postižené svaly při práci nad hlavou [4]	13
Obr. 11: Ramenné exoskeletony [4].....	13
Obr. 12: Čtyřhlavý sval stehenní a kolenní kloub [8]	14
Obr. 13: Hýžděové exoskeletony [4].....	14
Obr. 14: Celoblekové exoskeletony [4].....	14
Obr. 15: Referenční roviny lidského těla [12].....	16
Obr. 16: Základní pohyby končetin [16].....	17
Obr. 17: Osm fází cyklu chůze [17]	19
Obr. 18: Mechanicky řízený exoskeleton [18]	20
Obr. 19: Exoskeleton s pístem [20].....	21
Obr. 20: Elektromechanicky ovládaný exoskeleton [22]	22
Obr. 21: Exoskeleton s pístem – návrh č.1	25
Obr. 22: Princip lanka s utahovacím kolečkem.....	25
Obr. 23: Elektromechanický exoskeleton – návrh č.2.....	26
Obr. 24: Úvodní oddíl specifikace požadavků TS	26
Obr. 25: Požadované funkce TS.....	27
Obr. 26: Požadovaná provozuschopnost TS	27
Obr. 27: Vhodnost TS z hlediska hodnot lidí.....	27
Obr. 28: Vhodnost z hlediska bezpečnosti a zdraví lidí/příjemnosti pro lidi	28
Obr. 29: Vlastnosti TS k ostatním hmotným pracovním prostředkům	28
Obr. 30: Vlastnosti TS k pracovním, přírodním a vesmírným prostředím	28
Obr. 31: Vlastnosti TS k „know-how“ informacím	29
Obr. 32: Vlastnosti TS k ustáleným „know-SMQ“ informacím	29
Obr. 33: Vlastnosti TS k proměnlivým „know-SMQ“ informacím.....	29

Obr. 34: Vhodnost z hlediska požadovaných reaktivních vlastností TS	29
Obr. 35: Vhodnost z hlediska požadovaných architekturních/požadovaných znakových vlastností TS	30
Obr. 36: Vhodnost pro vynaloženou návrhovou/konstrukční dobu	30
Obr. 37: Vhodnost pro vynaložené návrhové/konstrukční náklady	30
Obr. 38: SWot vhodnost posuzovaných (zakázek) TS pro EDSM třídy QD-P požadavků	31
Obr. 39: Potenciál $Q^T \wedge C$ D-P konkurenceschopností posuzovaných TS vyhodnocený pro porovnatelné Q/T/C D-P požadavky na navrhovaný TS	32
Obr. 40: Černá skříňka technického transformačního procesu (TTrf) provozu navrhovaného TS	33
Obr. 41: Využití motion capture ve filmu [19]	34
Obr. 42: Příprava subjektu na měření	35
Obr. 43: Detailní záběr na rozložení markerů na dolních končetinách	35
Obr. 44: Pracovní návrh TS – nárys	36
Obr. 45: Pracovní návrh TS – bokorys	36
Obr. 46: Skica kyčelního kloubu – konstrukční řešení	37
Obr. 47: Skica kolenního kloubu – konstrukční řešení	38
Obr. 48: Skica hlezenního kloubu – konstrukční řešení	38
Obr. 49: Konstrukční návrh exoskeletonu – nárys	39
Obr. 50: Konstrukční návrh exoskeletonu – bokorys	40
Obr. 51: Konstrukční návrh exoskeletonu – 3D pohled	40
Obr. 52: Konstrukční návrh exoskeletonu – profil	41
Obr. 53: Konstrukční návrh exoskeletonu – stavebnicový princip	41
Obr. 54: Konstrukční řešení exoskeletonu – servomotor	42
Obr. 55: Definování okrajových podmínek a zatížení	42
Obr. 56: Pevnostní výpočet exoskeletonu EN AW 6063 T5 – průhyb	43
Obr. 57: Pevnostní výpočet exoskeletonu EN AW 6063 T5 – von Mises	43
Obr. 58: Pevnostní výpočet exoskeletonu ocel – průhyb	44
Obr. 59: Pevnostní výpočet exoskeletonu ocel – von Mises	44
Obr. 60: Oba typy servomotorů	45
Obr. 61: Planetární převodovka [28]	45
Obr. 62: Servomotor MG10015E-i10 v2	46
Obr. 63: Servomotor MG10015E-i10 v2 – zadní část	46
Obr. 64: Schéma možnosti zapojení servomotorů – tinkercad	47
Obr. 65: Exoskeleton – nárys	48

Obr. 66: Exoskeleton – bokorys 48

Seznam tabulek

Tab. 1: Výsledky měření populace podle nábytkářské firmy (upraveno) [15; 23] 23

1. Úvod do problematiky

Exoskeletony jsou navrhovány pro rehabilitaci pacientů s problémy pohybového aparátu. Výzkumy ukázaly výrazně urychlenou obnovu svalové hmoty u pacientů s využitím exoskeletonů. Vertikální poloha pacienta napomáhá normalizovat funkci všech vnitřních orgánů, což je při rehabilitaci a rekonvalescenci důležité.

Exoskeletony můžeme rozdělit podle lékařského využití na rehabilitační a podpůrné.

- Rehabilitační = nástroj pro rozšíření rehabilitačního programu a po dokončení tohoto programu se již nepoužívají
- Podpůrné (nositelné) = pomůcka je určena pro lepší mobilitu, je používána trvale a neočekává se celkové zotavení pacienta; exoskeleton se stává augmentativním¹ zařízením

Navzdory tomu, že odvětví zabývající se exoskeletony je na počátku svého vývoje a je zde ještě řada úkonů, které zajistí co nejefektivnější a nejvhodnější kombinaci funkcí exoskeletonů. Již nyní je jasné, že exoskeletony budou v budoucnu důležitou součástí lidského života. Funkční prototypy exoskeletonů se vyrábějí např. v Izraeli je jím například exoskeleton ReWalk nebo exoskeleton REX, který se vyrábí na Novém Zélandu. [1]



Obr. 1: Exoskeleton Rex [1]

¹ Augmentativní = podporující, zvyšující, kompenzující

2. Historie exoskeletonů

Dějiny robotiky jsou úzce interogovány s lidským činitelem. Původně byly roboti určeni k nahrazení lidské činnosti v průmyslovém odvětví, kde měli nahradit člověka při opakujících se činnostech a úkonech vyžadující přesnost. V dnešní době se spíše přikročilo k interakci robota s lidskou obsluhou. V této souvislosti se objevily koncepty nositelní roboti neboli exoskeletony.

Koncem 60. let 20. století byl navržen společností General Electric jeden z prvních poháněných exoskeletonů. Tento exoskeleton nesl pojmenování Hardiman, což je zkratka pro „Human Augmentation research and Development research“ plus „Man“, jenž bylo zkratkou pro manipulátor. [2]

Samotná konstrukce exoskeletonu byla navržena tak, aby napodobovala co nejpřesněji přirozený pohyb uživatele. Ovšem zároveň aby byl uživatel schopen uzvednout pomocí exoskeletonu přibližně váhu 680 kg. Tato váha je přibližně 25krát větší, než lidská síla. Tento požadavek byl spíše velkým přáním společnosti. Primární funkcí exoskeletonu byla pomoc uživateli při nesení nákladu a vybavení. [2]

Konstrukce Hardimanu se skládala ze dvou vrstev, z vnitřní a vnější konstrukce. Vnitřní konstrukce umožňovala uživateli připojení k celému exoskeletonu. Vnější konstrukce sloužila k vykonávání práce. Tento typ konstrukce se nazývá master-slave. Jedná se o propojení obratnosti lidského uživatele (master) se silou samotného exoskeletonu (slave). Prototyp Hardimanu byl vyroben na elektrický a hydraulický pohon. Přenos pohybů z vnitřní konstrukce na vnější byl pomocí třiceti mechanických kloubů po celém exoskeletonu. Připojení vnitřní konstrukce na uživatele bylo pomocí připojovacích bodů, které se nacházely na chodidlech, pasu, předloktí a ruce. Tyto kontaktní body vycházely z přesvědčení konstruktérů, že minimální kontaktní body umožňují uživateli volný a přirozený pohyb nohou a paží při vykonávání práce. Konstrukce Hardiman je zobrazena na obr.2. [2]

Společnost General Electric bohužel musela projekt zastavit z několika důvodů. Prvním důvodem byla hmotnost samotného fyzického prototypu, která byla projektována na 680 kg. Stejnou hmotnost měl Hardiman zvednout. Dalším důvodem byla předpokládaná rychlost chůze, která byla odhadnuta na 0,8 m/s. Z důvodu použití typu konstrukce master-slave docházelo k prudkým nekontrolovatelným vibracím. Sečtení těchto faktorů nezaručovalo další financování projektu Hardiman, z tohoto důvodu se společnost rozhodla projekt zastavit. [2]



Obr. 2: Hardiman [2]

Exoskeleton Hardiman měl spíše využití z hlediska průmyslu. Prvním exoskeletonem pro podporu chůze, a tedy využívaný ve zdravotnictví, byl kinematický chodec. Tento technický systém byl vyvinutý v Institutu Mihajla Pupina začátkem 70. let 20. století. Kinematický chodec byl na rozdíl od předešlého typu pouze částečný exoskeleton. Jednalo se o exoskeleton určený pro dolní končetiny, který umožňoval připojení na chodidla pomocí plotének a s možností dalšího připojení pomocí rozšířené oblasti páteře viz obr.3. [3]



Obr. 3: Kinematický chodec [3]

Institut Mihajla Pupina pokračoval v dalších návrzích a vyvinul tzv. aktivní oblek viz obr.4. Tento exoskeleton byl modulární aktivní exoskeleton. Modulární, jelikož samotný exoskeleton mohl být rozdělen na menší sestavy. Tyto podsestavy mohly být dále využity pro specifickou část těla, např. modul paže. Aktivní znamenalo, že na rozdíl od svých předchůdců využíval exoskeleton k vytváření pohybu aktuátory, nikoliv pasivní systémy. Jednalo se tedy o první exoskeleton využívající elektromotory. Z tohoto důvodu je aktivní oblek považován za předchůdce moderních exoskeletonů. [3]

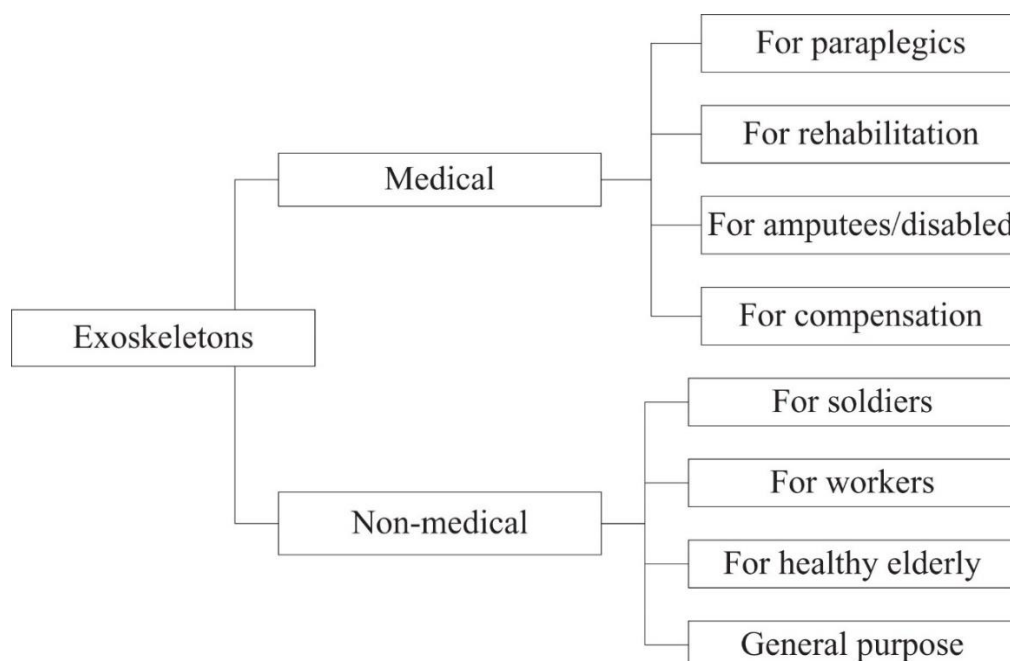


Obr. 4: Aktivní oblek [3]

3. Druhy exoskeletonů

Exoskeletony jsou využitelné napříč všemi odvětvími. Napomáhají nejen k rehabilitaci ve zdravotnictví, ale jsou nápomocné i v průmyslových odvětvích např. zvedání těžkých břemen.

Při zvedání těžkých břemen nedochází pouze k svalovému napětí. Znatelné je i zvýšení srdečního rytmu a dýchání. Při takto opakujícím se vypětí může dojít k trvalému poškození kloubů a páteře, u které dochází k opotřebení meziobratlových destiček. Z tohoto důvodu byly vytvořeny hygienické limity pro zvedání břemen, které se dělí podle pohlaví uživatele a frekvence samotného zvedání. Ke zvýšení bezpečnosti uživatele mohou pomoci i průmyslové a lékařské exoskeletony. [4]



Obr. 5: Rozdělení exoskeletonů [5]

3.1. Exoskeletony pro lékařské účely

Exoskeletony využívané ve zdravotnictví se mohou rozdělit na rehabilitační a podpůrné. Pod pojmem rehabilitační exoskeleton je možné si představit nástroj pro rozšíření a zpestření rehabilitačního programu. Po dané rehabilitaci již pacient exoskeleton nevyužívá. Podpůrné neboli nositelné exoskeletony pacient používá trvale a neočekává se, že se pacient zcela zotaví. Exoskeletony pro lékařské účely můžeme dále rozdělit podle umístění na lidském těle na: [1]

- Exoskeletony pro horní končetiny
- Exoskeletony pro dolní končetiny

3.1.1. Exoskeletony určené k rehabilitaci

Exoskeletony určené pro rehabilitaci pacienta umožňují přirozený a ergonomicky správný pohyb postižené končetiny. Tím se zaručuje, že si pacient navykne na správné držení a pohyb. Pacient je tedy podporován nebo dokonce veden ke správnému vykonávání dané činnosti, čím dochází k obnově svalů bez velkých zátěží na klouby. Tento typ exoskeletonů přináší velkou naději pacientům i lékařům. Dochází k zefektivnění samotné rehabilitace. Zároveň dochází ke zvyšování sebevědomí a psychické pohody pacienta, které jsou jedním z hlavních klíčů k návratu do běžného života. [4; 1]



Obr. 6: Lékařské exoskeletony – rehabilitace [6]

3.1.2. Nositelné exoskeletony

Jedná se o stálou pomůcku, kterou potřebuje pacient k vykonávání pohybů. Nositelné exoskeletony umožňují pacientům s ochrnutím znovu se postavit na nohy nebo se navrátit k pohybu horních končetin. U těchto pacientů dochází k osamostatnění a k navrácení do běžného života. [4]



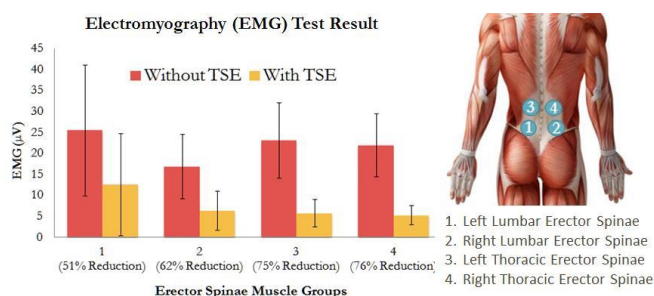
Obr. 7: Nositelné exoskeletony [7]

3.2. Exoskeletony pro průmyslové odvětví

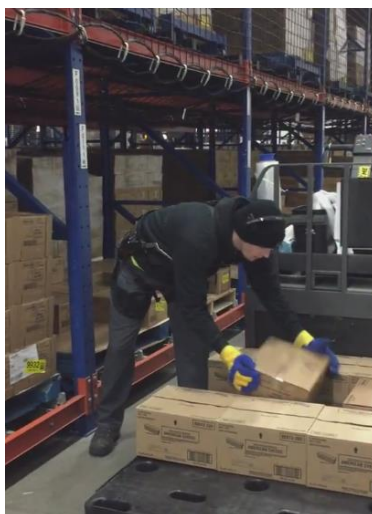
V dnešní době se velká většina úkonů provádí na strojích. V jistých případech je nutná asistence člověka, tudíž není možná stoprocentní automatizace. Dobrým příkladem je například automobilový průmysl. Zde je plno těžkých břemen, které se ovšem potřebují nainstalovat na konkrétní místo. Dochází tedy k elegantnímu propojení stroje a člověka. Exoskeletony uleví pracovníkovi s tíhou samotných břemen. Z pracovníka tedy odpadá fyzické vytížení a plně se soustředí pouze na samotnou instalaci. Průmyslové exoskeletony nalézají uplatnění i ve stavebnictví, kde se též pracuje s těžkými břemeny jako např. pytle s materiálem. Průmyslové exoskeletony můžeme dále rozdělit podle umístění na lidském těle. [4]

3.2.1. Zádové

Zádové exoskeletony snižují zatížení ve spodní části zad v průměru o 60 % viz obr.8. Exoskeletony napomáhají snižování hmotnosti břemene pro uživatele a zároveň snižují moment pohybu. Jsou navrženy tak, aby anatomicky seděli uživateli a nebránili mu v přirozeném pohybu. Uživatel může vykonávat své denní úkony bez jakéhokoliv omezení. Proto jsou zádové exoskeletony určeny na celodenní nošení. Nejčastější využití zádových exoskeletonů můžeme vidět v profesích, kde dochází k ohýbání dolů a zpět. Tudíž zejména na staveništích, montážních linkách, ve skladech atd. Příklad využití v praxi je na obr. 9. [4]



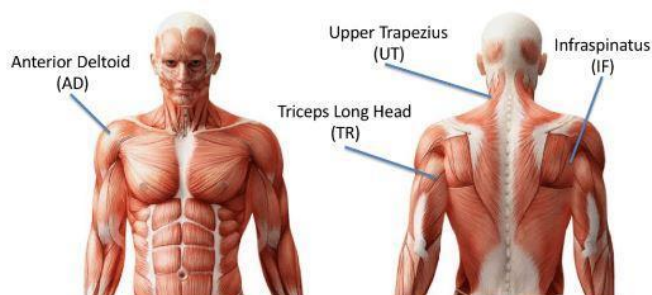
Obr. 8: Snižování zátěže s využitím zádových exoskeletonů [4]



Obr. 9: Zádové exoskeletony [4]

3.2.2. Ramenové

Ramenové exoskeletony snižují zatížení ramenových svalů, tím snižují riziko poranění. Využití ramenových exoskeletonů na pracovišti značně zvyšuje produktivitu pracovníka. U pracovníka, který má držet dlouhodobě nástroj nad hlavou dochází k velkým bolestem rukou a ramen. Tímto se snižuje soustředěnost pracovníka, což má za následek snížení pracovního výkonu. Ramenový exoskeleton podporuje až by mohlo být řečeno, že přebírá funkci svalů. Pracovníkovi se uleví od fyzické zátěže a soustředí se na přesné umístění nástroje. Uplatnění ramenových exoskeletonů je převážně tam, kde dochází k práci nad hlavou s nástroji nebo jinými břemeny. Příklady možnosti využití ramenových exoskeletonů je při svařování nad hlavou, broušení s rukama nad úrovní ramen, nebo například malováním atd. Příklad z praxe je možné vidět na obr. 11. [4]



Obr. 10: Postižené svaly při práci nad hlavou [4]



Obr. 11: Ramenové exoskeletony [4]

3.2.3. Hýžd'ové

Hýžd'ové exoskeletony ulevují pracovníkovi zátěž na kolenní kloub a čtyřhlavý stehenní sval. Tyto exoskeletony jsou takzvaně stavebnicové. Lze upravit délku podpěr podle potřeb a hmotnosti daného pracovníka. Tyto exoskeletony bývají inteligentní a dokážou rozeznat typy pohybů. Příkladem je chůze, chůze do schodů, chůze ze schodů, sed atd. Všechno zmíněné vede k tomu, že pohyb je nepřerušovaný a podpora se sepne pouze, když je požadována. Další výhodou je možnost uzamknutí. V tomto případě dochází k zafixování dané polohy a pracovník může využít exoskeleton například jako židli. Toto je výhodou při svařování či vrtání viz obr. 13. [4]



Obr. 12: Čtyřhlavý sval stehenní a kolenní kloub [8]



Obr. 13: Hýžd'ové exoskeletony [4]

3.2.4. Celoblekové

Kombinace všech tří modulů do jednoho exoskeletonu přináší pracovníkovi úlevu při pracovním nasazení. Každý modul lze nezávisle nastavovat, tak jak pracovník požaduje. Využití těchto exoskeletonů je v mnoha průmyslových oblastech. Příkladem může být i stavba, manipulace s těžkými břemeny ve skladu, automobilový průmysl, montážní linka, kurýrní služby či stavby lodí. Příklad z využití celoblekového exoskeletonu je možné vidět na obr. 14. [4]



Obr. 14: Celoblekové exoskeletony [4]

4. Možnosti využití ve zdravotnictví

Úvodem této části je důležité zmínit, že ochrnutí svalů je závažný příznak, který indikuje narušení nervové soustavy, svalové soustavy anebo jejich vzájemnou kombinaci.

Nervová soustava pracuje na jednoduchém šíření signálu. Signál vzniká v mozkové kůře. Odtud se signál přenáší skrz mozek do míchy. Pomocí nervů vystupujících z páteře se signál přenáší do svalových vláken. Samotný přenos signálu z nervu na sval je zprostředkován pomocí nervosvalové ploténky. Sval je podrážděn, a to vede k jeho stažení. Vlastním stažením svalu vzniká daný pohyb. Pokud dojde k poškození v kterékoli části této dráhy je šíření signálu narušeno. To vše má za následek ochrnutí dané částí těla. [9]

4.1. Dětská obrna

Jedná se o virové onemocnění, které pokud zasáhne centrální nervový systém může způsobit až ochrnutí. Nejčastěji dochází k ochrnutí dolních končetin, které má již trvalé následky. [9]

4.2. Cévní mozková příhoda

Jedná se o příhodu, kdy nedochází ke správnému zásobování krve do mozku. Pokud se pacientovi dostaví rychlé pomoci může být následek jen oslabení končetin. [10]

4.3. Mozkové záněty (encefalitida)

Mozkový zánět, odborně nazýván encefalitida, je ve většině případů infekční, virové, bakteriální nebo parazitární onemocnění. [9]

4.4. Roztroušená skleróza

Porucha chůze je spojena s oslabením kontroly nad svaly, dále se špatnou schopností ovládat koordinaci těla, s vysokými metabolickými nároky a únavou. Dochází ke zvýšené depresi a celkovému zhoršení životního stylu. [9]

4.5. Epileptický záchvat

Epileptický záchvat může vést k dočasné poruše hybnosti některých svalových skupin. Tato porucha je známá jako Toddova obrna. [9]

Toddova obrna (paralýza) = je stav, který komplikuje některé epileptické záchvaty. Jde o dočasné ochrnutí některých svalů, což je sice komplikace nepříjemná, ale naštěstí většinou nezávažná. [11]

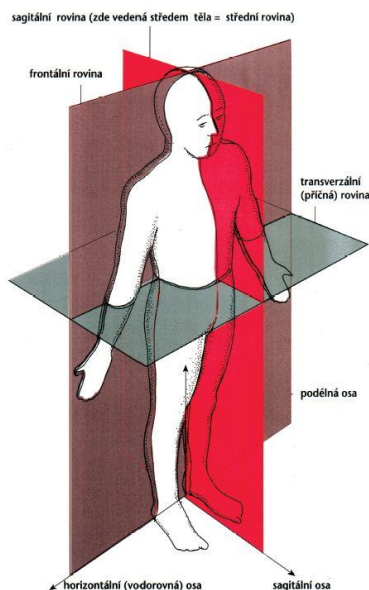
4.6. Úrazy

Množství pacientů, kteří by mohli využívat exoskeletony, přišli ke svému handicapu při nešťastné události. Ať jde o dopravní nehodu, pád z výšky nebo úrazu při sportu. Dochází často k poranění míchy. Toto poranění má za následek částečné ochrnutí, nejčastěji dolních končetin.

Robotické exoskeletony mohou pacientům usnadnit chůzi a přinést lepší pocit kontroly při samotné chůzi. To dále vede ke koordinované svalové činnosti, což snižuje metabolické a kognitivní nároky. Dále mohou exoskeletony přinést zlepšení po psychické stránce pacienta.

5. Základní kinematické pohyby dolních končetin

Tato kapitola poskytuje informace o základním pohybu dolních končetin. Chůze je z pohledu prostoru trojrozměrná, ale tato práce se zaměřuje na pohyb převážně v sagitální rovině těla (viz obr. 15). Z důvodu zjednodušení samotného pohybu a následného návrhu exoskeletonu. Toto zjednodušení je možné, jelikož se v sagitální rovině odehrávají nejvýznamnější pohyby, točivé momenty a síly.



Obr. 15: Referenční roviny lidského těla [12]

Lidská chůze využívá opakující se sekvenci pohybů dolních končetin k pohybu vpřed. Přičemž souběžně s chůzí dochází ke stabilitě postoje. Za počátek cyklu chůze je považován prvotní kontakt jednoho chodidla s povrchem, který se obvykle označuje jako došlap na patu. Pro zjednodušení si lze chůzi představit jako dvě stádia, stádium postoje a stádium švihu. Při stádiu postoje působí svaly v kyčelním kloubu, koleni a kotníku obecně na zpomalení a stabilizují tělo. Na konci tohoto stádia je kotník v plantarflexi² a v tzv. poháněném stavu, který si lze představit jako prvotní impuls k samotné chůzi vpřed. Na počátku švihového stádia dodává kyčelní kloub energii ke zvednutí nohy a k jejímu švihu vpřed. Obrázek 17 znázorňuje osm hlavních fází cyklu chůze. [13]

Důležitým aspektem je možnost samotných kloubů. Dolní končetina disponuje třemi klouby, kterými jsou v popisu od nohy nahoru kloub hlezenní, kolenní a kyčelní. Tyto klouby se od sebe neliší pouze anatomicky. Důležitý rozdíl je například ve stupních volnosti. [14; 15]

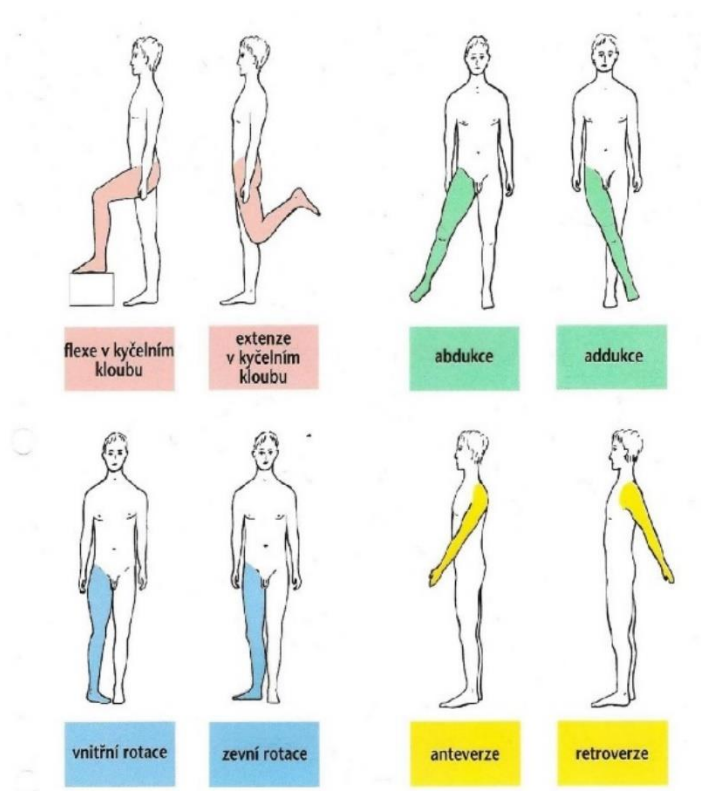
Mechaniku kyčelního kloubu lze rozdělit na základní pohyby. Těmito pohyby jsou flexe, extenze, abdukce, addukce a rotace viz obr. 16. Pohyb je umožněn díky anatomickému tvaru kyčelního kloubu, který se skládá z hlavice a jamky. Kyčelní kloub má tři stupně volnosti. [13; 15]

² Plantarflexe = pohyb nohou pryč od těla, provádí se ohýbáním kotníku [14]

Kolenní kloub se skládá ze základních pohybů, kterými jsou extenze, flexe a rotační pohyb. Samotnou flexi kolenního kloubu je možné popsat čtyřmi fázemi. První fáze, která se také nazývá počáteční rotace. V této fázi je možné ohnout kloub jen do 5°. Druhá fáze je také nazývaná valivý pohyb. Zde je pohyb vymezen v rozmezí 10° až 20°. Předposlední, tedy třetí fáze, je posuvný pohyb. Třetí fáze se pohybuje v rozmezí 20° až 140°. Závěrečnou rotací se nazývá čtvrtá, a tedy poslední fáze. Kolenní kloub má o jeden stupeň volnosti méně než kyčelní kloub. Tedy kolenní kloub má dva stupně volnosti. [13; 15]

Mechanika hlezenního kloubu se skládá z dorzální flexe, plantární flexe, abdukce a addukce. Během dorzální flexe je chodidlo v pohybu směrem ke kolennímu kloubu. Při opačném pohybu chodidla dochází k plantární flexi tzv. propnutá špička. Hlezenní kloub má tři stupně volnosti. [13; 15]

ZÁKLADNÍ POHYBY KONČETIN



Obr. 16: Základní pohyby končetin [16]

5.1. Stojná fáze

5.1.1. Počáteční kontakt

Fáze kroku nazvaná jako počáteční kontakt je zobrazena na obr. 17 pod anglickým názvem Initial contact. V této fázi cyklu chůze se nachází chodidlo na podložce a kotník se nachází v neutrální pozici. Neutrální pozici kotníku je možné popsat latinsky jako dorzální flexi. Po dorzální flexi dochází k tzv. plantární flexi. Plantární flexi je možné popsat jako pohyb prstů směrem k podložce dochází k tzv. gymnastické špičce. Koleno je v této fázi kroku téměř natažené, lat. extenze. Maximální flexe v kyčli je dosaženo v počáteční fázi a fázi konečného švihů. [14]

5.1.2. Stádium zatěžování

Ve stádiu zatěžování je chodidlo v plném kontaktu s podložkou viz obr 17. Stádium zatěžování je na obrázku pod anglickým názvem Loading response. Celková váha těla se přenáší na stojnou dolní končetinu. Zároveň dochází k ohnutí, lat. flexe, v kolenním kloubu, a to v rozmezí úhlů 15–18°. Kyčelní kloub zaujímá ve stádiu zatěžování úhel 30° a jedná se taktéž o flexi. Veškeré zmíněné pochody při této fázi mají za důsledek zpevnění stojné nohy a připravení se na další fázi. [14]

5.1.3. Střední stojná fáze

Ve střední stojné fázi, angl. Mid stance, přestávají být obě nohy oporou. Z tohoto důvodu se tato fáze nazývá jednooporová fáze cyklu. Předchozí fáze tedy připravila stojnou končetinu na přenesení zátěže z obou končetin na ni samotnou. Samotná aktivace svalů má za důsledek souvislý pohyb končetiny přes chodidlo, které je stabilizované. Kolenní kloub se dostává do natažené neutrální polohy. V kyčelním kloubu se samotná flexe snižuje na úhel 10°. [14]

5.1.4. Konečná stojná fáze

Předposlední fáze cyklu chůze se nazývá konečná stojná fáze, angl. Terminal stance. Dochází k odlepení paty končetiny, která je oporou a důsledkem mírného předklonu je přesunutě těžiště dopředu. Přenesení těžiště má dále za důsledek zvětšení opory u prstů na chodidle. Kyčelní kloub se při této fázi nachází v úhlu 10°. Noha je v oblasti kolenního kloubu propnutá a kotník svírá úhel o úhlu 10°. [14]

5.1.5. Předšvih

Předšvih, angl. Pre swing, je poslední částí stojné fáze. Tato fáze cyklu chůze se nachází v druhém období dvojí opory. Prvotní čin v této fázi je propnutí přední končetiny. Druhý a zároveň ukončující čin je zvednutí paty z podložky u zadní nohy. Ve všech těchto fázích pohybu a u svalové činnosti dochází k nárůstu aktivity. Hlezenní kloub se nachází v plantární flexi o úhlu 20°. Kolenní kloub svírá úhel 35°, tím dochází k dostatečnému odrazu prstů na noze. Kyčelní kloub zaujímá znovu neutrální polohu. V této fázi se těžiště přeneso na nohu, která zajišťuje oporu pro celé tělo a je propnutá. Toto má za důsledek, že druhá končetina je připravena k samotnému švihů, a tedy se přechází do švihové fáze. [14]

5.2. Švihová fáze

5.2.1. Počáteční švih

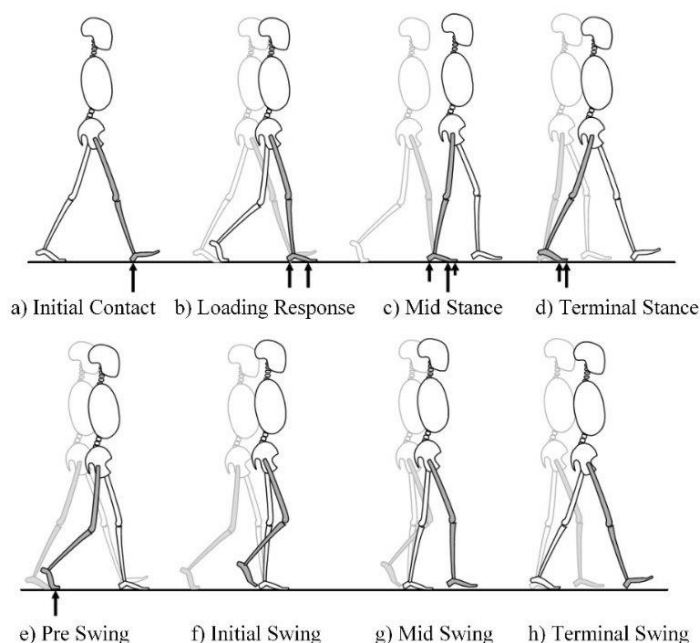
Fázi počátečního švihu, angl. Initial Swing, lze definovat jako okamžik kdy dochází k odlepení nohy od podložky. Ukončení této fáze je v okamžiku, kdy kolenní kloub dosáhne maximální možné flexe, a to je na hodnotě 60° . Úhel hlezenního kloubu se z hlediska předešlé fáze zmenšuje na rozmezí úhlů 5° - 10° . Ohnutí kyčelního kloubu je na hodnotě 20° . Celkové zpevnění, tedy samotná aktivace svalové hmoty, má za následek, že chodidlo není v kontaktu s podložkou. Přechod mezi jednotlivými částmi švihové fáze je plynulý. V tomto případě dochází k přesunu do druhé části v okamžiku, kdy končetina vykonávající pohyb má zafixovanou končetinu. [14]

5.2.2. Střední švih

Střední švihová fáze, angl. Mid swing, je započata při propnutí v kolenním kloubu. Při samotném pohybu dochází k vertikalizaci lýtkové kosti. Noha je bez toho, aniž by se dotkla podložky přesunuta dopředu. Svíraný úhel stehenní a lýtkové kosti se zmenšuje na úhel 30° . Úhel v kyčelním kloubu se zvětšuje na 30° . [14]

5.2.3. Konečný švih

Jedná se o závěrečnou část švihové fáze a zároveň o poslední část krokového cyklu. Z těchto důvodů se fáze nazývá konečný švih, angl. Terminal swing. Po této části se fáze již opakuje a následuje počáteční kontakt s podložkou. Samotná fáze je takovou přípravou všech kloubů na další zátěž. Z tohoto důvodu je kolenní kloub propnutý, hlezenní kloub zaujímá neutrální pozici a pata je v pozici, kdy je připravena na první kontakt s podložkou. [14]

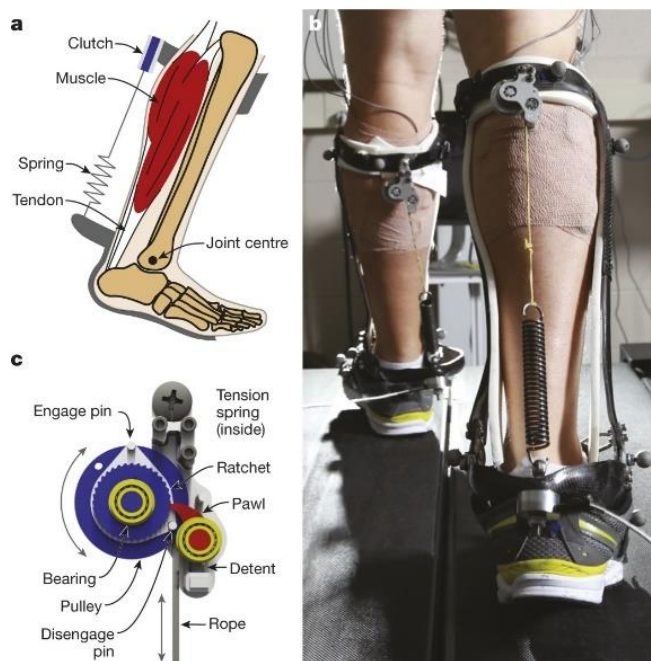


Obr. 17: Osm fází cyklu chůze [17]

6. Konstrukce exoskeletonů a umístění akčních členů

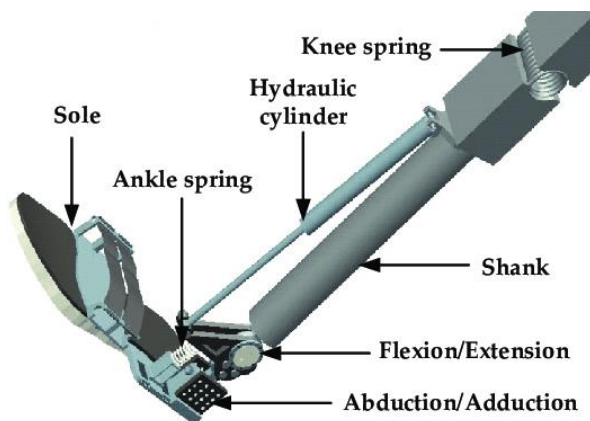
Konstrukce exoskeletonů je stále více populárním tématem ve světě výzkumu. Je vytvářeno mnoho systémů exoskeletonů s různými funkcemi určené pro různé aplikace. Je žádané vymyslet jednoduchou mechanickou konstrukci, vhodné napájení, aktuátory a převody, které jsou účinné a zároveň lehké. Kromě vývoje v oblasti inteligentních systémů, výpočetní techniky, snímání a řízení je stále velmi důležitá studie o pohybu člověka. V důsledku výše zmíněných se ve výzkumu exoskeletonů spojuje mnoho poznatků ze širokého spektra různých oborů, a proto je toto téma velmi zajímavé a důležité. Jedno ze ztížení samotné konstrukce TS je rozmístění pohybových členů na exoskeletonu. Tyto členy se velmi často nachází v obdobné poloze svalu. To vše z důvodu správné imitace funkce svalu. Jako pohybový prvek se převážně používá např. píst, pružina atd., který má podobný úkol jako sval. U elektrických akčních členů není možná analogie připojení jako v předešlém případě. Více o samotných principech řešení v následujících odstavcích.

Mechanicky řízené technické systémy fungují na bázi pouze mechanických prvků bez jakékoliv jiné podpory. Nepotřebují tedy ke své funkci žádné kompresory nebo motory. Mechanickými členy jsou např. lanko, pružina apod. Příklad samotného řešení můžeme vidět na obr. 18, kde je pružina umístěna v analogické poloze bércevního svalu. Takové umístění pružiny nahrazuje nebo pomáhá při pohybu bércevního svalu. [15; 18]



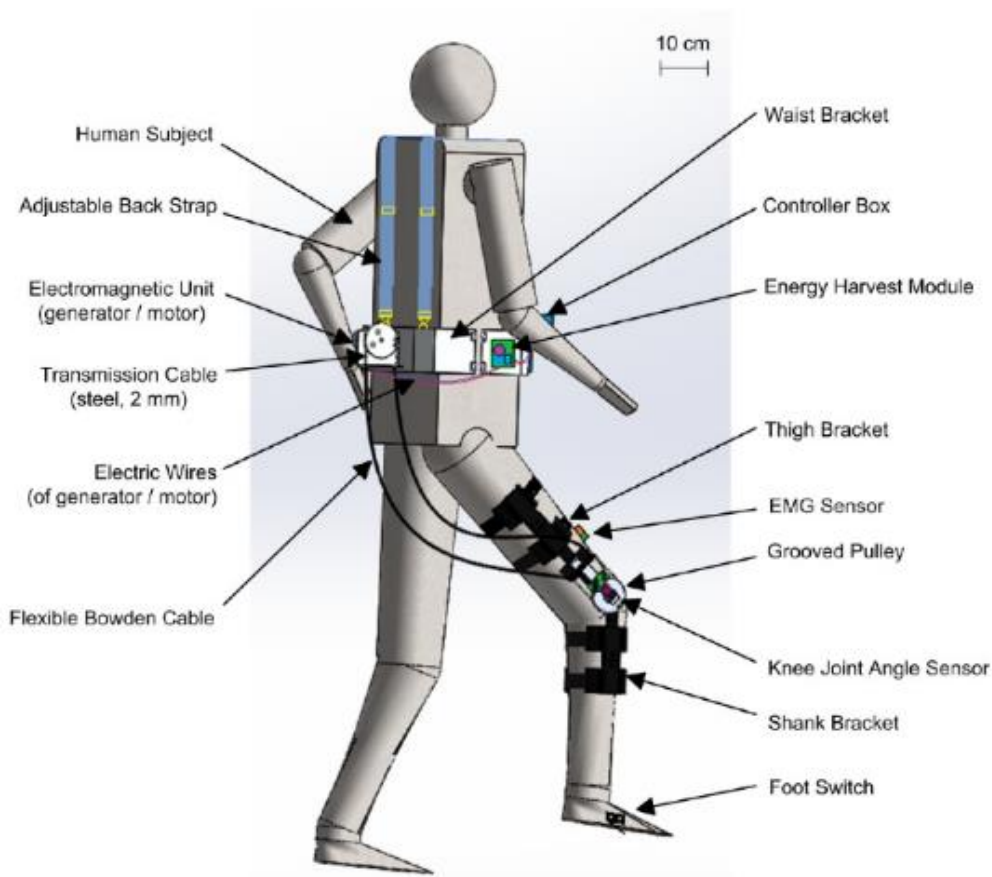
Obr. 18: Mechanicky řízený exoskeleton [18]

Dále je možné využít pneumaticky nebo hydraulicky poháněný exoskeleton. Tyto typy pohonů využívají různých členů k uvedení TS do pohybu (např. píst) viz obr. 19. Pohybové členy těchto pohonů jsou uchyceny k exoskeletonu velmi podobně jako u případu mechanických prvků. Toto je způsobeno požadavkem dosažení podobného pohybu. Příkladem může být umístění jednoho konce pístu u kotníku a druhého konce u bérce. Plynulé nastavení rychlostí a sil jsou výhodou pneumaticky řízených systémů. Nevýhodou může být hlučnost a potřeba mazání pístů, aby nedošlo k zadření samotného pístu v pístnici. Hydraulické členy disponují velkými silami při malém zástavbovém prostoru, který je při konstruování samotného exoskeletonu vyžadován z hlediska jednoduché a nerobustní konstrukce. Dalšími klady jsou přesnost řízení, regulace, vysoká nosnost a životnost. V porovnání s pneumatickými prvky i poměrně tichý chod. Záporné vlastnosti jsou vysoké pořizovací a provozní náklady, jelikož je zde velká citlivost k zanesení systému. U hydraulických obvodů dochází k velkému namáhání hadic tlakem. [15; 19]



Obr. 19: Exoskeleton s pístem [20]

Exoskeletony využívající elektrický pohon jsou navrženy, tak aby bylo možné uchycení elektromechanického akčního členu viz obr. 20. Rozdílem elektromechanického akčního členu je možnost umístění, které může být externí nebo dokonce zabudované v konstrukci samotného exoskeletonu. Akční členy toho typu se nejčastěji umísťují nad místo, které chceme ovládat. U těchto typů exoskeletonů je snadné využití snímacích prvků, které mohou předávat data do řídicí jednotky ohledně samotných pohybů exoskeletonu. V dnešní době je i možnost přenosu dat ze snímačů do telefonu uživatele. Mezi hlavní výhody těchto exoskeletonů patří jednoduchost řízení elektrického motoru nebo servomotoru, který dokáže natáčet klouby samotného exoskeletonu. Mezi další výhodou patří samotná cena elektromotoru. Záporom takto řešených exoskeletonů je nižší nosnost v porovnání s hydraulicky a pneumaticky řízenými exoskeletony. [15; 21]



Obr. 20: Elektomechanicky ovládaný exoskeleton [22]

7. Parametry populace

Z důvodu návržení vhodného exoskeletonu je nutná definice parametrů. K těmto parametrům neodmyslitelně patří výška a hmotnost. Je známo, že lidská populace během let stále roste. Za zmínku stojí, že Češi se řadí k nejvyšším v Evropě. Proto je nutné definovat limitní parametry, které budou klíčové pro návržení daného exoskeletonu. K definování parametrů byl využit výzkum populace nábytkářské firmy, která provedla měření z důvodu správné ergonomie výrobků. Z celkového výzkumu byly vybrány jen důležitá data pro návrh exoskeletonu a pro přehlednou orientaci byly vypsány do Tab 1. Zároveň byly využity data z měření motion capture, která detailně popisují pohyby subjektu. Z měření dále vychází technické řešení exoskeletonu, odkud je převzata kinematika pohybu.

Tab. 1: Výsledky měření populace podle nábytkářské firmy (upraveno) [15; 23]

	Aritmetický průměr	Medián	Dolní hranice (25. percentil)	Horní hranice (75. percentil)	Hodnota pod hranicí (3. Percentil)	Hodnota nad hranicí (97. Percentil)
Tělesná hmotnost [kg]	74,7	73,5	62,7	83,7	51,6	51,6
Tělesná výška [cm]	173,3	173,0	165,5	181,0	157,3	191,1
Výška kolene v sedě [cm]	53,0	52,6	50,1	55,2	46,7	59,5
Délka stehna k podkolení v sedě [cm]	49,0	48,9	47,0	50,8	44,2	54,7
Délka stehna ke koleni v sedě [cm]	60,1	60,2	57,9	62,2	54,3	66,8

Z průzkumu českého statického úřadu z roku 2018 vyšlo najevo, že až 18,5 % Čechů je ohroženo obezitou. Větší procento zaujímají muži, kteří konzumují menší množství ovoce a zeleniny než ženy. Výzkum zaměřený na BMI (index tělesné hmotnosti) dokázal, že 55,4 % Čechů má hodnotu indexu nad 25, což značí nadváhu. [23; 24; 25]

8. Praktická část

8.1. Úvod do problematiky

I přes značný technický pokrok je velice obtížné najít, ze zdravotnického hlediska pro tělesně postižené osoby, vhodné zařízení pro bezpečnou manipulaci. V současné době existuje na trhu mnoho přístrojů pro manipulaci s postiženými osobami či přístroje umožňující částečného navrácení pohybu pacienta. Velký rozvoj můžeme zpozorovat právě u exoskeletonů. Zatím je jejich využití převážně v armádě či průmyslu, ale své zastoupení začínají mít i ve zdravotnictví. Vývoj exoskeletonů pro zdravotnictví je velice dlouhý a náročný proces jak z hlediska bezpečnosti pacienta, tak z vytvoření konstrukce, která bude umožňovat přirozený neomezený pohyb a zároveň bude konstrukce finančně dostupná.

Právě z tohoto hlediska bude tato práce spíše úvodem do návrhu konstrukce exoskeletonu a popíše kroky nutné při správném návrhu. Tato práce přinese detailní řešení exoskeletonu pro dolní končetiny, kde bude brána v potaz i kinematika pohybu. Dále popíše možnost takzvaného stavebnicového exoskeletonu, kde exoskeleton umožní přizpůsobení konstrukce podle daného uživatele. Výsledné řešení navržených technických parametrů bude na závěr práce zhodnoceno.

Inovativní řešení stavebnicového exoskeletonu by mělo umožnit a ulehčit běžný život pacienta. Je velice důležité klást důraz na bezpečnost, jednoduchost a přijatelnou pořizovací cenu, neboť takové zařízení se na trhu doposud postrádá.

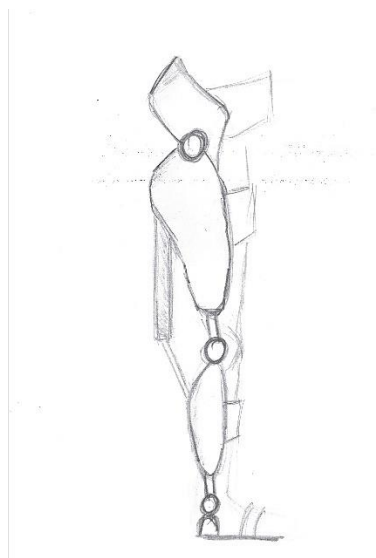
8.2. Cíl

Cílem je navrhnout konstrukci, která umožní a ulehčí běžné denní potřeby pacienta. Zároveň umožní pacientovi navrácení do běžného života a přinese jistou míru samostatnosti. Návrh přinese uživateli co nejvíce výhod. V případě ošetřovatelů přinese jednodušší manipulaci s pacientem.

8.3. Návrhy řešení

Při hledání inspirace byly využity vědecké články na téma exoskeletony. Dále byla převzata inspirace z exoskeletonů pro armádu či průmysl. V neposlední řadě byly převzaty nápady tvůrců sci-fi filmů a video her.

Na základě nabytých informací byly vytvořeny předběžné návrhy s nápady na řešení stavebnicového exoskeletonu. Součástí prvního návrhu byl exoskeleton pro dolní končetiny, který plní funkci díky mechanickému prvku, a to pístu. Píst je řízen pneumaticky, z hlediska jeho výhod oproti hydraulicky řízeným pístům. Pacient je připojen k exoskeletonu pomocí popruhů, které se přichytí pomocí suchého zipu. Následně si pacient může popruhy dotáhnout pomocí lanka, které je vedené v popruhách a utahovací kolečka. Tento princip je využíván například u bot na snowboard. Ukázka tohoto řešení je na obrázku č. 22. Stavebnicového efektu je zde docíleno pomocí nastavitelné trubky. Princip takového nastavení je možné vidět u francouzských holí, kde je možnost nastavení rukojeti. Jednoduchost provedení a nastavení tohoto exoskeletonu pro uživatele sebou přináší mnoho záporů. Z hlediska prostoru se jedná o robustnější konstrukci. Pneumaticky poháněné soustavy sice lépe zvládají vyšší zatížení, ale z hlediska stlačitelnosti plynu dochází k nerovnoměrným pohybům pístu. Pokud se zaměříme na bezpečnost uživatele jsou zde otevřené mechanické části, tudíž by mohlo dojít k poranění uživatele. Tato varianta byla zvolena za TSA neboli za konkurenční TS.

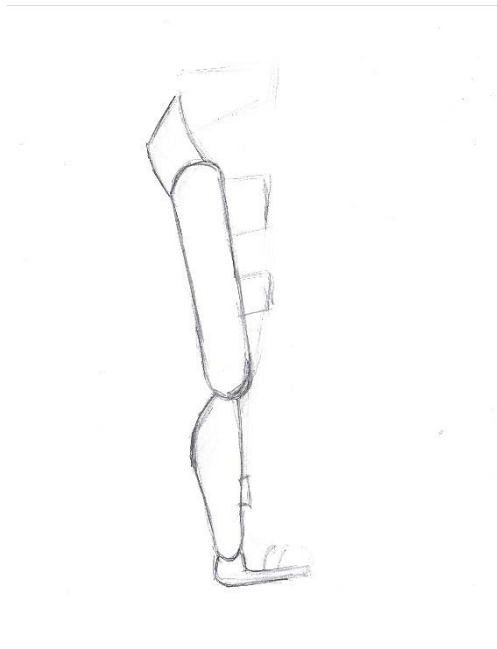


Obr. 21: Exoskeleton s pístem – návrh č.1



Obr. 22: Princip lanka s utahovacím kolečkem

Druhý exoskeleton působí na první dojem elegantněji než první návrh. Mechanické části jsou schované, a tudíž zde dochází k větší bezpečnosti vůči uživateli. Exoskeleton je v tomto případě řízen elektromechanickými akčními členy. Zdroj napájení je umístěn na zádech uživatele. Klouby jsou zde řízeny pomocí servomotorů. Nastavitelnost je zaručena pomocí trubky jako v prvním případě pouze s tím rozdílem, že jde je schovaná pod opláštěním. Nevýhodou tohoto exoskeletonu je těžký zdroj napájení a složitější nastavitelnost rozměrů kvůli samotnému opláštění. Uživatel musí nastavit rozměry před nasazením exoskeletonu. Velkou výhodou je zde možnost na programovatelnosti jednotlivých mechatronických součástí. Pacient je uchycen k exoskeletonu pomocí popruhů a utahovacího mechanismu jako v prvním případě. Tato varianta byla zvolena jako TS1, tedy navržený TS.



Obr. 23: Elektromechanický exoskeleton – návrh č.2

Třetí varianta exoskeletonu se designově a mechanicky od první varianty neliší. Pouze je rozdíl v řešení vnášené energie, která je zde zařízena pomocí hydraulického prvku. Tato varianta byla zvolena jako TS0, tedy výchozí TS.

Všechny návrhy jsou porovnány pomocí Inženýrsko-manažerské specifikace požadavků na konstrukční návrh technického systému.

8.4. Inženýrsko-manažerská specifikace požadavků na konstrukční návrh TS

Úvodem je dobré představit samotnou metodu Inženýrsko – manažerské specifikace požadavků na vlastnosti navrhovaného TS. Hodnotí se tři navržené TS mezi sebou v několika oddílech. Tyto oddíly zohledňují jak technickou stránku, tak například i návrh z hlediska patřičných norem. Hodnotí se zde celý životní cyklus daného TS. Pro každý parametr se zadává maximální možná váha. Podle uvážení, jak návrh splňuje daný parametr se každému TS přiřadí váha v rozmezí 0-4. Jednotlivé výsledky z daných oddílů se poté vykreslí do grafu, kde je možné porovnávat výsledky jednotlivých TS v samostatných oddílech. Podle toho vybrat neoptimálnějším TS.

RS&Ev :	INŽ-MANAŽ. SPECIFIKACE POŽADAVKŮ na vlastnosti (zakázky) navrhovaného TS(s)	HODNOCENÍ a vyhodnoc. vhodnosti vlastn. (zakázky) TS pro specifi. pož.												
	<small>inž.-manažerská specifikace požadavků a hodnocení porovnávaných TS se provádí jen na tomto listu</small>	<small>Stanovení mezi pro vyhodnocení vhodnosti tříd vlastností a metavlastností (zakázky) TS pro specifikované požadavky</small>												
	<small>Vzorec stanovení a rozložení hodnot EDW</small>	<small>[Hodn. mez. (0-4)]</small>												
TS(s) :	Konstrukční řešení stavebnicového systému exoskeletonu	TS0 - výchozí TS	TSA - konkurenční TS				TS1 - navržený TS							
		<small>Výchozí řešení</small>				<small>Konkurenční řešení</small>				<small>Definitivní řešení</small>				
Konstrukční proces :	<small>FÁZE KONSTRUKČNÍHO NÁVRHU TS DfO (bez PFO (Problem solving) EDW)</small>	<small>I. INŽENÝRSKO-MANAŽERSKÁ SPECIFIKACE 1.a inž.-manaž. specifikace požadavků na TS 4.a 50% předukoncování TS pro specif. požadavky</small>				<small>II. INŽENÝRSKO-MANAŽERSKÁ SPECIFIKACE 1.a inž.-manaž. specifikace požadavků na TS 4.a 50% předukoncování TS pro specif. požadavky</small>				<small>III. STAVEBNÍ KONSTRUKČNÍ NÁVRH 5. konstrukční návrh detailní specifikace detailů TS 5. 50% předukoncování TS pro specif. požadavky</small>				
Stav řešení :	<small>POTVRZENÍ PLATNOSTI ("RELEASE") VÝPRAC. HODNOCENÍ pro zobrazení řešení v diagramech a stáří vyzrát :</small>	<small>* Převzetí platnost zad. hodnocení [nezná.]</small>				<small>* Převzetí platnost zad. hodnocení [nezná.]</small>				<small>* Převzetí platnost zad. hodnocení [nezná.]</small>				
	<small>UPLNOST HODNOCENÍ (nezadává se, je výsledkem analýzy zadávaných hodnot! *)</small>	<small>** Porovnání hodnoc. u všech spec. požad. ?</small>				<small>** Porovnání hodnoc. u všech spec. požad. ?</small>				<small>** Porovnání hodnoc. u všech spec. požad. ?</small>				
	<small>Q02: Posuzovaná DESING-PRODUCT ("návrhová konstrukční") KVALITA (ZAKÁZKY) TS(s)</small>	<small>ODKAZEM OPTIC >>></small>	<small>DIAGRAMY OPTIC >>></small>	<small>4</small>	<small>2. VAŽ. VYHODNOCENÍ 0.00</small>	<small>V. VÝHOD 0.00</small>	<small>V. VÝHOD 0.00</small>	<small>3. VAŽ. VYHODNOCENÍ 0.00</small>	<small>V. VÝHOD 0.00</small>	<small>V. VÝHOD 0.00</small>	<small>4. VAŽ. VYHODNOCENÍ 0.00</small>	<small>V. VÝHOD 0.00</small>	<small>V. VÝHOD 0.00</small>	
	<small>1. Třída > 1j. Podtřída > 2. Větví skupina > Indikátory pož./vlastn.</small>	<small>Hodnota indikátor. pož./vlastn. [Lambertová / Lambertová]</small>	<small>Váha ve 0-50%</small>	<small>BAZISOVÝ EDW (F. >>></small>	<small>4</small>	<small>55.44</small>	<small>0.88</small>	<small>0.49</small>	<small>57.19</small>	<small>2.04</small>	<small>0.51</small>	<small>81.55</small>	<small>2.20</small>	<small>0.85</small>
	<small>I. DOMÉNA REFLEKTOVANÝCH (REFLECTED) VLASTNOSTÍ TS(s)</small>			<small>VÝHOD Q02</small>	<small>Předkování / změněná dožad. hodnota indikátoru pož./vlastn.</small>	<small>Hodnocení vhodnosti</small>	<small>Váž. vyhodn. vhodnosti</small>	<small>Předkování / změněná dožad. hodnota indikátoru pož./vlastn.</small>	<small>Hodnocení vhodnosti</small>	<small>Váž. vyhodn. vhodnosti</small>	<small>Předkování / změněná dožad. hodnota indikátoru pož./vlastn.</small>	<small>Hodnocení vhodnosti</small>	<small>Váž. vyhodn. vhodnosti</small>	
	<small>- ve vztazích k úsekům životního cyklu TS</small>													
	<small>1a. Reflektované vlastn. TS(s) k provoznímu Tech. transf. procesu vč. jeho Operandu</small>													
	<small>- k PROVOZNÍ ETAPĚ životního cyklu (LC) TS</small>													
	<small>Požadavky na vlastnosti (zakázky) TS(s)</small>	<small>Hodnota indikátor. pož./vlastn. [Lambertová / Lambertová]</small>	<small>Váha ve 0-50%</small>	<small>BAZISOVÝ EDW (F. >>></small>	<small>4</small>	<small>Předkování / změněná dožad. hodnota indikátoru pož./vlastn.</small>	<small>Hodnocení vhodnosti</small>	<small>Váž. vyhodn. vhodnosti</small>	<small>Předkování / změněná dožad. hodnota indikátoru pož./vlastn.</small>	<small>Hodnocení vhodnosti</small>	<small>Váž. vyhodn. vhodnosti</small>	<small>Předkování / změněná dožad. hodnota indikátoru pož./vlastn.</small>	<small>Hodnocení vhodnosti</small>	<small>Váž. vyhodn. vhodnosti</small>
	<small>1. Třída > 1j. Podtřída > 2. Větví skupina > Indikátory pož./vlastn.</small>													

Obr. 24: Úvodní oddíl specifikace požadavků TS

První byla hodnocena vhodnost pro požadované funkce a účinky exoskeletonu v oddílu vlastnosti TS k funkčnosti. Definovalo se několik bodů, které by měl výsledný TS splňovat. V této části hodnocení se objevila např. maximální nosnost, základní rozměry, rozsahy kloubových spojení atd. Také bylo nutné definovat limitující hodnoty u pacienta, které jsou maximální hmotnost a maximální váha. Veškeré specifikace na funkci TS a jejich hodnocení jsou vidět na obr. 25. [26]

1	Vlastnosti TSu k funkci (v provoz. etapě LC)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
1.1	Vhodnost pro požadované (pracovní a spojovací) funkce a účinky TS (nejednotlivěji k operátorovi, obecněji k operandům a k transf. procesům)	Váha v 1 (menší)	Délka pažeb (ISO 9000 2015)	Porovnatelnost požadavků	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení
k OPERÁTORU TS: Konstruktivní řešení stavebnicového systému exoskeletonu														
2. Vytvořit stavebnicový exoskeleton														
max. nosnost	130 kg	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
nastavitelnost exoskeletonu-dělníka	900 mm x 1500 mm	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
zajištění pacienta	ve všech směrech	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
3. Umožnit rotaci v kloubech														
rozsah úhlu - kyčelní kloub (maximum)	125°	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
rozsah úhlu - kolenní kloub (maximum)	140°	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
rozsah úhlu - hlezenní kloub (maximum)	30°	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
4. Umožnit změnu výšky ložné plochy														
rozsah vzdálenosti od podlahy	600 - 800 mm	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
5. Umožnit chůzi														
rychlost chůze	3 km/h	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
6. Umožnit provoz bez dodávání el. energie:														
provoz	12h	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
k OPERANDU: Pacient a asistující M, E, I														
7. Vlastnosti pacienta														
max. hmotnost	115 kg	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
max. výška	2000 mm	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
k TRANS. PROCESU: Chůze, stoj, sed														
8. Umožnit navrácení pacienta k běžnému životu														
Chůze	plynulá	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
Stoj	přizpůsobený	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
Sed	pohodlný	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4

Obr. 25: Požadované funkce TS

Dále v oddílu vlastnosti TS k funkčnosti byla hodnocena vhodnost k požadované provozuschopnosti. Zde se hodnotilo prostředí, kde bude exoskeleton využíván a také časové rozmezí použití TS. Za prostředí se uvažoval exteriér, kde je nutné podotknout, že se uvažuje rovinný pohyb. Dále se uvažoval domov a nemocnice.

1.2	Vhodnost k požadované provozuschopnosti (z hlediska místa, času, servisu, atp.):	Váha v 1 (menší)	Délka pažeb (ISO 9000 2015)	Porovnatelnost požadavků	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení
* Souhrnná specifikace												
MÍSTO a PROSTŘEDÍ: Domov pacienta, nemocnice, exteriér												
* Souhrnná specifikace												
Exteriér	rovinný povrch	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
Domov a nemocnice - podlahy	PVC, dlažba, dřevo	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
* Souhrnná specifikace												
ČASOVÉ ROZMEZÍ: Obvykle předpokládán pro navrhování tech. produkt												
* Souhrnná specifikace												
Životnost	5 let	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
intenzita používání	každodenní	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
etapy společlivosti	veliký	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
* Souhrnná specifikace												
ASIST. PROC. (čas): Obvykle předpokl. pro uved. místo, prostředí a čas. rozměr												
* Souhrnná specifikace												
náročnost na údržbu, atp.	pouze běžné odčítování	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
náročnost na opravy, atp.	velmi malá	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4

Obr. 26: Požadovaná provozuschopnost TS

V druhém oddílu byly hodnoceny vlastnosti TS k lidem v jednotlivých etapách životního cyklu. Jako první zde byla hodnocena vhodnost z hlediska hodnot lidí. Jedná se o hodnoty a názory, které jsou spojené s určitou životní nebo sociální etapou. V tomto oddílu je nejdůležitější zajištění vysoké kulturnosti žití pacienta a dopřát mu návrat k běžným lidským činnostem.

1b	Reflekt. vlast. TS, ke komplex. zobrazení operátorů transf. systémů (TrifS)	Váha v 1 (menší)	Délka pažeb (ISO 9000 2015)	Porovnatelnost požadavků	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přep. přímé hodnoc. u kvalit. osh (menší)	Hodnocení
* Souhrnná specifikace												
2.1 Vhodnost z hled. hodnot lidí (s zvířat, atp.)												
* Souhrnná specifikace												
3. Provoz												
* Souhrnná specifikace												
Kulturnost žití pacienta	vyšoká	4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4
* Všechny etapy LC												
zapoj. zdrav. postř. osob do vývoje, výroby, distrib. užiti, ...												
* Souhrnná specifikace												
přímětné k postřezení		4	ANO	ANO	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4	přímý kvalifik. odhad: 4	4

Obr. 27: Vhodnost TS z hlediska hodnot lidí

Dále v oddílu vlastnosti TS k lidem v jednotlivých etapách životního cyklu byla hodnocena vhodnost z hlediska bezpečnosti a zdraví lidí. Zároveň také vhodnost z hlediska příjemnosti. Zde byla řešena zdravotní nezávadnost materiálů TS, bezpečnost proti ublížení pacienta, bezpečnost proti nežádoucímu pohybu pacienta atd.

22. Vhodnost z hled. bezpečnosti a zdraví lidí (& zvířat, atp.)	Váha v 2 (metu)	Důvod (metu)	Porovnatelnost (metu)	Hodnota podle typu indikátoru, (př. přímé hodnoc. uň kvalif. och.)	Hodnocení (metu)	Hodnota podle typu indikátoru, (př. přímé hodnoc. uň kvalif. och.)	Hodnocení (metu)	Hodnota podle typu indikátoru, (př. přímé hodnoc. uň kvalif. och.)	Hodnocení (metu)
3. Předvýrobní etapy, výroba									
zdravotní nezávadnost materiálů TS	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
3. Provoz									
ovládání nastavení exoskeletonu	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
bezpečnost proti ublížení pacienta	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
ochrana proti nežádoucímu pohybu pacienta	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
nastavení exoskeletonu	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
umístění ovládacích prvků	4	ZÁVAŽNE	ANO	4	4	4	4	4	4
povrch dotykových prvků	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
stabilita, omyvatelnost, desinfikovatelnost	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
3. Všechny etapy LC									
zdravotní nezávadnost sestavených materiálů	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
bezpečnost proti poranění (ostré hrany, úzké otvory, ap.)	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
ergonomie hrani ručně dotykaných ploch	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
hmotnost vůči manipulovaným přístrojům/dílům	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
max. ovládací síly s výř. provozu	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
X M E (negativní účinky) TS na zdraví člověka	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
2.2. Vhodnost z hled. příjemnosti pro lidi (& zvířata, atp.)									
Vhodn. - Hlučn. - Pach - Hmot. - Chuf. - ap. (pro znak, sluch, hmat, ůch, chuf, poty, atp.)									
3. Provoz, ost. etapy LC priměřené									
hravý design	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
barvový design	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
hlučn.	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
dotyky, vůně	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4

Obr. 28: Vhodnost z hlediska bezpečnosti a zdraví lidí/příjemnosti pro lidi

Ve třetím oddílu byly hodnoceny vlastnosti TS k ostatním hmotným pracovním prostředkům. Hodnocení vztaheno jak na dostupné hmotné pracovní prostředky, tak i na nové. Hodnotil se jak samotný vývoj, výroba, distribuce, tak i likvidace TS.

3. Vlastnosti TS vůči ostatním hmotným pracovním prostředkům v etapách LC	Váha v 2 (metu)	Důvod (metu)	Porovnatelnost (metu)	Hodnota podle typu indikátoru, (př. přímé hodnoc. uň kvalif. och.)	Hodnocení (metu)	Hodnota podle typu indikátoru, (př. přímé hodnoc. uň kvalif. och.)	Hodnocení (metu)	Hodnota podle typu indikátoru, (př. přímé hodnoc. uň kvalif. och.)	Hodnocení (metu)
2.1. Vhodnost z hled. dostupnosti hmotných pracovních prostředků									
Výkonnostní a dostup. a spolupracovníci hmot. prac. prostředky (i "technologičnost", atp.)									
3. Předvýrobní etapy LC									
národnost na dostupné TS & Tg	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
3. Výroba									
národnost na výrobu a montáž	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
národnost na kontrolu kvality výroby a testování	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
druh výroby	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
3. Distribuce									
skladovací prostor	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
manipulace při dopravě a instalaci	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
dopravní prostředky	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
3. Likvidace									
demonovatelnost	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
separovatelnost materiálů	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
recyklovatelnost materiálů	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4
2.2. Vhodnost z hled. potřeb nových hmotných pracovních prostředků									
Odporn. národnost na nové hmot. prac. prostředky (dostupnost, nenákladnost, atp.)									
3. Všechny etapy LC									
národnost na nové TS & Tg (vč. kooperaci)	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4

Obr. 29: Vlastnosti TS k ostatním hmotným pracovním prostředkům

Ve čtvrtém oddílu byly hodnoceny vlastnosti TS k pracovním, přírodním a vesmírným prostředkům. Zde byla řešena odolnost materiálů vůči působení prostředí nebo také ekologičnost materiálů v TS.

Požadavky na vlastnosti (základní) (TS) s	Hodnota indikátoru, (př. přímé hodnoc. uň kvalif. och.)	Váha ve třídě (metu)	Důvod (metu)	Porovnatelnost (metu)	Hodnota podle typu indikátoru, (př. přímé hodnoc. uň kvalif. och.)	Hodnocení (metu)	Vážená vhodnost	Předkládání / zřejmý desář hodnota indikátoru, (př. přímé hodnoc. uň kvalif. och.)	Hodnocení (metu)	Vážená vhodnost	Předkládání / zřejmý desář hodnota indikátoru, (př. přímé hodnoc. uň kvalif. och.)	Hodnocení (metu)	Vážená vhodnost	Předkládání / zřejmý desář hodnota indikátoru, (př. přímé hodnoc. uň kvalif. och.)	Hodnocení (metu)	Vážená vhodnost	
4. Vlastnosti TS vůči pracovním, přírodním a vesmírným prostředkům v et. LC																	
Vhodnost z hled. působících pracovních, přírodních a vesmírných prostředí																	
3. Všechny etapy LC																	
odolnost proti vlivům pracovního prostředí	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
odolnost proti koroz.	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4.2. Vhodnost z hled. působení na pracovní, přírodních a vesmírných prostředkích																	
Ekologičnost materi. energetických vstupů - Ekologičnost materi. energet. výstupů, atp.																	
3. Všechny etapy LC																	
ekologičnost použitých materiálů a procesů	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ekologičnost použitých energetických materiálů a procesů	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
potřeba materiálů a energií	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ekologičnost výstupních materiálů a energií	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
množství odpadových materiálů a energií	4	STAVU VZD	ANO	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Obr. 30: Vlastnosti TS k pracovním, přírodním a vesmírným prostředkům

V pátém oddílu byly hodnoceny vlastnosti TS k „know-how“ informacím. Hodnocena byla legislativa, závazné předpisy včetně bezpečnostních norem. Dále také rozsah jednotlivé dokumentace.

5 Vlastn. TSu k „know-how“ inf. (oob. technologičn.) v eLC	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.1 Vhodnost z hled. ustálených „know-how“ odborných informací	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
5.2 Vhodnost z hled. proměnlivých „know-how“ odborných informací	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
5.1 Všechny etapy LC	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5.2 Vyroba	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5.3 Provoz	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5.4 Likvidace	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CELKOVÝ VÝSLEDKOVÝ INDEX	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CELKOVÝ VÝSLEDKOVÝ INDEX (s vlivem TS)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
CELKOVÝ VÝSLEDKOVÝ INDEX (s vlivem TS a nákl.)	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67

Obr. 31: Vlastnosti TS k „know-how“ informacím

V šestém oddílu byly hodnoceny vlastnosti TS k „know-SMQ“ informacím. Hodnocena byla legislativa, závazné předpisy, patentová a licenční práva. Bezpečnost produktů byla hodnocena podle normy ČSN EN 6060.

6 Vlastn. TSu k „know-SMQ“ inf. (manaz. technologičn.) v eLC	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.1 Vhodnost z hled. ustálených „know-SMQ“ manaz. informací	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
6.2 Vhodnost z hled. proměnlivých „know-SMQ“ manaz. informací	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
6.1 Všechny etapy LC	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
6.2 Vyroba	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
6.3 Provoz	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
6.4 Likvidace	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CELKOVÝ VÝSLEDKOVÝ INDEX	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CELKOVÝ VÝSLEDKOVÝ INDEX (s vlivem TS)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
CELKOVÝ VÝSLEDKOVÝ INDEX (s vlivem TS a nákl.)	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59

Obr. 32: Vlastnosti TS k ustáleným „know-SMQ“ informacím

Kromě předešlého byla v šestém oddílu hodnocena doba a peněžní ohodnocení výroby, distribuce, provozu a likvidace TS.

6.2 Vhodnost z hled. proměnlivých „know-SMQ“ manaz. informací	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.2.1 Vhodnost z hled. ustálených „know-SMQ“ manaz. informací	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
6.2.2 Vhodnost z hled. proměnlivých „know-SMQ“ manaz. informací	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
6.2.1 Všechny etapy LC	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
6.2.2 Vyroba	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
6.2.3 Provoz	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
6.2.4 Likvidace	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CELKOVÝ VÝSLEDKOVÝ INDEX	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CELKOVÝ VÝSLEDKOVÝ INDEX (s vlivem TS)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
CELKOVÝ VÝSLEDKOVÝ INDEX (s vlivem TS a nákl.)	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66

Obr. 33: Vlastnosti TS k proměnlivým „know-SMQ“ informacím

V sedmém oddílu byla hodnocena vhodnost z hlediska požadovaných reaktivních vlastností TS.

7 Vlastn. TSu k jeho strukture	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.1 Vhodnost z hled. požadovaných reaktivních (obecných) vlastností TS	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
7.2 Vhodnost z hled. požadovaných reaktivních (specifických) vlastností TS	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
7.1 Všechny etapy LC	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
7.2 Vyroba	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
7.3 Provoz	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
7.4 Likvidace	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CELKOVÝ VÝSLEDKOVÝ INDEX	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CELKOVÝ VÝSLEDKOVÝ INDEX (s vlivem TS)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CELKOVÝ VÝSLEDKOVÝ INDEX (s vlivem TS a nákl.)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Obr. 34: Vhodnost z hlediska požadovaných reaktivních vlastností TS

Kromě předešlého byla v sedmém oddílu hodnocena vhodnost z hlediska požadovaných architekturních vlastností TS. Zde bylo řešeno konstrukční provedení spojovaných částí. Povrchové úpravy funkčních a nefunkčních ploch. Dále byla hodnocena vhodnost z hlediska požadovaných znakových vlastností. Kde byla hodnocena energie pro ovládání, pohon a zdroj energie. Prvních sedm oddílů spadá do skupiny posuzování TS z hlediska kvality.

L2. Vhodnost z hled. požadovaných architekturních vlastností				Váha v Z	Důvod	Porovnatelnost	Hodnota podle typu indikátoru, přto přímé hodnoc. u kvalit. och.	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přto přímé hodnoc. u kvalit. och.	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přto přímé hodnoc. u kvalit. och.	Hodnocení
+ Stavební struktura -Prvky (tvary, rozměry, materiály, způsob výroby, stavby povrchu, -odstřihy od př.stavů), -Uspořádání (ve všech případech konstr. stavech)				[mens]	[mens]	ANO	---	---	---	---	---	---
+ Organová struktura -Prvky -Uspořádání				---	---	---	---	---	---	---	---	---
+ Funkční struktura -Prvky -Uspořádání				---	---	---	---	---	---	---	---	---
+ Poziční struktura (žemě nářadí) -Znakové vlastnosti TS				---	---	---	---	---	---	---	---	---
* Souhrnná specifikace				---	---	---	---	---	---	---	---	---
konstrukční provedení spojovacích částí				4	ANO	ANO	2	0,68	3	0,68	3	0,71
povrchová úprava funkčních ploch				4	ANO	ANO	4	---	4	---	4	---
povrchová úprava nefunkčních ploch				4	ANO	ANO	3	---	3	---	3	---
* Souhrnná specifikace				---	---	---	---	---	---	---	---	---
L3. Vhodnost z hled. požadovaných znakových vlastností (charakteristik) Pracovní (funkční) znaky TS				Váha v Z	Důvod	Porovnatelnost	Hodnota podle typu indikátoru, přto přímé hodnoc. u kvalit. och.	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přto přímé hodnoc. u kvalit. och.	Hodnocení	Hodnota podle typu indikátoru, přto přímé hodnoc. u kvalit. och.	Hodnocení
+ Pracovní princip, + Pracovní způsob, ... atp.				[mens]	[mens]	ANO	---	---	---	---	---	---
Technologické (transformační) znaky TS				---	---	---	---	---	---	---	---	---
+ Tg princip & způsob, - Princip & způsob provozního technického transform. procesu, atp.				---	---	---	---	---	---	---	---	---
Obecné konstrukční (mech., tepelné, chemické, atp.) znaky TS				---	---	---	---	---	---	---	---	---
+ Průmysl, + Základ, + Vlastnosti, + Průmysl, atp.				---	---	---	---	---	---	---	---	---
* Souhrnná specifikace				---	---	---	---	---	---	---	---	---
funkční princip				4	ANO	ANO	1	---	1	---	1	---
energie pro ovládání a pohon/přestavování				4	ANO	ANO	1	---	1	---	1	---
zdroj energie pro ovládání a pohon/přestavování				4	ANO	ANO	1	---	1	---	1	---
* Souhrnná specifikace				---	---	---	---	---	---	---	---	---

Obr. 35: Vhodnost z hlediska požadovaných architekturních/požadovaných znakových vlastností TS

Předposlední skupina se zaměřuje na hodnocení doby na TS. Hodnotila se zde doba na prototyp, která je z důvodu zlepšení všech nedostatků delší než doba na další kusy TS.

L2a. Vynaložení DESING-PRODUCT ("návrhová/konstrukční") DOBA na (ZAKÁZKU) TS ₀		DIAGRAMY	DIAGRAMY	OPPC	OPPC	OPPC	OPPC	OPPC	OPPC	OPPC	OPPC	OPPC
+ Titule >) Početná >) Všechna skupina > Indikatory poř.vlastn.		Hodnota indikátoru poř.vlastn. [kvantitativní / kvalitativní]	Váha v Z	Důvod	Porovnatelnost	ANO	4	8,00	2,00	0,60	10,00	0,63
* Vlastnosti (zakázky) TS (k) i vynalož. DESIGN-PRODUCT ("návrh.konstrukční") DOBĚ		Váha	Důvod	Porovnatelnost	ANO	4	10,00	2,50	0,63	12,00	3,00	0,75
+ Vzhledně dle a celk. dos. termíny (dosy, přto termíny), + Vlastnosti na nepřesnosti zářezů, atp.		Váha	Důvod	Porovnatelnost	ANO	4	10,00	2,50	0,63	12,00	3,00	0,75
* Předvýrobní etapy LC TS a výroba TS (" viz 6.2)		max. dodací doba => termín) na prototy / první kus (T1 D-P)	15 dní	ANO	ANO	4	10,00	2,50	0,63	12,00	3,00	0,75
max. dodací doba => termín) na další kus (T 6-P)		7 dní	ANO	ANO	ANO	4	10,00	2,50	0,63	12,00	3,00	0,75

Obr. 36: Vhodnost pro vynaloženou návrhovou/konstrukční dobu

Poslední skupina se zaměřuje na hodnocení nákladů na TS. Zde je také patrný rozdíl mezi náklady na prototyp a náklady na další kus. Vyšší cena u prototypu je z důvodu prodloužení výroby, kdy pracovník se musí seznámit s novými výkresy atd. Dále je zde zřejmé prodloužení doby výroby z důvodu oprav vzniklých nedostatků.

L2a. Vynaložení DESING-PRODUCT ("návrhová/konstrukční") NÁKLADY na (ZAKÁZKU) TS ₀		DIAGRAMY	DIAGRAMY	OPPC	OPPC	OPPC	OPPC	OPPC	OPPC	OPPC	OPPC	OPPC
+ Titule >) Početná >) Všechna skupina > Indikatory poř.vlastn.		Hodnota indikátoru poř.vlastn. [kvantitativní / kvalitativní]	Váha v Z	Důvod	Porovnatelnost	ANO	4	10,00	2,50	0,63	12,00	3,00
* Vlastnosti (zakázky) TS (k) i vynalož. DESIGN-PRODUCT ("návrh.konstrukční") NÁKLADŮM		Váha	Důvod	Porovnatelnost	ANO	4	10,00	2,50	0,63	12,00	3,00	0,75
+ Vzhledně dle a celk. dos. náklady (termíny, ...), + Náklady na nepřesnosti zářezů, atp.		Váha	Důvod	Porovnatelnost	ANO	4	10,00	2,50	0,63	12,00	3,00	0,75
* Předvýrobní etapy LC TS a výroba TS (" viz 6.2)		dodací náklady na prototyp/ první kus (C1 D-P)	2 300 000 Kč	ANO	ANO	4	10,00	2,50	0,63	12,00	3,00	0,75
dodací náklady na další kus (C2 D-P)		2 000 000 Kč	ANO	ANO	ANO	4	10,00	2,50	0,63	12,00	3,00	0,75

Obr. 37: Vhodnost pro vynaložené návrhové/konstrukční náklady

Řešení bylo vypracováno s využitím SW podpory RS&Ev v.EDD [Hosnedl&al 2022] (viz PŘÍLOHA 1).

8.4.1. SWot hodnocení vhodnosti výchozího a konkurenčního TS pro specifikované požadavky

Vhodnost TS pro EDM třídy Q_{D-P} požadavků vyhodnocené pro všechny specifikované požadavky jsou znázorněny na obr 38. Na obrázku jsou patrné jednotlivé oddíly a výsledky TS0, TSA a TS1. Ideální stav v jednotlivých oddílech je vyznačen černou horizontálou. Z obrázku je patrné, že neoptimálnější řešení je TS1 neboli navržený TS.

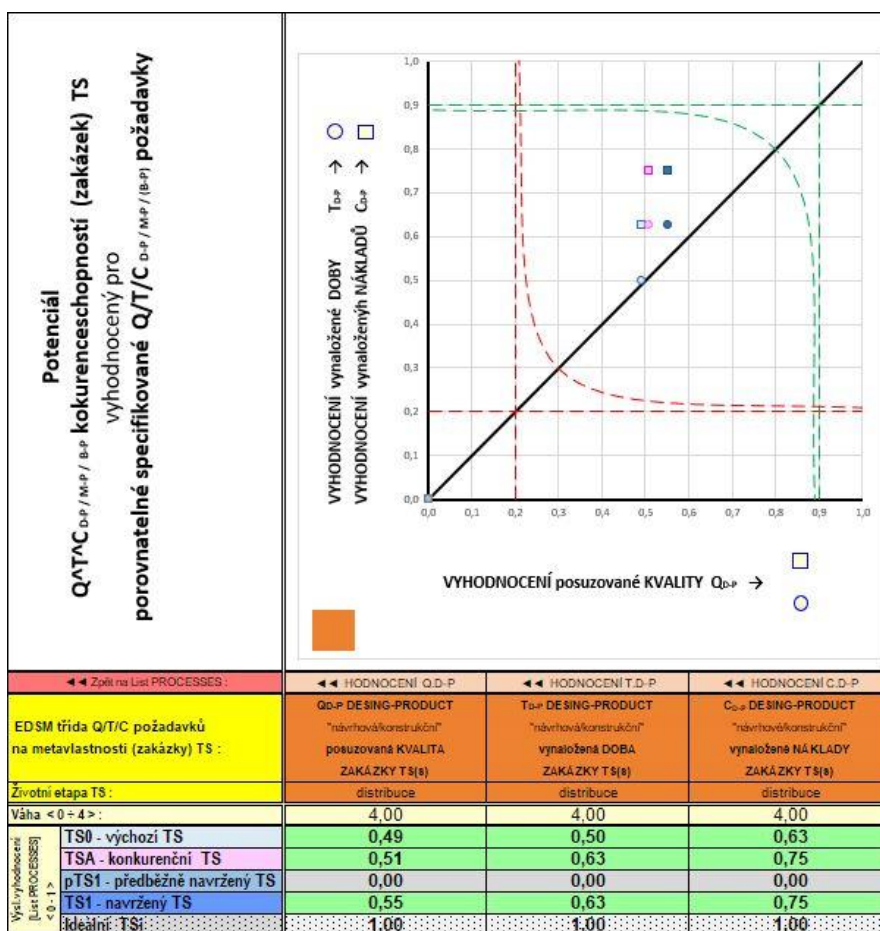


Obr. 38: SWot vhodnost posuzovaných (zakázek) TS pro EDM třídy QD-P požadavků

Řešení bylo vypracováno s využitím SW podpory RS&Ev v.EDD [Hosnedl&al 2022] (viz PŘÍLOHA 1).

8.4.2. SWot hodnocení potenciálu konkurenceschopnosti výchozího a konkurenčního TS

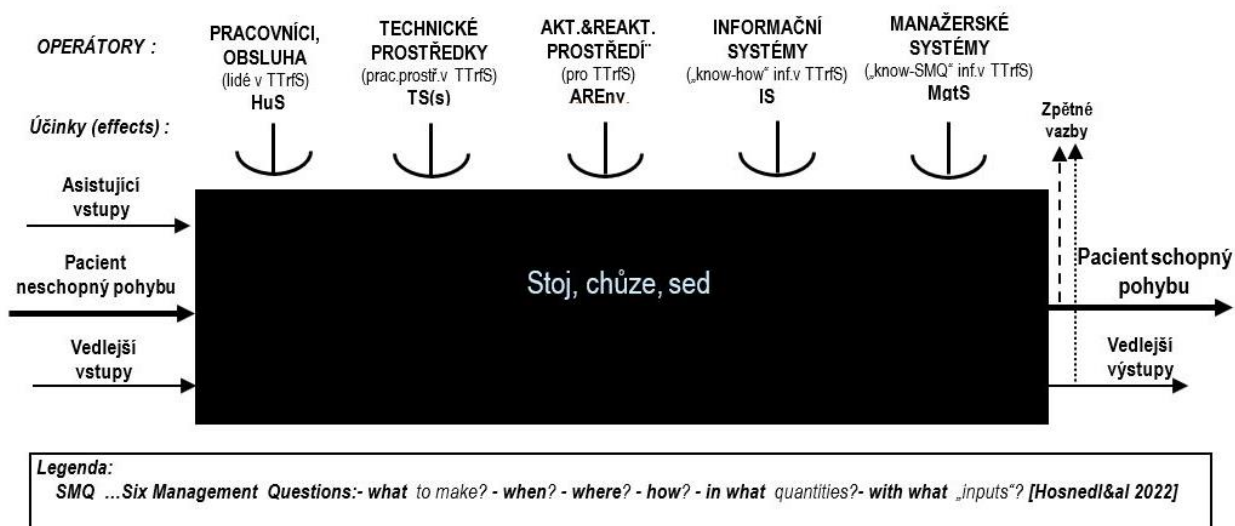
Jako v předchozí podkapitole bylo hodnocení vypracováno s využitím SW podpory RS&Ev v.EDD [Hosnedl&al 2022]. Podle vyhodnocení posuzované kvality se nachází vhodný návrh v horní polovině grafu a dále leží na přímce. Z obrázku je vidět, že jako vhodný návrh z hlediska vynaložené doby a nákladů vychází TS1.



Obr. 39: Potenciál Q^AT^AC D-P konkurenceschopnosti posuzovaných TS vyhodnocený pro porovnatelné Q/T/C D-P požadavky na navrhovaný TS

8.5. Návrh funkční struktury

V této kapitole byly definovány jednotlivé vstupy a výstupy do transformačního procesu. Jako vstup do transformačního procesu byl definován pacient neschopný pohybu. Za transformační proces byl definován stoj, chůze a sed. Výstup z transformačního procesu byl definován jako pacient schopný pohybu. Tato černá skříňka pomohla k seskupení základních požadavků na TS.



Obr. 40: Černá skříňka technického transformačního procesu (TTrf) provozu navrhovaného TS

Řešení bylo vypracováno s využitím SW podpory RS&Ev v.EDD [Hosnedl&al 2022].

8.6. Úvod do měření pomocí systému motion capture

Zdokumentování lidského pohybu hraje velkou roli v mnoha odvětví. Příkladem mohou být zdravotnictví, sport, virtuální realita nebo dokonce zábava. Ve zdravotnictví se jedná o diagnostiku pohybu pacienta a následnou léčbu. Pokud se zaměříme na virtuální realitu a zábavu jedná se převážně o animaci 3D postav ve filmech nebo hrách. Příkladem je obrázek 41, který znázorňuje využití technologie motion capture k vytvoření animované postavy. Ve sportu se měření pohybu používá k prevenci vzniku zranění a zlepšení sportovních výkonů.

Techniky, jak získat data o pohybu jsou převážně optické. Využívá se několika speciálních kamer k určení samotného prostoru pro nahrávání. K zachycení pohybu se používají značkovací systémy tzv. markery. Markery se připevní na klouby, v tomto případě na kyčelní, kolenní a hlezenní kloub, a následně se sleduje poloha markeru pomocí kamery. Markery se uvažují jako pasivní prvek a reprezentují pohyb daného kloubu v prostoru. Pro zajištění správnosti nahrávaných dat se umísťují markery v párech. To je z důvodu, pokud by došlo k zastínění jednoho markeru, kamery stále snímají druhý marker. Všechno zmíněné se děje bez ohledu na složitost lidského pohybu.



Obr. 41: Využití motion capture ve filmu [19]

8.7. Příprava před měřením

Před samotným měřením je nutné provést nemnoho kroků, které lze zařadit do několika větších skupin. Tyto skupiny jsou: příprava systému a kalibrace, příprava subjektu a kalibrace, samotné natáčení, čištění dat a export dat. V této práci bude detailně popsána skupina příprava subjektu a kalibrace.

8.7.1. Příprava subjektu a kalibrace

Pro návrh rozložení markerů na subjektu byl využit konvekční model CGM2 vyvinutý Dr. Fabienem Leboeufem, který je vyzkoušený a výsledky měření mají vyhovující výstup. Na subjekt bylo použito rozložení markerů pro horní i dolní končetiny. To vše z důvodů zaznamenání pohybu jako celek, jak a kde vzniká samotná chůze. Markery umístěné na vrcholcích pánve a kolene určují stehenní kost. Z důvodu rozlišení kosti byl umístěn marker doprostřed stehenní kosti. Markery na kolene udávají začátek lýtkové a holenní kosti a zakončují ji markery umístěné na kotníku. Ze stejného důvodu jako u stehenní kosti, byl umístěn marker i doprostřed lýtkové kosti. Markery umístěné na patě a článku prstu určují velikost nohy. Ohyb nohy je definován markery umístěnými na nártních kůstkách a článku prstu. Veškeré markery jsou vidět na obrázku 42 a 43.



Obr. 42: Příprava subjektu na měření



Obr. 43: Detailní záběr na rozložení markerů na dolních končetinách

Před samotným nahráváním je nutné definovat maximální pohyb a markery na těle subjektu. V praxi to znamená, že subjekt poskakuje, zvedá horní a dolní končetiny. Samotný software si pro každý marker stanoví jeho polohu a dále ho pojmenuje. Pro uživatele je poté snadná kontrola při nahrávání, kdy se kontroluje, aby markery nepřeskakovaly na jiná neočekávaná místa.

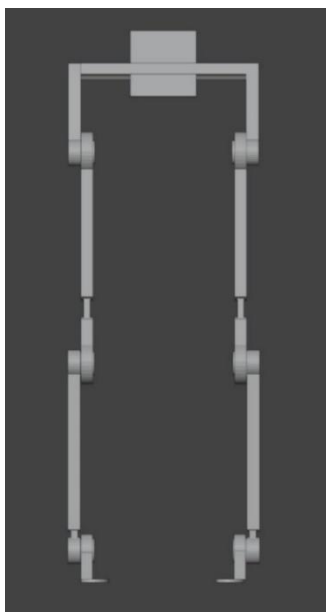
8.8.Scénář měření

Subjekt zaujal polohu ve stoji s rozpaženýma rukama v měřeném prostoru po dobu několika sekund. To vše z důvodu získání neutrální polohy kloubů pomocí upevněných markerů. Subjekt byl dále vyzván k provedení chůze. Následně byly zaznamenány limitní polohy kloubů. Subjekt byl vyzván k flexi a k extenzi v kyčelním kloubu (viz obr. 17). Dále byly zaznamenány polohy kloubů při sedu. To vše z důvodu navržení exoskeletonu, který nebude uživatele omezovat v přirozených pohybech.

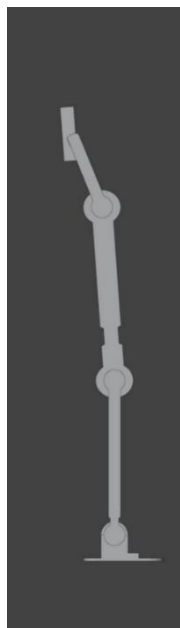
8.9. Blender

Blender je software, který se používá k vytváření vizuálních efektů, animovaných filmů a pohyblivé grafiky.

V této práci byl Blender využit ke zpracování dat z motion capture. Následně k pracovnímu návrhu TS, který vyhovuje požadovaným pohybům. Výsledný pracovní návrh TS vychází z kinematiky pohybů z měření motion capture. Tento krok byl využit z důvodu kontroly případné kolize jednotlivých částí exoskeletonu při požadovaných pohybech. Na obr. 44 je možné vidět nárys pracovního návrhu TS exoskeletonu a dále na obr. 45 je vidět bokorys daného TS.



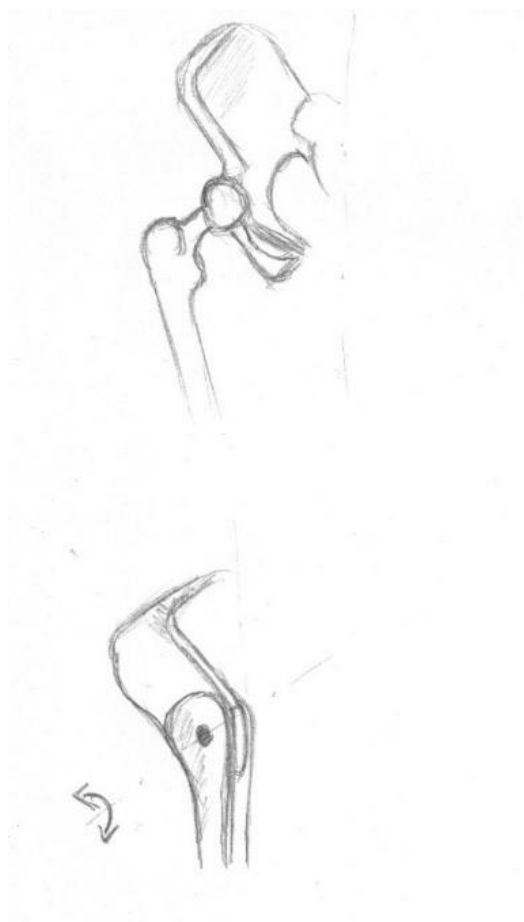
Obr. 44: Pracovní návrh TS – nárys



Obr. 45: Pracovní návrh TS – bokorys

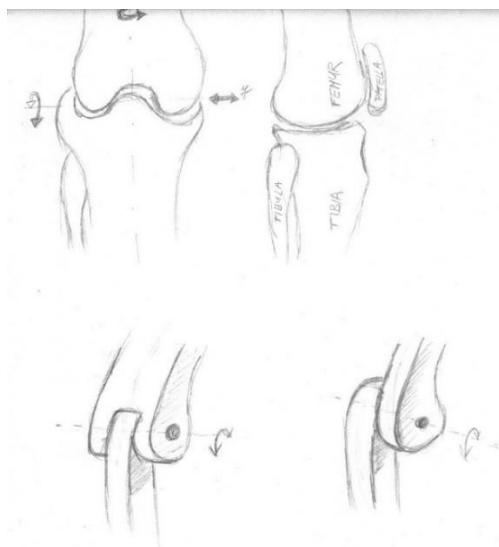
8.10. Konstrukční návrhy jednotlivých kloubů

Při řešení této kapitoly byly využity znalosti anatomie jednotlivých kloubů. To vše z důvodu zachování jednoduchosti a dokonalosti samotného kloubu z hlediska fungování v lidském těle. Kyčelní kloub vzniká pohyblivým spojením kosti stehenní a pánevní. Jak bylo zmíněno v teoretické části kloub kyčelní má tři stupně volnosti. V konstrukci exoskeletonu se bude uvažovat jen jeden stupeň volnosti, a to rotace kolem osy kloubového spojení viz obr. 46. Tato restrikce vznikla z důvodu uvažování jak pohyblivosti, tak zabezpečení dostatečné opory pro daného pacienta. Toto řešení zajistí tudíž pacientovi důležité možnosti pohybu pro navrácení do běžného života. A to tedy chůzi, sed a postoj. Zároveň ve zbylých osách nebude docházet k rotaci a ani k posunutí, tedy konstrukce zajistí požadovanou tuhost opory pro pacienta.



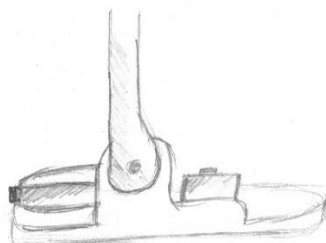
Obr. 46: Skica kyčelního kloubu – konstrukční řešení

Kolenní kloub má dva stupně volnosti. Jako u předchozího řešení se technické řešení inspirovalo anatomii kolenního kloubu. Do kolenního kloubu vstupují dvě kosti, a to kost stehenní a kost holenní. Uvažován byl pouze ohyb, který umožní uživateli chůzi, postoj a sed. Posunutí v osách nebylo uvažováno z důvodu zabezpečení dostatečné opory pro daného pacienta. V tomto případě byly navrženy dvě varianty řešení kolenního kloubu. První vychází přímo z anatomie kloubu. V jedné části konstrukce, reprezentující stehenní kost, je vytvořena drážka, do které zapadne protikus. Toto řešení by mohlo ve výsledné konstrukci působit robustně. Z důvodu požadavku na vytvoření minimalistické a jednoduché konstrukce byla vybrána druhá varianta.



Obr. 47: Skica kolenního kloubu – konstrukční řešení

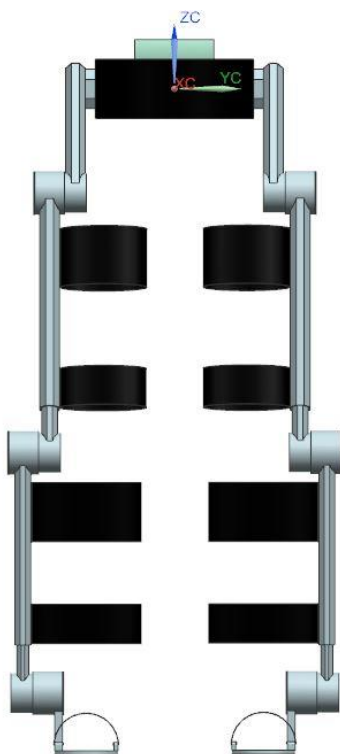
Poslední typ řešeného kloubového spojení je hlezenní kloub. Hlezenní kloub vzniká spojením tří kostí. Pro zjednodušení samotné konstrukce byl uvažován jeden stupeň volnosti. Vytvořená podrážka bude tuhá a nepohyblivá. To vše z důvodu zajištění opory pro daného uživatele. U tohoto kloubu budou zároveň dva popruhy na suchý zip, které se dále dotáhnou pomocí lanka. Lanko bude vedené v samotném popruhu a bude se snadno utahovat pomocí kolečka na popruhu.



Obr. 48: Skica hlezenního kloubu – konstrukční řešení

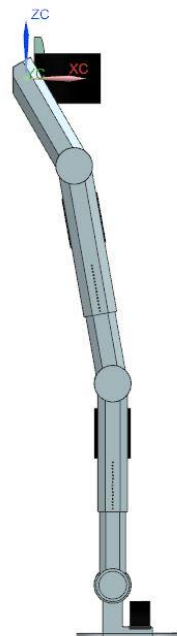
8.11. Konstrukční řešení v Siemens NX

Při řešení konstrukčního návrhu exoskeletonu v softwaru Siemens NX bylo využito předchozích řešení. Tedy pracovního návrhu TS z Blender a řešení jednotlivých kloubových spojení. Konstrukční řešení exoskeletonu bylo řešeno za předpokladu dodržení všech požadavků na daný TS. Tedy dodržení jednoduchosti konstrukce s respektováním bezpečnostních požadavků. Dále konstrukční řešení musí splňovat stavebnicový charakter TS. Principu nastavitelnosti bylo dosaženo pomocí dvou profilů. Jedním profilem většího průřezu, do kterého se vsouvá druhý profil menšího průřezu. Možnost nastavení je jak u části zaručující oporu pro stehenní kost, tak u části zajišťující oporu pro lýtkovou kost. Minimální rozměry exoskeletonu činí 900 mm a maximální 1500 mm. Konstrukce exoskeletonu je navržena na maximální hmotnost uživatele 130 kg. V návrhu exoskeletonu jsou vymodelovány taktéž bezpečnostní popruhy, které slouží k aretaci pacienta k exoskeletonu. Z důvodu, co největší komfortnosti a bezpečnosti uživatele byly zvoleny vždy dva popruhy na konstrukci kopírující dlouhé kosti. Dále se na konstrukci nachází bederní popruh a popruh přes nohu. Z důvodu co největšího pohodlí pro uživatele byla v modelu uvažována i ergonomická podložka kopírující anatomický tvar páteře. Díky ní se vytvořil i prostor na umístění zdroje napájení. Zdroj napájení je tedy umístěn v úrovni těžiště uživatele a je umístěn z druhé strany ergonomické podložky. Celkový model exoskeletonu je vidět na obr. 49. Konstrukční řešení bylo zhotoveno s pomocí strojnických tabulek. [27]

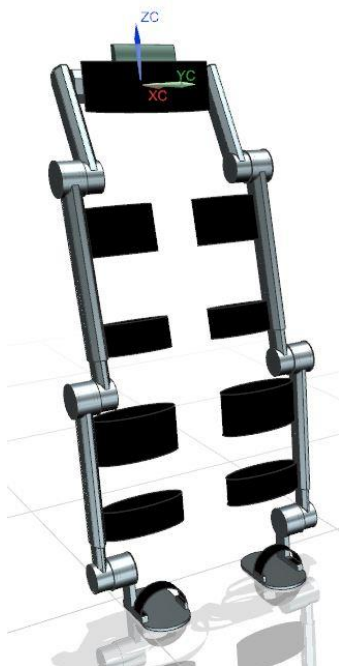


Obr. 49: Konstrukční návrh exoskeletonu – nárys

Na obr. 50 je možné vidět konstrukční řešení exoskeletonu z bokorysu. Řešení exoskeletonu pohlíželo i na správný a přirozený postoj člověka. Přirozený postoj není přímý, ale dochází k jistému pokrčení v kolenou. Především pokud se člověk propíná v kolenech dochází k tzv. uzamčení a je vytvářen obrovský tlak na samotný kloub. Na obr. 51 je možné vidět exoskeleton v 3D pohledu.

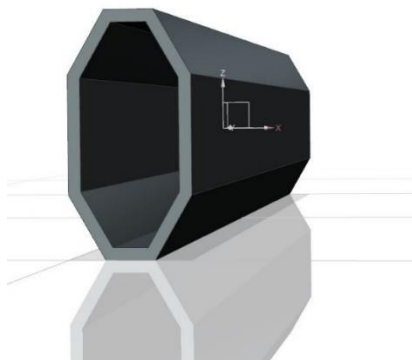


Obr. 50: Konstrukční návrh exoskeletonu – bokorys



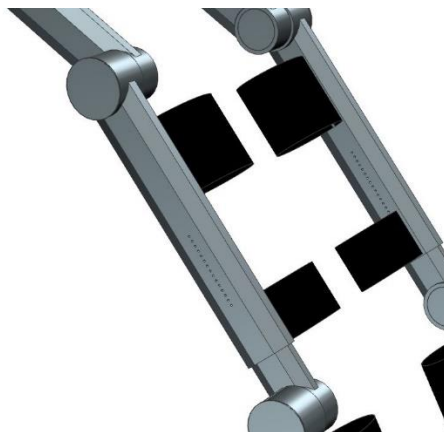
Obr. 51: Konstrukční návrh exoskeletonu – 3D pohled

Samotný průřez profilu, ze kterého je exoskeleton tvořen je možné vidět na obr. 52. V prvních fázích návrhu byl uvažován obdélníkový průřez. Ovšem z důvodu minimalizování hmotnosti exoskeletonu byl zvolen konvexní mnohoúhelník. Zároveň tento tvar profilu působí i mnohem elegantněji než prvotní kvádrový profil.



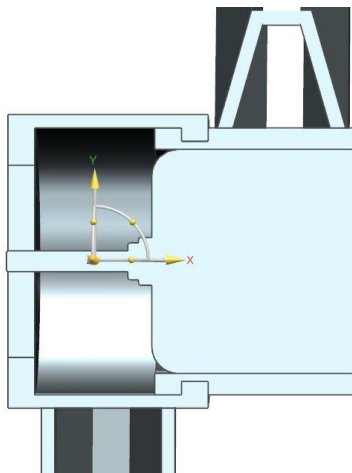
Obr. 52: Konstrukční návrh exoskeletonu – profil

Na obr. 53 je možné vidět detailní zobrazení stavebního principu exoskeletonu. Principu je tedy dosaženo pomocí většího profilu, do kterého se vsouvá menší profil. Toto řešení je možné vidět např. u francouzských berlí. Jedná se o velmi jednoduché, ale za to velmi elegantní řešení.



Obr. 53: Konstrukční návrh exoskeletonu – stavební princip

Rotačního pohybu kloubů je docíleno pomocí servomotorů, které se otáčejí podle naprogramovaného pohybu vycházející z cyklu chůze a z dat motion capture. Pohyb je přenášen pomocí drážkového rovnobokého spojení vytvořeného v náboji a na hřídeli. Vše je znázorněno na obr. 54. Typ servomotorů, které lze využít jsou popsány v nadcházející kapitole 8.13.



Obr. 54: Konstrukční řešení exoskeletonu – servomotor

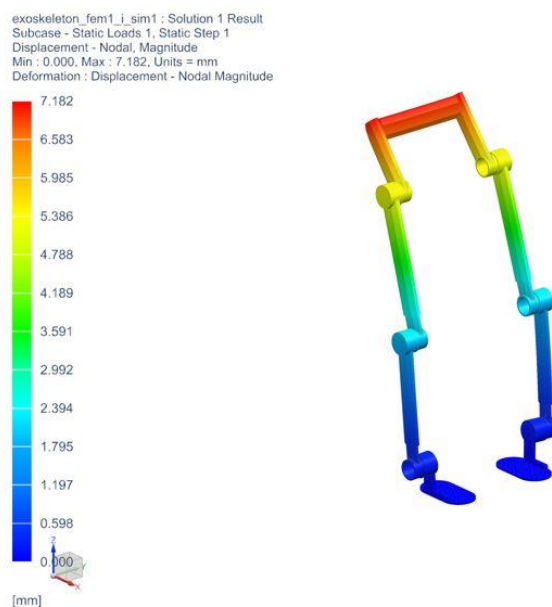
8.12. Pevnostní výpočet konstrukčního návrhu exoskeletonu

Pevnostní výpočet exoskeletonu byl možný za předpokladu, že servomotory jsou vždy aretovány v dané pozici. Pro výpočet byla využita úloha lineární statiky (SOL 101) s vytvořením idealizovaného partu. Konstrukce kolem zad je uvažována jako svařenec, tudíž byly tyto části v idealizovaném partu uvažovány jako celek. Zatížení působící na exoskeleton jsou působí tíha uživatele, tedy maximálních 130 kg, a zatížení od vlastní tíhy exoskeletonu. U tohoto typu výpočtu je nutné definování okrajových podmínek. Z důvodu výpočtu pevnostního charakteru exoskeletonu byly zafixovány části, které přichází ke kontaktu s podložkou. V místě svarů byla síť zjemněna pomocí funkce Mesh control.



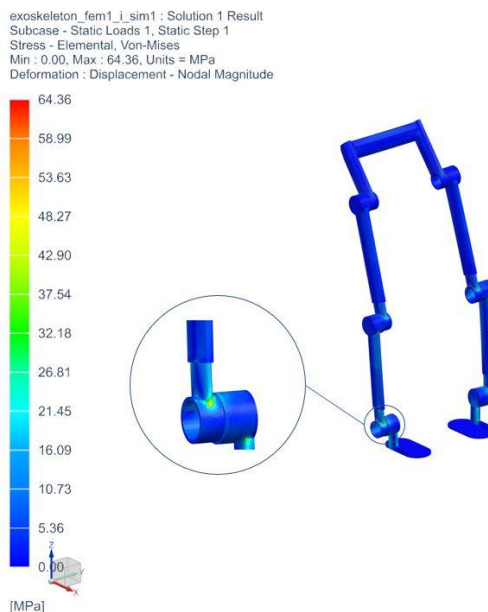
Obr. 55: Definování okrajových podmínek a zatížení

Z hlediska porovnání byly vytvořeny dva výpočtové modely se stejným zatížením a se stejnými okrajovými podmínky. Pouze s rozdílem použitých materiálů pro danou síť. Jako první materiál byla zvolena slitina EN AW 6063 T5. Z důvodu dobré vhodnosti k povrchové úpravě, dále z důvodu vysoké odolnosti proti korozi, snadnému přizpůsobení svařování a dále může být snadno eloxována. Maximální průhyb činí 7,182 mm. Z celkové výšky exoskeletonu, která je 900 mm se jedná o 0,798 % výšky. Jelikož se průhyb vešel do 2 % je konstrukce vyhovující. Výpočet průhybu je znázorněn na obr. 56.



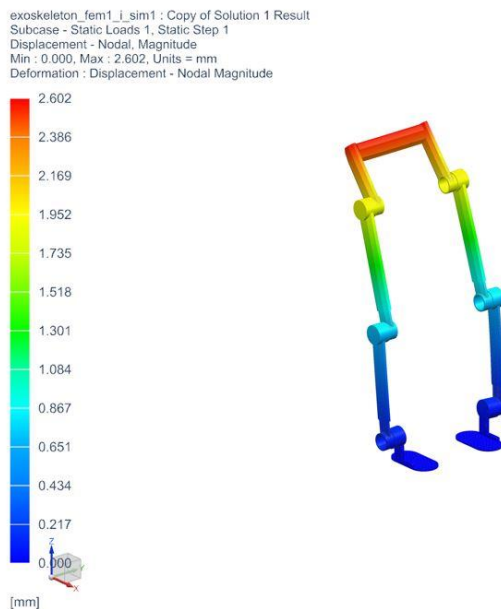
Obr. 56: Pevnostní výpočet exoskeletonu EN AW 6063 T5 – průhyb

Další výsledky k porovnání jsou z výpočtu napjatosti podle von Mises. Výsledky jsou vidět na obr. 57. Jelikož se napětí v okolí svarů pohybuje do 40 MPa konstrukce bude dobře svařitelná. Pro snížení napětí by bylo možné v místě svarů použít vyztužení.



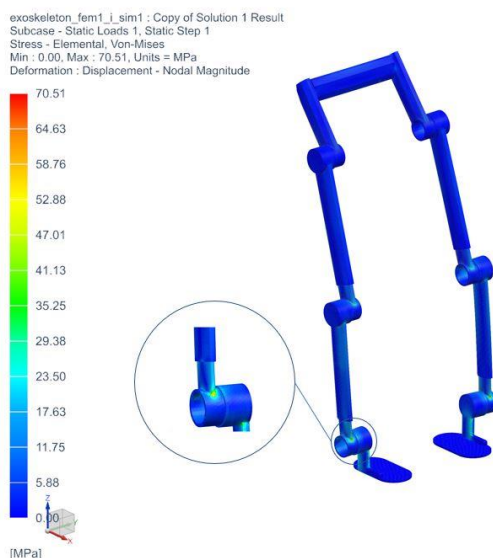
Obr. 57: Pevnostní výpočet exoskeletonu EN AW 6063 T5 – von Mises

Jako druhý materiál byla zvolena ocel. Pro svou vysokou pevnost a odolnost. Z prvního výpočtu je patrné, že průhyb je mnohem menší než u předchozího materiálu. Průhyb činí 2,602 mm, který je 0,289 % z celkové výšky exoskeletonu 900 mm.



Obr. 58: Pevnostní výpočet exoskeletonu ocel – průhyb

Výsledky z napětí von Mises vychází do 40 MPa, tudíž konstrukce zaručuje dobrou svařitelnost. Výsledky jsou vidět na obr. 59.



Obr. 59: Pevnostní výpočet exoskeletonu ocel – von Mises

Z pevnostních výsledků a napětí vychází lépe ocel. Ovšem porovnání se musí udělat i v hmotnosti samotného exoskeletonu. Exoskeleton vyroben ze slitiny EN AW 6063 T5 váží 21,68 kg. Pokud by byl exoskeleton vyroben z oceli váha vzroste na 62,87 kg. Což je skoro trojnásobek váhy exoskeletonu ze slitiny EN AW 6063 T5. Jelikož jedním z aspektů je i minimalizování hmotnosti byla vybrána jako výsledný materiál slitina EN AW 6063 T5.

8.13. Použití servomotorů

Pro použití v navrženém technickém systému exoskeletonu jsou uvažovány dva typy servomotorů viz obr. 60. Tyto typy servomotorů mají široké využití v robotice. Kde se používají pro kráčeující roboty, průmyslové roboty a pro roboty využívající se v lékařství. [28]

Servomotor stačí jednou zkalibrovat a poté si již pamatuje nulovou polohu. Pokud tedy dojde ke ztrátě napájení nemusí se znovu hledat nulová poloha. Přesnou polohu snímá 18bitový enkodér. V servomotoru zajišťuje převod planetární převodovka, která má výhodu oproti klasickým, a to z hlediska menších rozměrů. Planetární převodovku je možné vidět na obr. 61. Oba servomotory disponují vysokou přesností a velkými výstupními točivými momenty. [28]



Obr. 60: Oba typy servomotorů



Obr. 61: Planetární převodovka [28]

Prvním typem je servomotor s označením MG10015E-i10 v2. Převodový poměr je u tohoto typu 1:10. Jmenovitý krouticí moment dosahuje 25 Nm a maximální točivý moment je 45 Nm. Přední strana servomotoru je možné vidět na obr. 61. Na obr. 62 je možné vidět zadní stranu servomotoru. Tento typ je uvažovaný k ovládání kyčelního a kolenního kloubu. [28]

Druhý servomotor je vzhledově totožný s prvním. Liší se pouze v označení, které je MG8016E-i6 v2 a v technických parametrech. Jmenovitý krouticí moment dosahuje 12 Nm a maximální točivý moment je 37 Nm. Tento typ je uvažovaný k ovládání hlezenního kloubu. [29]



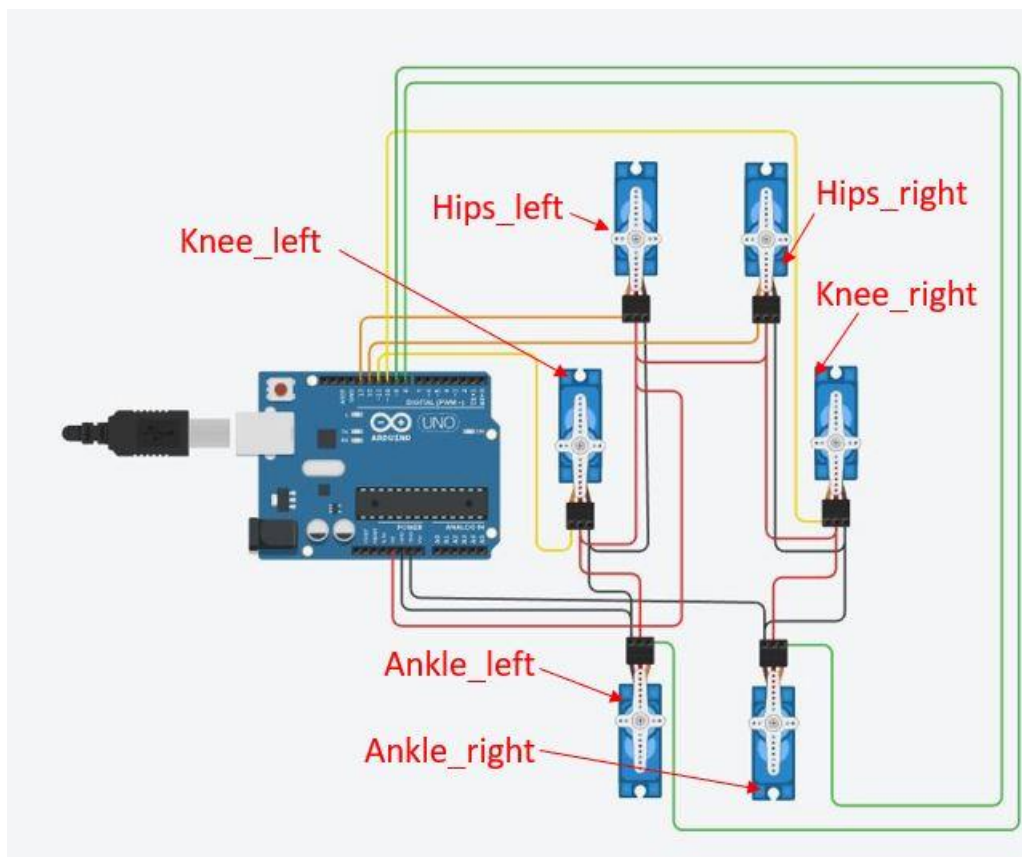
Obr. 62: Servomotor MG10015E-i10 v2



Obr. 63: Servomotor MG10015E-i10 v2 – zadní část

8.14. Možnost naprogramování chůze

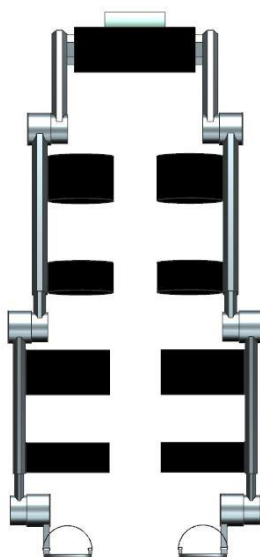
Pro definování chůze bylo použito šest servomotorů. Tyto servomotory definují jednotlivé klouby na dolních končetinách. Jedná se o kyčelní, kolenní a hlezenní kloub. Servomotory jsou připojeny na základní desku Arduino UNO R3 a dále je napsaný kód v programovacím jazyce C++. Výhodou použití aplikace Tinkercad je možnost vyzkoušení napsaného kódu. Tedy jestli se v daném momentu natáčí správné servomotory. Ukázka kódu je v Příloze č. 2.



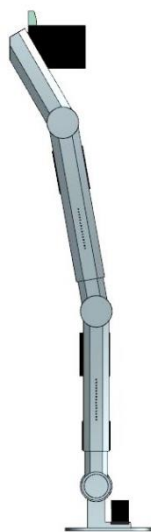
Obr. 64: Schéma možnosti zapojení servomotorů – tinkercad

8.15. Zhodnocení

Konstrukční návrh exoskeletonu splňuje definované požadavky. Důležitým požadavkem byl stavebnicový systém, který je ve výsledné konstrukci realizován pomocí dvou profilů o různém průřezu. Tento systém nastavení, byl vybrán pro svou jednoduchost. Zároveň je tento princip pro uživatele velice známý (př. francouzské hole). Bezpečnost je zajištěna pomocí jednotlivých popruhů. Zvolený materiál na samotné profily slitina EN AW 6063 T5 vyhovuje pevnostním požadavkům. Zároveň splňuje požadavek na minimalizování hmotnosti TS. Pro samotné rozpohybování exoskeletonu byly vybrány dva typy servomotorů, které se již využívají u robotů v lékařství. Samotný exoskeleton splňuje dále funkční strukturu, která byla definována jako sed, postoj a chůze. Chůze pomocí exoskeletonu je uvažována za předpokladu, že se uživatel opírá o francouzské hole.



Obr. 65: Exoskeleton – nárys



Obr. 66: Exoskeleton – bokorys

9. Závěr

Cílem celé práce bylo popsání problematiky využití podpurných systémů exoskeletonu. Na základě získaných poznatků bylo navrženo konstrukční řešení stavebnicového systému exoskeletonu pro dolní končetiny určeného pro méně pohyblivé osoby. Součástí daného cíle byl přehledně sepsaný postup samotné konstrukce, který zohledňuje požadavky na správnou funkčnost, snadnou manipulaci a respektování potřebných norem. Kontrolní výpočet navrženého technického systému exoskeletonu a závěrečné zhodnocení.

Práci lze rozdělit do dvou částí, přičemž první polovina je věnována teoretické části. V té se práce soustředí na popis zadaného tématu a historii výroby exoskeletonů. Následuje rešerše nemocí, u kterých lze exoskeletony využít a popis dělení exoskeletonů dle pracovní sféry. Při popisu dělení exoskeletonů dle pracovní sféry je popsáno zlepšení pracovních podmínek z hlediska ergonomie. Dále jsou definovány základní kinematické pohyby dolních končetin, popsání možných akčních členů a jejich umístění.

V druhé polovině práce je řešena praktická část. V praktické části jsou uvedeny tři technické systémy. Tyto tři návrhy jsou následně porovnány pomocí Inženýrsko – ekonomické specifikace a následně je vybrána neoptimálnější varianta. Důležitým krokem práce je definování funkční struktury exoskeletonu pomocí černé skříňky. Funkční struktura se tedy skládá ze sedu, postoje a chůze. Poté je představena metoda zaznamenávání chůze pomocí motion capture. Popis přípravy subjektu před samotným měřením a scénář měření. Dalším krokem v této práci je vytvoření pracovního návrhu technického systému exoskeletonu, který vychází z kinematiky naměřené pomocí metody motion capture a z dat průzkumu. Tento pracovní návrh je vytvořen v systému Blender, ve kterém je daný technický systém rozpohybován podle naměřených dat. Pracovní návrh je poté využit jako výchozí model pro zkreslení finálního technického systému exoskeletonu v softwaru NX. Konstrukce splňuje jednoduchost a zároveň vyhovuje požadované funkční struktuře. Důležité je splnění stavebnicového systému exoskeletonu, který je umožněn pomocí dvou profilů. Pomocí zasouvání profilu o menším průřezu do profilu o větším průřezu je možné přizpůsobit exoskeleton pro daného uživatele. Dále je splněn požadavek na nízkou hmotnost exoskeletonu. Z tohoto důvodu byla vybrána jako hlavní materiál na profily slitina EN AW 6063 T5. Exoskeleton je také podroben pevnostním výpočtům pomocí MKP a výsledky jsou pro zvolenou slitinu vyhovující. Závěrem práce jsou představeny servomotory využívající se v robotice a jejichž využití je uvažované v technickém systému exoskeletonu. Následně je představeno možné naprogramování chůze pomocí natáčení servomotorů. Toto řešení je provedeno pomocí aplikace Tinkercad, kde je možné daný kód vyzkoušet, a tedy ověřit samotnou funkčnost.

Seznam použitých zdrojů

- [1] MICHALEC, Libor. *Exoskeletony pro lékařské účely* [online]. 2019 [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/exoskeletony-pomahaji-postizenym-vratit-se-do-zivota.html>
- [2] BLOOMFIELD, Robert. Exoskeletons History - part 3. In: *Mechatech* [online]. Stockport: Mechatech, 2022 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.mechatech.co.uk/journal/exoskeletons-history-part-3>
- [3] BLOOMFIELD, Robert. Exoskeletons History - part 4. In: *Mechatech* [online]. Stockport: Mechatech Embrace Technology, 2022, s. 1 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.mechatech.co.uk/journal/exoskeleton-history-part-4>
- [4] MICHALEC, Libor. Průmyslové exoskeletony pomáhají při práci. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2019, 1(1), 1 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/prumyslove-exoskeletony-pomahaji-pri-praci.html>
- [5] RUPAL, Baltej, Sajid RAFIQUE, Ashish SINGLA, Ekta SINGLA, Magnus ISAKSSON a Gurvinder VIRK. Lower-limb exoskeletons: Research trends and regulatory guidelines in medical and non-medical applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. [online]. 2017, 14(6), 1-27 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: doi:10.1177/1729881417743554.
- [6] GORODENKOFFS. Robotics Legs Rehabilitation. In: *VideoHive* [online]. Envato Pty Ltd, 2023 [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://videohive.net/item/robotics-legs-rehabilitation/30455368>
- [7] TOBE, Frank. 3 Exoskeleton Companies Go Public. In: *The Robot report* [online]. WTWH Media LLC, 2023 [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://www.therobotreport.com/3-exoskeleton-companies-go-public/>
- [8] MARIENKA, Ondra. Anatomie lidského těla - Musculus quadriceps femoris / čtyřhlavý sval stehenní. In: *Kulturistika.com* [online]. Borek u Českých Budějovic: Fitness Trade s.r.o., 2002 [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://www.kulturistika.com/magazin/trenink/anatomie-lidskeho-tela-musculus-quadriceps-femoris-ctyrhlavy-sval-stehenni>
- [9] ŠTEFÁNEK, Jiří. Ochrnutí. In: *Medicína, nemoci, studium na 1. LF UK* [online]. 2011 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.stefajir.cz/ochrnuti>
- [10] Cévní mozková příhoda detailně. In: *Fakultní nemocnice u sv. Anny v Brně* [online]. Brno: Fakultní nemocnice u sv. Anny v Brně, 2023 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.fnusa.cz/o-nemocnici/cmp/cevni-mozkova-prihoda-detailne/>
- [11] ŠTEFÁNEK, Jiří. Toddova obrna. In: *Medicína, nemoci, studium na 1. LF UK* [online]. 2011 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.stefajir.cz/toddova-obrna>
- [12] GIMUNOVÁ, Marta. Anatomické názvosloví, roviny a směry lidského těla. In: *Základy anatomie pro využití ve sportu* [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2021 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z:

https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/fsps/2020podzim/anatomie_sport/web/pages/03_nazv_oslovi.html

- [13] ŘÍHOVÁ, Barbora. *Kinematická analýza chůze u pacientů s koxartrózou* [online]. Praha, 2014 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/70710/DPTX_2012_1_11510_0_390423_0_132801.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE. Vedoucí práce PhDr. Jitka Malá, Ph.D.
- [14] KLODNER, David. *Teoretická analýza chůze* [online]. Brno, 2013 [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/k8ug5/FSpS_BP.pdf. Bakalářská práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce PaedDr. Josef Michálek, CSc.
- [15] ŠROTÝŘ, Petr. *Konstrukce pomocného exoskeletu dolní končetiny* [online]. Kladno, 2020 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/91635/FBMI-BP-2020-Srotyr-Petr-prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Doc. Ing. Patrik Kutílek, Ph.D.
- [16] Pohyby v kloubech. In: *Elektronická učebnice* [online]. Olomoucký kraj: ImplementaceKap [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/177>
- [17] JOKAR, Mehdi. Fig. 1. Fundamental gait phases in swing and stance phases. In: *ResearchGate* [online]. Iran, 2022 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Fundamental-gait-phases-in-swing-and-stance-phases_fig1_344109270
- [18] KINCAID, Ellie. These boots that make walking easier are a lazy person's dream come true. In: *Business Insider* [online]. NYC: Insider, 2023 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.businessinsider.com/biomechanics-boots-reduce-energy-to-walk-2015-3>
- [19] SERGEYEV, Aleksandr, Nasser ALARAJE, Carl SEIDEL, Zach CARLSON a Brandon BRENDA. Design of a pneumatically powered wearable exoskeleton with biomimetic support and actuation. *2013 IEEE Aerospace Conference* [online]. IEEE, 2013, **1**(1), 1-8 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: doi:10.1109/AERO.2013.6496857
- [20] RBF Neural Network Based Sliding Mode Control of a Lower Limb Exoskeleton Suit. In: *ResearchGate* [online]. GmbH: ResearchGate GmbH, 2017-2023 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-ankle-and-shank-the-flexion-extension-freedom-is-driven-by-a-cylinder-and-a_fig1_269843898/actions#reference
- [21] IEEE, Spectrum. Sarcos Demonstrates Powered Exosuit That Gives Workers Super Strength. In: *IEEE* [online]. IEEE Spectrum, 2019 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/sarcos-guardianx-powered-exoskeleton>
- [22] SHI, Yunde, Mingqiu GUO, Heran ZHONG, Xiaoqiang JI, Dan XIA, Xiang LUO a Yuan YANG. Kinetic Walking Energy Harvester Design for a Wearable Bowden Cable-Actuated Exoskeleton Robot. *Micromachines* [online]. 2022, **13**(4), 571 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/4/571>

- [23] Parametry populace. In: *Nábytkářský informační server* [online]. Brno: Nábytkářský informační server, 2013 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.n-i-s.cz/cz/parametry-populace/page/33/>
- [24] Evropská mapa obezity. In: *Evropa v datech* [online]. 2023 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.evropavdatech.cz/clanek/44-evropska-mapa-obezity/>
- [25] BÁČOVÁ, Petra. Průměrný Čech trpí mírnou nadváhou. In: *Český statistický úřad* [online]. ČSÚ, 2023 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/prumerny-cech-trpi-mirnou-nadvahou>
- [26] HOSNEDL, S., J. DVOŘÁK a M. KOPECKÝ. *Konstrukční a designérský návrh nemocničního lůžka pro intenzivní péči* [online]. 1. Plzeň: ZČU, FST, KKS, 2022 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: [http://home.zcu.cz/~hosnedl/d_BP&DP/DP_EDSM/B0_SaP_Souhrnna.zprava_CASE.EX&Prikklady/B0b_SaP_EID_\(SP-EDD\)_DP-EDB_NemLuzko/..](http://home.zcu.cz/~hosnedl/d_BP&DP/DP_EDSM/B0_SaP_Souhrnna.zprava_CASE.EX&Prikklady/B0b_SaP_EID_(SP-EDD)_DP-EDB_NemLuzko/..) Case example SumRep. EID, EDSM verze EDD a EDB. ZČU, FST, KKS.
- [27] ŘASA, J. a J. ŠVERCL. *Strojnické tabulky 1: pro školu a praxi*. 1. Praha: Scientia, 2004. ISBN 80-7183-312-6.
- [28] MG10015-i10v2. In: *LK Tech* [online]. Shanghai: Shanghai LingKong Technology Co., Ltd, 2022-2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <http://en.lkmotor.cn/ProDetail.aspx?ProId=260>
- [29] MG8016E-i6v2. In: *LK Tech* [online]. Shanghai: Shanghai LingKong Technology Co., Ltd, 2022-2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <http://en.lkmotor.cn/ProDetail.aspx?ProId=261>

PŘÍLOHA č. 1

Inženýrsko – manažerské specifikace požadavků na vlastnosti navrhovaného TS

RS&Ev :	INŽ.-MANAŽ. SPECIFIKACE POŽADAVKŮ na vlastnosti (zakázky) navrhovaného TS(s)	HODNOCENÍ a vyhodnoc. vhodnosti vlastn. (zakázky) TS pro specif. pož.					
	Inž.-manažerská specifikace požadavků a hodnocení porovnávaných TS se provádí jen na tomto Listu	Stanovení mezí pro vyhodnocenou vhodnost tříd vlastností a metavlastností (zakázky) TS pro specifikované požadavky:					
	Verze úrovně a rozsahu řešení EDSM :	EDD	Dolní mez (DM) :	0,2	< 0 + HM Horní mez (HM) :	0,8	(DM + 1)
TS(s) :	Konstrukční řešení stavebnicového systému exoskeletonu	TS0 - výchozí TS	TSA - konkurenční TS	TS1 - navržený TS			
		Výchozí řešení	Konkurenční řešení	Definitivní řešení			
Konstrukční proces :	FAZE KONSTRUKČNÍHO NAVRHU TS:	I. INŽENÝRSKO-MANAŽERSKÁ SPECIFIKACE	I. INŽENÝRSKO-MANAŽERSKÁ SPECIFIKACE	III. STAVEBNÍ KONSTRUKČNÍ NAVRĚ			
	Dílčí fáze PSo (Problem solving) EDSM : Krok EDSM :	1. a Inž.-manaž. specifikace požadavků na TS 1.3 Sítí predka/hodnocení TS0 pro specif. požadavky	1. a Inž.-manaž. specifikace požadavků na TS 1.3 Sítí predka/hodnocení TSA pro specif. požadavky	5. Konstrukční návrh definitivní stavební struktury TS 5.3 Sítí predka/hodnocení TS1 pro specif. požadavky			
Stav řešení :	POTVRZENÍ PLATNOSTI ("RELEASE") VYPRAČ. HODNOCENÍ pro zobrazení řešení v diagramech a další využití* :	* Potvrzení platnosti zad. hodnocení [menu] :	ANO	* Potvrzení platnosti zad. hodnocení [menu] :	ANO	* Potvrzení platnosti zad. hodnocení [menu] :	ANO
	ÚPLNOST HODNOCENÍ (nezadává se, je výsledkem analýzy zadáních hodnot ! **):	** Porovnatel. hodnoc. u všech spec. požad. ? :	ANO	** Porovnatel. hodnoc. u všech spec. požad. ? :	ANO	** Porovnatel. hodnoc. u všech spec. požad. ? :	ANO

A	Y	Z	OzP	Posuzovaná DESING-PRODUCT ("návrhová/konstruční") KVALITA (ZAKÁZKY) TS(e)	DIAGRAMY	DIAGRAMY	Váha v	Σ VÁŽ. VYHODNOCENÍ	V.VYHOD.	V.VYHOD.	Σ VÁŽ. VYHODNOCENÍ	V.VYHOD.	V.VYHOD.	Σ VÁŽ. VYHODNOCENÍ	V.VYHOD.	V.VYHOD.	Σ VÁŽ. VYHODNOCENÍ	V.VYHOD.	V.VYHOD.		
					Q/TTC	Q/TTC	Quz	n x <0 + 4>	<0 + 4>	<0 + 1>	n x <0 + 4>	<0 + 4>	<0 + 1>	n x <0 + 4>	<0 + 4>	<0 + 1>	n x <0 + 4>	<0 + 4>	<0 + 1>	n x <0 + 4>	<0 + 4>
				Podávky na vlastnosti (zakázka) Y(S): i Třída > i Podtřída > Σ: Volit skupina > Indikátory poř. vlast.	Hodnota indikátoru poř. vlast. [kvantitativní / kvalitativní]	Váha ve třídě	DIAGRAMY EDSM #	DIAGRAMY EDSM #	4	55.44	1.98	0.49	57.19	2.04	0.51	61.50	2.20	0.55			
				Podávky na vlastnosti (zakázka) Y(S): i Třída > i Podtřída > Σ: Volit skupina > Indikátory poř. vlast.	Hodnota indikátoru poř. vlast. [kvantitativní / kvalitativní]	Váha ve třídě	DIAGRAMY EDSM #	DIAGRAMY EDSM #	4	55.44	1.98	0.49	57.19	2.04	0.51	61.50	2.20	0.55			
				D. DOMÉNA REFLEKTOVANÝCH (REFLECTED) VLASTNOSTÍ TS(e)																	
				- ve vazbách k úsekům životního cyklu TS																	
				La Reflektované vlast. TS _n k provoznímu Tech. transf. procesu vč. jeho Operandu - k PROVOZNÍ ETAPĚ životního cyklu (LC) TS																	
				Podávky na vlastnosti (zakázka) Y(S): i Třída > i Podtřída > Σ: Volit skupina > Indikátory poř. vlast.	Hodnota indikátoru poř. vlast. [kvantitativní / kvalitativní]	Váha ve třídě	DIAGRAMY EDSM #	DIAGRAMY EDSM #	4	55.44	1.98	0.49	57.19	2.04	0.51	61.50	2.20	0.55			
				1 Vlastnosti TS(e) k funkčnosti (v provoz. etapě LC)																	
				1.1 Vhodnost pro požadované (pracovní a spojovací) funkce a účinky TS (nekonkrétnější k operátoru, obecnější k operandu/bázi vstupům, napřebec k transf. procesu)																	
				OPERÁTORU TS - Konstruční řešení stavebnicového systému exoskeletonu																	
				Σ: Vytvořit stavebnicový exoskeleton																	
				max. nosnost	130 kg	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				nastavitelnost exoskeletonu-děka	900 mm x 1500 mm	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				zajištění pacienta	ve všech směrech	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				Σ: Umožnit rotaci v kloubech																	
				rozsah úhlu - kyčelní kloub (maximum)	125°	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				rozsah úhlu - kolenní kloub (maximum)	140°	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				rozsah úhlu - hlezenní kloub (maximum)	30°	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				Σ: Umožnit změnu výšky ložné plochy																	
				rozsah vzdálenosti od podlahy	600 + 800 mm	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				Σ: Umožnit chůzi																	
				rychlost chůze	3 km/h	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				Σ: Umožnit provoz bez dodávání el. energie:																	
				provoz	12h	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				k OPERANDU A: vst. - Pacient a asistující M, E, I																	
				Σ: Vlastnosti pacienta																	
				max. hmotnost	115 kg	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				max. výška	2000 mm	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				k TRANSF. PROCESU: Chůze, stoj, sed																	
				Σ: Umožnit navrácení pacienta k běžnému životu																	
				Chůze	plynulá	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4	0.79			přímý kvalif. odhad: 4	4	0.76					
				Stoj	provozný	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				Sed	pohodlný	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				1.2 Vhodnost k požadované provozuschopnosti (z hledisek místa, času, servisu, atp.):																	
				• Základní nosný TS, • M.E.I. připojení k základ. nosnému TS, • Potřeba místa, • Prac. prostředí, atp.																	
				• Životnost, • Četnost použití, • Spolehlivost, atp.																	
				• Zaškolení obsluhy, • Údržba, • Opravy, atp.																	
				MÍSTO a PROSTŘEDÍ: Domov pacienta, nemocnice, exteriér																	
				Σ: Souhrnná specifikace																	
				Exteriér	rovinný povrch	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				Domov a nemocnice - podlaha	PVC, dlažba, dřevo	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				ČASOVÉ ROZMEZÍ: Obvykle předpokládáno pro navrhovaný tech. produkt																	
				Σ: Souhrnná specifikace																	
				Životnost	5 let	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				Intenzita používání	každodenní	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				Stupeň spolehlivosti	velký	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				ASIST. PROC. (servis): Obvykle předpokl. pro uved. místo, prostředí a čas. rozmezí																	
				Σ: Souhrnná specifikace																	
				náročnost na údržbu, atp.	pouze běžné očistování	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						
				náročnost na opravy, atp.	velmi mála	4	STANOVÝ ZAD.	ANO	přímý kvalif. odhad: 4	4				přímý kvalif. odhad: 4	4						

LB. Reflek. vlast. TS _o ke komplex. zobecněným operátorům Transf. Systému (TrfS) - JEDNOTLIVÝCH ETAPÁCH (I) životního cyklu (LC) TS															
Požadavky na vlastnosti (zakázka) TS _o : I. Třída > II. Podtřída > Všechny etapy LC > Indikatory poř.vlast.		Hodnota indikátoru poř.vlast. [kvalitativní / kvantitativní]	Váha ve třídě	DIAGRAMY ES/SM #	DAGRAMY ES/SM #	Váha v Q _o	Předikovani / změnena dosaž. hodnota indikátoru poř.vlast.	Hodnoceni vhodnosti	Váz.vyhod. vhodnosti	Předikovani / změnena dosaž. hodnota indikátoru poř.vlast.	Hodnoceni vhodnosti	Váz.vyhod. vhodnosti	Předikovani / změnena dosaž. hodnota indikátoru poř.vlast.	Hodnoceni vhodnosti	Váz.vyhod. vhodnosti
2.2	Vlastnosti TS(S) k lidem (š zřítavím, atp.) v etapách LC	[[kvalitativní / kvantitativní]]	<Q+ >	Důvod požad. (ISO-9000 2016)	Porovnatelnost požadavku	<Q+ >	[[kvalitativní / kvantitativní]]	<Q+ >	<Q+ >	[[kvalitativní / kvantitativní]]	<Q+ >	<Q+ >	[[kvalitativní / kvantitativní]]	<Q+ >	<Q+ >
2.1. Vhodnost z hled. hodnot lidí (š zřítavím, atp.) - Zdravotní, sociální, atp. hodnoty (v nárezích, zvyklostech, atp.) Váha v 2. [menu] Důvod [menu] Porovnatelnost poř. v. všech TS? [menu]															
Hodnota podle typu indikátoru, příp. přímé hodnoc. v.h.kvalifik. odh. [menu] [menu] [menu]															
2.2. Vhodnost z hled. bezpečnosti a zdraví lidí (š zřítavím, atp.) - Bezpečnost (pro všechny živé bytosti), - Hygieničnost, - Ergonomičnost, atp. Váha v 2. [menu] Důvod [menu] Porovnatelnost poř. v. všech TS? [menu]															
Hodnota podle typu indikátoru, příp. přímé hodnoc. v.h.kvalifik. odh. [menu] [menu] [menu]															
2.3. Vhodnost z hled. přijemnosti pro lidi (š zřítavím, atp.) - Vzhled, - Hlučnost, - Pach, - Hmat, - Chuf, atp. (pro zrak, sluch, hmat, čich, chuť, polce, atp.) Váha v 2. [menu] Důvod [menu] Porovnatelnost poř. v. všech TS? [menu]															
Hodnota podle typu indikátoru, příp. přímé hodnoc. v.h.kvalifik. odh. [menu] [menu] [menu]															
2.4. Vhodnost z hled. dostupnosti hmotných pracovních prostředků - Kompatibilita s dostup. a spolupracujícími hmot. prac.prostředky (tj. "technologičnost"), atp. Váha v 2. [menu] Důvod [menu] Porovnatelnost poř. v. všech TS? [menu]															
Hodnota podle typu indikátoru, příp. přímé hodnoc. v.h.kvalifik. odh. [menu] [menu] [menu]															
2.5. Vhodnost z hled. působících pracovních prostředků - Odolnost k materiálovým a energetickým účinkům prostředí, atp. Váha v 2. [menu] Důvod [menu] Porovnatelnost poř. v. všech TS? [menu]															
Hodnota podle typu indikátoru, příp. přímé hodnoc. v.h.kvalifik. odh. [menu] [menu] [menu]															
2.6. Vhodnost z hled. působení na pracovní podmínkách prostředí - Ekologičnost materi. š energetických vstupů, - Ekologičnost materi. š energet. vstupů, atp. Váha v 2. [menu] Důvod [menu] Porovnatelnost poř. v. všech TS? [menu]															
Hodnota podle typu indikátoru, příp. přímé hodnoc. v.h.kvalifik. odh. [menu] [menu] [menu]															
2.7. Vhodnost z hled. ustálených "know-how" odborných informací - Kompatibilita s dostupnými "know-how" informacemi, znalostmi, zkušenostmi, atp. Váha v 2. [menu] Důvod [menu] Porovnatelnost poř. v. všech TS? [menu]															
Hodnota podle typu indikátoru, příp. přímé hodnoc. v.h.kvalifik. odh. [menu] [menu] [menu]															
2.8. Vhodnost z hled. proměnlivých "know-how" odborných informací - Optim. náročnost na vyvolané "know-how" informace, znalosti, zkušenosti, atp. Váha v 2. [menu] Důvod [menu] Porovnatelnost poř. v. všech TS? [menu]															
Hodnota podle typu indikátoru, příp. přímé hodnoc. v.h.kvalifik. odh. [menu] [menu] [menu]															

Požadavky na vlastnosti (zakázku) TS(s): i Třída > j Podtřída > k Vlastnostskupa > Indikátory pož/vlastn.		Hodnota indikátoru pož/vlastn. [kvantitativní / kvalitativní]	Váha ve třídě	DIAGRAMY ESSM II [k]	DIAGRAMY ESSM I [k]	Váha v Oo	Předikovani / změnění dosaž. hodnota indikátoru pož/vlastn.	Hodnocení vhodnosti	Vázh.vhodnosti	Předikovani / změnění dosaž. hodnota indikátoru pož/vlastn.	Hodnocení vhodnosti	Vázh.vhodnosti	Předikovani / změnění dosaž. hodnota indikátoru pož/vlastn.	Hodnocení vhodnosti	Vázh.vhodnosti
i Třída > j Podtřída > k Vlastnostskupa > Indikátory pož/vlastn.		[kvantitativní / kvalitativní]	< Q + Δ >	Důvod požad. [ISO-9000 2016]	Porovnatelnost požadavku	< Q - Δ >	[kvantitativní / kvalitativní]	< Q + Δ >	< Q + 1 >	[kvantitativní / kvalitativní]	< Q + Δ >	< Q + 1 >	[kvantitativní / kvalitativní]	< Q + Δ >	< Q + 1 >
6. Vlastn. TS(s) k „know-SMQ“ inf. („manaž.technologičn.“) v et.LC															
6.1 Vhodnost z hled. ustálených „know-SMQ“ manažerských informací															
* Kompatibilita s dostupnými „know-SMQ“ inf., znalostmi, zkuš., atp. zejm. produktovými, třízními, atp.															
6.1.1 Všechny etapy LC															
* Registrační závažné předpisy															
* Patentová a licenční práva															
* ČSN EN 60601 Bezpečnost produktu															
* Dodržení bez výjimek															
* Sadržení bez výjimek															
* Sadržení bez výjimek															
6.2 Vhodnost z hled. proměnlivých „know-SMQ“ manažerských informací															
* Optim. nároč. na vypoč. „know-SMQ“ inf., znal., atp. zejm. produktové (O), termín (T), a nákl. (C)															
6.2.1 Všechny etapy LC															
* celkový počet TS															
* Předvýrobní etapy															
* doba (=> termín) na předvýr. etapy prototypu/prvého TS															
* celk. náklady na předvýr. etapy prototypu / prvního TS															
* celk. rozpočt. náklady na předvýr. etapy dalšího TS															
6.2.2 Výroba															
* doba (=> termín) na výrobu prototypu / prvního TS															
* celk. náklady na výrobu prototypu / prvního TS															
* celk. rozpočt. nákl. na výrobu 1 ks TS															
6.2.3 Distribuce															
* doba (=> termín) na dodání prototypu/prvého TS															
* doba (=> termín) na dodání dalšího 1 ks TS															
* prodejní cena (konkurentní produkt cca 5 000 Kč)															
6.2.4 Provoz															
* náklady na provoz TS															
* náklady na údržbu a opravy TS															
6.2.5 Likvidace															
* doba na likvidaci 1 ks TS															
* náklady na likvidaci 1 ks TS															
II. DOMÉNA VKONSTRUOVANÝCH (EMBEDDED) VLASTNOSTÍ TS(s)															
- ke všem částem životního cyklu TS															
7. Vlastnosti TS(s) k jeho struktuře															
7.1 Vhodnost z hled. požadovaných reaktivních („obecných“) vlastností TS:															
* Mechanické I: Makro/mikropovrchové, Makro/mikroobjemové, atp.															
* Mechanické II: Pevnostní, Deformační, Dynamické, Tribologické, atp.															
* Tepelné, Chemické, Akustické, Optické, Elektrické, Nukleární, Chemicko-mechanické, Technologické, „Botanické“, „Biologické“, „Zoologické“, atp.															
7.1.1 Souhrnné specifikace															
* Pevnost při vertikálním centrickém zatížení Pv = 1 150 N															
7.2 Vhodnost z hled. požadovaných architekturních vlastností															
* Stavby struktura: *Prvky (řivary, rozměry, materiály, způsob výroby, stavy povrchu, odchytky od jm.stavů), *Úspřádání (ve všech předpok. konstr. stavech I)															
* Organová struktura: *Prvky, *Úspřádání															
* Funkční struktura: *Prvky, *Úspřádání															
* Prázdná struktura (černá skříňka): *Znakové vlastnosti TS															
7.2.1 Souhrnné specifikace															
* konstrukční provedení spojovacích částí															
* povrchová úprava funkčních ploch															
* povrchová úprava nefunkčních ploch															
7.3 Vhodnost z hled. požadovaných znakových vlastností („charakteristik“)															
* Pracovní (funkční) znaky TS															
* Pracovní princip, * Pracovní způsob, , atp.,															
* Technologické (transformační) znaky TS															
* Tg princip & způsob, * Princip & způsob provozního technického transform.procesu, atp.															
* Obecné konstrukční (mech., tepelné, chemické, atp.) znaky TS															
* Povrch, * Objem, * Hmotnost, * Poloha těžiště, atp.															
7.3.1 Souhrnné specifikace															
* funkční princip															
* energie pro ovládní a pohon/přestavování															
* zdroj energie pro ovládní a pohon/přestavování															

3

0.59

0.66

0.69

2

0.68

0.68

0.71

PŘÍLOHA č. 2

Ukázka kódu chůze v Tinkercad

```
//Walking_robot
// C++ code
//definovani knihovny
#include <Servo.h>

//definovani serv
Servo ankle_left;
Servo ankle_right;
Servo knee_left;
Servo knee_right;
Servo hips_left;
Servo hips_right;

//definovani promennych
int posleftankle;
int posrightankle;
int posleftknee;
int posrightknee;
int poslefthips;
int posrighthips;

//definovani uhlu pri chuzi
const int a =0;
const int b =5;
const int c =8;
const int d =10;
const int e =18;
const int f =20;
const int g =30;
const int h =50;
```

```
const int i =60;
const int j =-5;
const int k =-10;
const int l =-15;
const int m =-20;
```

```
void setup()
{
ankle_left.attach(9);
ankle_right.attach(8);
knee_left.attach(11);
knee_right.attach(10);
hips_left.attach(13);
hips_right.attach(12);
```

```
//definovani vycchozi pozice
```

```
ankle_left.write(a);
ankle_right.write(a);
knee_left.write(a);
knee_right.write(a);
hips_left.write(a);
hips_right.write(a);
}
```

```
void loop()
```

```
{
//uder paty 0%krokoveho cyklu pro levou nohu
ankle_left.write(a);
ankle_right.write(c);
knee_left.write(b);
```

```
knee_right.write(l);  
hips_left.write(f);  
hips_right.write(k);  
delay (2000)
```

```
//10%krokoveho cyklu pro levou nohu  
;ankle_left.write(a);  
ankle_right.write(m);  
knee_left.write(f);  
knee_right.write(g);  
hips_left.write(e);  
hips_right.write(b);  
delay (2000)
```

```
//50%krokoveho cyklu pro levou nohu  
;ankle_left.write(c);  
ankle_right.write(a);  
knee_left.write(e);  
knee_right.write(b);  
hips_left.write(k);  
hips_right.write(f);  
delay (2000)
```

```
//60%krokoveho cyklu pro levou nohu  
;ankle_left.write(m);  
ankle_right.write(a);  
knee_left.write(g);  
knee_right.write(f);  
hips_left.write(m);  
hips_right.write(e);
```

```
delay (2000)
```

```
    //100%krokoveho cyklu pro levou nohu
```

```
;ankle_left.write(a);
```

```
ankle_right.write(m);
```

```
knee_left.write(f);
```

```
knee_right.write(g);
```

```
hips_left.write(e);
```

```
hips_right.write(b);
```

```
delay (2000)
```

```
;}
```