

Využití interaktivních robotů pro správný nácvik ergonomických postupů v automobilovém průmyslu

Bakalářská práce

Studijní program: B0914P360007 Biomedicínská technika
Autor práce: **Daria Aculenco**
Vedoucí práce: Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Konzultant práce: Ing. Jitka Umlaufová
Škoda auto, a.s.





Zadání bakalářské práce

Využití interaktivních robotů pro správný nácvik ergonomických postupů v automobilovém průmyslu

Jméno a příjmení: **Daria Aculenco**
Osobní číslo: **D20000129**
Studijní program: **B0914P360007 Biomedicínská technika**
Zadávající katedra: **Fakulta zdravotnických studií**
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

Cíle práce:

Provéřit možnost využití interaktivních robotů firmy KUKA pro správný nácvik ergonomických postupů ve výrobě.

Navrhnout modelovou situaci pro použití a nácvik utahovačky.

Vypracovat metodické postupy pro správný nácvik konkrétních pracovních operací z pohledu biomechaniky.

Teoretická východiska (včetně výstupu z kvalifikační práce):

Ergonomické postupy opatřují pracovníci ve výrobě před rozvojem zdravotnických problémů v práci.

Výstupem z bakalářské práce bude ověření na konkrétní operace pomocí figurantů ve spolupráci se Škoda Auto.

Výzkumné předpoklady / výzkumné otázky:

Předpokládáme, že se interaktivní roboty firmy KUKA mohou využívat pro správný nácvik ergonomických postupů ve výrobě.

Jaké ergonomické vlastnosti bude mít utahovačka?

Předpokládáme, že metodické postupy vypracované z pohledu biomechaniky umožňují provádět konkrétní pracovní operaci nejméně energeticky náročně.

Metoda:

Kvalitativní.

Technika práce, vyhodnocení dat:

Experiment.

Místo a čas realizace výzkumu:

Závodní poliklinika Škoda-Auto; Laboratoře robotiky CXI TUL. Leden 2021- únor 2021. Vzorek:

Ověření na konkrétní operace pomocí figurantů z Laboratoře robotiky CXI TUL a Závodní polikliniky Škoda-Auto.

Rozsah práce:

Rozsah bakalářské práce činí 50-70 stran (tzn. 1/3 teoretická část, 2/3 výzkumná část).

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

tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- BITTNER, Václav et al. Material, structure, chosen mechanical and comfort properties of kinesiology tape. *Journal of the Textile Institute*, 2017, **108**(12), 2132-2146. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1315797>
- ČAPEK, L., P. HÁJEK a P. HENYŠ. *Biomechanika člověka*. Praha: Grada, 2018. ISBN 978-80-271-0367-6.
- ČERNOHORSKÝ, Jozef a Martin BOGDANOVSKYI. Industrial robots trajectories planning for flexible manufacturing systems. *International Journal of Modeling and Optimization*. 2017, **7**(5), 270-274. ISSN 2010-3697.
- CEJKA, Jan a Josef CERNOHORSKY. Optimization of robotic workplaces. KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ TUKE. *TUKE*[online]. IEEE, 2016, s. 146-150 [cit. 2018-12-19]. DOI: 10.1109/CarpathianCC.2016.7501083. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7501083/>
- ČERNOHORSKÝ, Jozef a Marcel HORÁK. Vertical Climber 02 - Řízení pneumatických komponent. *KOPES 2014: kolokvium pedagogů elektrických strojů: sborník příspěvků z mezinárodní konference: Liberec, 21.-23. 1. 2014*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014, s. 13-16. ISBN 978-80-7494-034-7. HAVELKA, Martin a Veronika STOFFOVÁ. *Robotika – stavba a programování robotů*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2017. ISBN 978-80-244-5194-7.
- HORÁK, Marcel et al. New Generation of Mobile Platform of Service Robot for Motion Along Vertical Walls. In: HAJDUK, Mikulas a Lucia KOUKOLOVA. *Industrial and Service Robotics, Book Series: Applied Mechanics and Materials*. 613. vyd. Zürich: Trans Tech Publications Ltd, 2014, s. 126-131. ISBN 978-3-03835-202-0.
- CHUNDELA, Lubor. *Ergonomie*. 3. vyd. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2013. ISBN 978-80-01-05173-3.
- KRAFT, J., A. A. ZAJCEV a A. V. ZAJCEV. *Discovering the lean production secrets on the verge of industry 4.0*. Liberec: Technical University of Liberec, 2017. ISBN 978-80-7494-392-8.
- MLÝNEK, J., M. PETRŮ a T. MARTINEC. Calculation of industrial robot trajectory in frame composite production. In: *Proceedings of the conference Programs and Algorithms of Numerical Mathematics*. Prague: Academy of Sciences of the Czech Republic, 2017, s. 81- 88. ISBN 978-80-85823-67-7.
- NOVÁK, Josef. *Racionalizace a ergonomie výrobních procesů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2011. ISBN 978-80-248-2684-4.

Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Martinec, Ph.D. Ústav mechatroniky a technické informatiky
Konzultant práce:	Ing. Jitka Umlaufová Škoda auto, a.s.
Datum zadání práce:	1. září 2020
Předpokládaný termín odevzdání:	30. června 2021

L.S.

prof. MUDr. Karel Cvachovec, CSc., MBA
děkan

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákonč. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

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

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

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

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

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

21. července 2021

Daria Aculenco

Poděkování

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Martincovi za trpělivost, čas věnovaný organizaci experimentu a odborné rady. Taky chci poděkovat prof. Aleši Richterovi za jeho neocenitelný přínos v korektuře dané práce.

Anotace

Autor: Daria Aculenco

Instituce: Technická univerzita v Liberci, Fakulta zdravotnických studií

Název práce: Využití interaktivních robotů pro správný nácvik ergonomických postupů v automobilovém průmyslu

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.

Počet stran: 61

Rok obhajoby: 2021

Souhrn: Práce se zabývá zkoumáním možnosti využití interaktivních robotů firmy KUKA pro nácvik ergonomických postupů ve výrobě. Představuje základní informace o ergonomii pracovního prostředí a vlastnostech lidského těla z pohledu biomechaniky, anatomii i antropometrii. Dále taky uvádí ergonomické normy vztahující se k tématu. Seznamuje s metodickými postupy pro definování cviku konkrétních pracovních operací pomocí aplikací na robota KUKA LBR iiwa

Klíčová slova: biomechanika, ergonomie, roboty firmy KUKA, ergonomické postupy, interaktivní roboty, antropometrie, pracovní poloha vstoje, pohybový systém člověka

Abstract

Author: Daria Aculenco

Institution: Technical university of Liberec, Faculty of Health Studies

Title: Use of interacting robots for optimal ergonomic training in car production industry

Supervisor: Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.

Pages: 61

Year: 2021

Summary: This theses is focused to research a possibility of using interactive robots KUKA Company for teaching ergonomic processes in production industry. It presents basic information about the ergonomics of the workspace and the properties of the human body from the biomechanical, anatomical and anthropometric points of view. Theses also contains ergonomic standards related to this topic. Introduces the methodological procedures to set exercises for specific work operations using the application on the KUKA LBR iiwa robot

Key words: biomechanics, ergonomics, KUKA robots, ergonomic procedures, interactive robots, anthropometry, standing work position, human musculoskeletal system

Obsah

Obsah	10
Seznam použitých zkratek	12
1 Úvod.....	13
2 Teoretická část	14
2.1 Medicínská část.....	14
2.1.1 Ergonomie.....	14
2.1.2 Základní principy systému Human-Machine.....	15
2.1.3 Pracovní prostor	16
2.1.4 Pracovní poloha vstojie.....	16
2.1.5 Pohybový systém člověka.....	21
2.1.6 Antropometrické údaje	24
2.2 Technická část.....	27
2.2.1 Robotika.....	27
2.2.2 Singularita.....	30
3 Výzkumná část.....	32
3.1 Cíle a výzkumné předpoklady.....	32
3.2 Metodika výzkumu.....	32
3.2.1 Utahovačka firmy Makita a její ergonomické vlastnosti	34
3.2.2 Robot KUKA LBR iiwa	34
3.2.3 Návrh modelových situací	36
3.2.4 Metodické postupy při zadávání cviků	37
3.3 Analýza výzkumných dat	38
3.4 Výsledky experimentu	50
4 Diskuze	53
5 Závěr	54
Seznam použité literatury	55
Seznam tabulek	59

Seznam obrázků.....	59
Seznam grafů	60
Seznam příloh	Error! Bookmark not defined.

Seznam použitých zkratk

LBR	robot lehké konstrukce (Leiechtbauroboter)
iiwa	inteligentní průmyslový pracovní asistent (Intelligent Industrial Work Assistant)
NV	Nařízení Vlády
ČSN	česká technická norma
EN	evropská norma
CNS	Centrální nervová soustava
PNS	periferní nervová soustava
č.	číslo
tzv.	tak zvaný
cit.	citováno
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)

1 Úvod

V automobilovém průmyslu se často používají pojmy „ergonomie práce“ a „robotizace výroby“. Ergonomie ve výrobě je nezbytná k zajištění toho, aby prováděná práce odpovídala fyzickým vlastnostem zaměstnanců. Kompetentní ergonomie pomáhá snižovat únavu lidských svalů a dokonce pomáhá předcházet onemocněním pohybového aparátu. Podle ergonomických výzkumů, v rámci motorického tréninku nových pohybových stereotypů je doporučená doba 6 měsíců (Bendová, 2020). Ve sféře současného automobilového průmyslu doba zaučování pod dohledem v rozmezí šesti měsíců

je nepředstavitelná, kvůli rychlosti výrobního procesu. Jelikož robotizace výrobních procesů umožňuje několikanásobně zvýšit produktivitu výroby, mohla by eliminovat problém nedostatku času při zaučování.

Předpokládá se, že využití interaktivních robotů při nácviku ergonomických postupů bude moci školit pracovníky ve větším rozsahu a také umožní provádět konkrétní pracovní operací nejméně energeticky náročně, což povede ke snížení procenta pracovních úrazů a nemocí při práci.

V této bakalářské práci se zkoumá možnost použití interaktivních robotů KUKA pro nácvik ergonomických postupů v automobilovém průmyslu.

Pro teoretický popis dané problematiky byla uvedena informace popisující práci člověka ve výrobě z hlediska biomechaniky a ergonomie, technické vlastnosti robota a anatomické vlastnosti lidského pohybového systému. Poté byla navrhována modelová situace pro použití a nácvik utahovačky. Na základě teoretických informací uvedených v rámci této bakalářské práce se vypracovaly metodické postupy ke správnému nácviku konkrétní pracovní operací z hlediska biomechaniky a ergonomie.

Dále za použití programu nadefinovali se cvičení pro nácvik konkrétní pracovní operace. Na jejím základě se provedl experiment, ve kterém se testovali zadané výzkumní předpoklady.

2 Teoretická část

2.1 Medicínská část

V této kapitole rozebereme teoretickou informaci, potřebnou pro pochopení problematiky dané bakalářské práce z medicínské stránky.

2.1.1 Ergonomie

Na začátku uvedeme několik základních informací ohledně pojmu a cílů ergonomii jako vědy.

Pojem ergonomie pochází ze starořeckého ergo – práce a nomos – zákon. Ergonomie je věda, která zkoumá vlastnosti lidské činnosti v podmínkách výroby a životosprávy s cílem optimalizaci nástrojů práci, podmínek a procesů práci.

Cílem ergonomii, jako medicínského směru, je ochrana zdraví člověka a vývoj jeho osobností. Prozatím cílem ergonomii jako vědecko-technického směru je zlepšení podmínek práce a zvýšení výkonu a produktivity při zajištění pohodlí a bezpečnosti práce (Nekolná et al, 2015).

Na konci dvacátého století se zvýraznily tři hlavní směry v ergonomii: ergonomie fyzického prostředí, kognitivní ergonomie a organizační ergonomie.

Ergonomie fyzická zvažuje problémy související s anatomickými, fyziologickými a biomechanickými charakteristikami člověka, které mají vztah k pochopení problematiky této práci.

Psychická ergonomie souvisí s psychickými procesy, takovými že jsou vnímání, paměť a rozhodování, protože oni mají vliv na interakci mezi člověkem a jinými elementy systému. Související problémy zahrnují kognitivní práce, kvalifikovaný výkon, interakce člověka a počítače. Důraz se dělá na přípravě a kontinuálním výcviku člověka při projektování sociotechnického systému. Důležité místo tady má psychologický typ operátora.

Organizační ergonomie zvažuje otázky ohledně optimalizací sociotechnických systému, včetně jejích organizační struktury a procesu řízení. Zvažují problémy systému

vztahu mezi lidmi, řízení skupinových zdrojů, kooperací, skupinovou prací a řízení (Chundela, 2013).

2.1.2 Základní principy systému Human-Machine

Při stvoření složitých systému „Člověk-Stroj“ se postupuje podle dalších principů:

- **princip minimální fyzické námahy.** Člověk-operátor se musí zabývat jenom tou prací, která je nezbytná, nikoliv tou, kterou může udělat stroj;
- **princip přátelského interface.** Informační panel musí být lehký a jednoduchý pro zpracování operátorem a mít jednoznačnou informaci;
- **princip minimálního objemu informací k zapamatování.** Tím pádem člověk potřebuje znát co nejméně informací;
- **princip zasahování operátora do stroje v jakýkoliv moment.** Operátor musí mít možnost změnit přednost operací, které dělá stroj. Taky operátor musí kontrolovat sekvenci práci stroje, zvláště tam, kde není přesná sekvence operací;
- **princip převážných možností operátora.** Souvisí s tím, že člověk musí plnit funkce, které on dělá líp, než stroj a obráceně;
- **princip optimální informační zátěže.** Doporučuje takové rozdělení funkci, při kterém by podle operátor měl dostatečné množství informací, ale nebyl informačně přetížen.

Je nutné taky brát v úvahu kompatibilitu práci člověka a stroje v dalších směrech:

- **antropometrická kompatibilita** (uvažování rozměrů těla člověka, možnost výhledu na vnější prostor, poloha operátora ve výrobě),
- **senzomotorická kompatibilita** (uvažování rychlosti motorických operací člověka a jeho smyslových reakcí na různě dráždivosti),
- **energetická kompatibilita** (uvažování silové možností člověka při vypočtu úsilí vynaložených na řídicí orgány),
- **psychofyzilogická kompatibilita** (uvažování reakci člověka na barvu, frekvenční rozsah dodávaných signálů, tvar a jiné estetické parametry stroje) (Monachan, 2016).

2.1.3 Pracovní prostor

Pracovní prostor je primárním a základním článkem ve výrobě, jeho racionální organizace má prvořadý význam v celé řadě otázek vědecké organizace práce. Na pracovišti se kombinují prvky výrobního procesu – pracovní prostředky, předměty práce a práce samotná. Na pracovním místě musí být dosažen hlavní cíl práce - kvalitní a včasná výroba produktů nebo realizace stanoveného množství práce (Cejka a Cernohorsky, 2016).

Metodickým základem pro vědecky podložené plánování pracoviště je jeho soulad s ergonomickými požadavky. To je dosahováno racionálním vytvářením pracovních zón a správným umístěním hmotných prvků výroby v souladu s antropometrickými a psychofyziologickými údaji člověka na základě poskytnutí pracovního prostoru pracovníkovi, který mu umožňuje svobodně provádět pracovní funkce. Racionální uspořádání pracoviště by mělo zajistit jasný řád a stálost v umístění nástrojů a zařízení, dokumentace, dílů jak během práce, tak při jejich skladování a zajistit pohodlné držení těla, výkonnost pracovních procesů s maximální úsporou pohybu pracovníků, stejně jako úplná bezpečnost při práci. Důležitým požadavkem je správné používání určené výrobní oblasti pro pracovní místo (Anon, 2016a).

Podmínky organizaci pracovního prostoru jsou diktovány normou ČSN EN ISO 6385 s názvem „Ergonomické zásady navrhování pracovních systémů“.

2.1.4 Pracovní poloha vstoje

Pracovní prostor a organizace pracoviště, dosah a množství úsilí na ovládací prvky, jakož i charakteristiky viditelnosti jsou určeny především polohou těla pracovníka. Z hlediska biomechaniky závisí poloha těla na jeho orientaci v prostoru a na velikosti podpůrné oblasti. Nejběžnějšími pracovními pozicemi jsou stání a sezení, méně často ležení. Každá z pozic se vyznačuje určitými podmínkami rovnováhy, stupněm svalového napětí, stavem oběhového a dýchacího systému, umístěním vnitřních orgánů a v důsledku toho spotřebou energie.

Volba pracovní polohy je spojena s rozměry prostoru lidských pohybů, velikostí a povahou (statickou, dynamickou) pracovní zátěže, objemem a rychlostí pracovních

pohybů, požadovaným stupněm přesnosti při provádění operací a rysy předmětového prostorového prostředí (Nekolná et al, 2015).

Trvalý statický stoj či sed bez možnosti změny polohy, časté rotace a pootočení trupu nebo hlavy, opakovaný nebo dlouhodobý záklon trupu, časté či dlouhodobé hluboké předklony trupu, práce s rukama nad výškou ramen nebo v zapažení, práce vleže, v kleče ve výponu, extrémní polohy v kloubech – všechno výše uvedené je příkladem nefyziologické polohy (Anon, 2016 b).

V této práci jsme vybrali polohu vstoje pro vykonání experimentu napodobující práci s utahovákem v automobilovém průmyslu. Popíšeme jí z ergonomického hlediska.

Poloha vstoje je dynamické vyvažování těla ve svislé poloze, jež se řadí k nejčastěji se vyskytujícím pracovním polohám. Z ergonomického hlediska je výhodnější, protože umožňuje střídání poloh, pohyby ve větším rozsahu a větší využití síly. Optimální poloha vstoje je charakterizována narovnaným tělem, rovnoměrnou podporou na obou chodidlech, absencí extrémních poloh v kloubech horních končetin a úspornými pohyby (Gilberová a Pavlů, 2008).

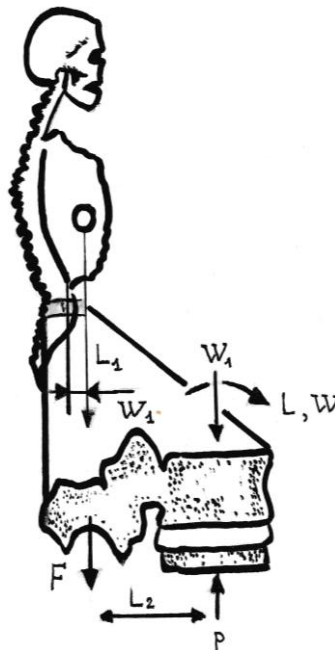
Pro udržení pohodlné polohy vstoje pro pracovníka jsou doporučeny několik možností: možnost změnit polohu těla (např. otáčet se), možnost krátkodobého odpočinku vsedě a optimální rozměry motorického prostoru, a to v poměrech 30% stání ku 60% sezení ku 10% chůze nebo pohyb (Peereboom a De Langen, 2021). Stoj není strnulou pracovní polohou, ale spíše stáním s občasným otáčením se občasnou chůzí (Novotná, 2017). Příklady nefyziologických pracovních poloh: trvalý statický stoj či sed bez možnosti změny polohy, opakovaný nebo dlouhodobý záklon trupu, časté rotace, časté či dlouhodobé hluboké předklony trupu, extrémní polohy v kloubech, práce s rukama nad výškou ramen nebo v zapažení, práce v leže, vkleče ve výponu (Gilberová a Pavlů, 2008)

Při práci s nářadím je doporučeno zachování neutrální polohy zápěstí. Tím je myšleno nastavování různé polohy nástrojů, nikoliv ruky. Přednostně se užívá nářadí, které je určeno pro držení celou dlaní, nikoliv jenom prsty ruky (Anon, 2016a). Pro účely našeho experimentu jsme využili utahovačku firmy Makita.

2.1.4.1 Výhody a nevýhody polohy vstoje

Každá pracovní poloha má nějaké výhody. Poloha ve stoje například poskytuje maximální výhled na pracovní plochu, pohyblivost, přístup k většímu rozsahu pohybů a schopnost uplatnit větší fyzickou sílu. (Martincová, 2019)

Na druhou stranu poloha ve stoje má i řadu nevýhod, které snižují účinnost vykonávané práce. Dlouhodobé setrvávání v poloze ve stoje povede k únavě, i když operace nevyžaduje vysoké svalové úsilí. Dalším slabým článkem při práci ve stoje je oblast bederní páteře. Mechanické zatížení působící na meziobratlové ploténky ve stoje může být větší, než je tělesná hmotnost. Svaly a zejména vazy páteře se nachází v blízkosti osy otáčení, a proto jejich působící síla musí být několikanásobně větší, než je hmotnost zvedání břemena a horních částí těla. Přesně tato síla ovlivňuje mechanické namáhání, které zatěžuje meziobratlové ploténky (Serdyuk, 2019).



Obrázek 1: Mechanismus vytváření mechanického zatížení meziobratlových plotének – W_1 je váha nadložních částí těla; L_1 – rameno síly; W_1 , F – síla svalů, které narovnávají páteř; L_2 – její rameno. Zdroj: autor.

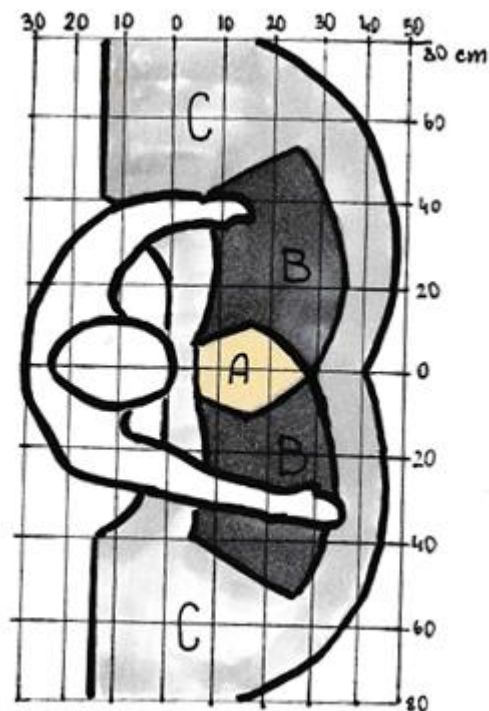
2.1.4.2 Dosah ruky a související normy

Pracovní pohyb je charakterizován jeho objemem, který je určen délkou řetězce pohybového systému, strukturou kloubu, pracovní polohou, individuálními charakteristikami (pohlaví, věk, zdatnost). Maximální množství uchopovacích pohybů

rukou je tedy určeno amplitudou pohybu v ramenním kloubu, délkou horní končetiny a růstem pracovníka.

Obecně se doporučuje výška pracovní plochy kolem 5-10 cm pod úrovní loktů. Při vykonávání jemných prací se výška zvyšuje na 5-10 cm nad úrovní loktů a pro těžké manipulační práce se výška snižuje na 15-40 cm pod úrovní loktů (Malý, Král a Hanáková, 2010).

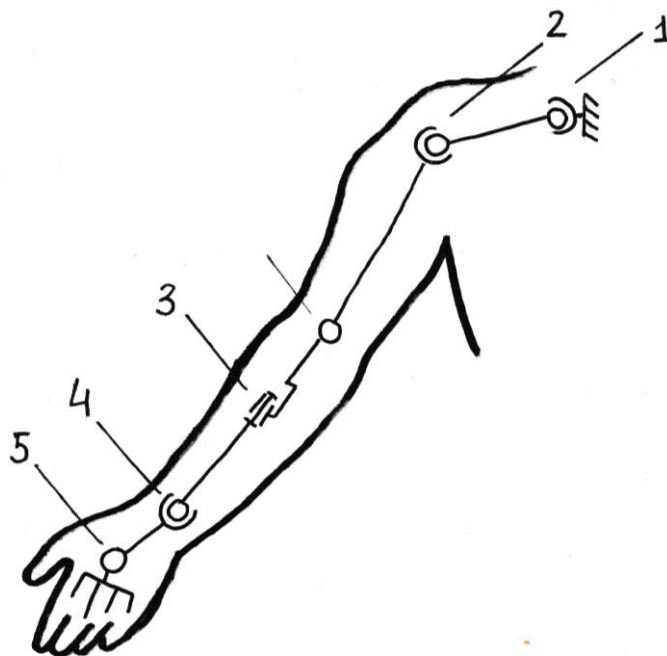
Pokud jsou ovládací prvky umístěny ve vodorovné a svislé rovině, maximální rychlost pracovního pohybu se vyvíjí uvnitř zón A a B (optimální zóna se snadným dosahem) (viz Obrázek 1). Zóna dosahu C je charakterizována zpomalením pohybů a nutností otočit tělo na stranu. Kromě rychlosti pohybu je pro úspěšné dokončení práce důležitá i jeho přesnost. Bylo zjištěno, že nejpřesnější pohyby jsou prováděny v zóně A, nejméně přesné v zóně C (Serdyuk, 2019). Dosahy horních končetin při práci vsedě a vstoje jsou upraveny v NV č. 361/2007 Sb., ve znění pozdějších předpisů.



Obrázek 2: Dosahy horních končetin při práci vsedě a vstoje Zdroj: autor.

2.1.4.3 Zjednodušená kinematika ruky

1. Nadpažkoklíční kloub – spojuje klíční kost a lopatku. Uvádí se, že tento kloub může být dostatečně přesně namodelován kulovým kloubem se třemi stupni volnosti.
2. Ramenní kloub – spojuje lopatku a pažní kost. Také ho lze namodelovat kulovým kloubem se třemi stupni volnosti.
3. Loketní kloub – spojuje pažní kost, kost vřetenní a loketní. Fakticky má dva stupně volnosti, ale často se počítá s jedním stupněm. Druhý stupeň volnosti souvisí s umožněním rotačního pohybu zápěstí pomocí křížení vřetenní a loketní kostí.
4. Zápěstí – skládá se z osmi kostí, kterým se říká karpý a popisuje se jako kloub se dvěma stupni volnosti.
5. Záprstní kloub – skládá se ze zápěstních kostí a metakarpálních kostí, má jeden stupeň volnosti. Pokud bude brán v úvahu integrální rotační pohyb, který poskytují prsty ruky, lze uvažovat, že ten kloub má dva stupně volnosti (Platonov et al, 2012).



Obrázek 3: Zjednodušená kinematika ruky. Zdroj: autor.

Společný počet všech stupňů volnosti v tomto kinematickém řetězu je dvanáct. Bohužel praktická realizace je velmi těžká. Psychofyzická analýza práce člověka ukazuje, že v nejvíce běžných případech se většina operací provádí pomocí pohyblivosti v ramenním kloubu, loketním kloubu, zápěstním kloubu a zápěstí. To znamená, že se zanedbává pohyb v kloubu číslo 1 (Platonov et al, 2012).

Kvalitativní ukazatele pohybu ruky:

- Pohyby rukama ve směru „k tělu“ jsou rychlejší, než ve směru „od těla“, ale jsou méně přesné.
- Rychlost pohybu ve vertikální rovině je větší než ve vodorovné.
- Rychlost pohybu „zleva doprava“ (pro pravou ruku) je větší než v obráceném směru.
- Největší rychlost mají pohyby „shora dolů“, nejmenší rychlost mají pohyby „od těla“ a „zdola nahoru“ (Malý, Král a Hanáková, 2010).

2.1.5 Pohybový systém člověka

Jelikož pohybový systém člověka hraje důležitou funkční roli v ergonomických normách, poskytneme o něm základní informace, stejně jako funkce a biomechanické vlastnosti.

Pohybovým systémem se rozumí souhrn kostí kostry, kloubů, šlach, svalů, jejich angiologickým a senzomotorickým systémem. Pomocí nervové regulace se zajišťuje pohyb a další motorická aktivita. Pohybový systém zahrnuje 4 funkční komponenty:

- **Kosti a klouby.** Fungují jako páky poháněné svaly a také chrání orgány před zraněním.
- **Svaly a šlachy.** Svaly jsou spojeny s kostmi, šlachami a podílejí se na pohybu trupu a končetin, udržují rovnováhu člověka a fixují klouby. Šlachy jsou pojivové tkáně a hlavní jejich funkcí je přenos síly ze svalu na kost a uložení elastické energie. Spolu se svaly jsou šlachy aktivní funkcí systému.
- **CNS a PNS.** Centrální nervový systém se skládá z mozku a míchy a PNS z kořenů, plexu a nervů. Oba systémy regulují základní životní procesy, jako je dýchání, polykání atd. Také uvádějí do pohybu pohybový systém. Proto mají CNS a PNS v těle výkonnou funkci.

- **Žíly.** Mají funkci zásobování pohybového aparátu základními živinami (Bernaciková, Kalichová a Beránková, 2010).

Na pohybu se podílí řada orgánů a orgánových systémů, například dýchací systém. Přímo pohybovým systémem jsou však kosti, klouby, šlachy a svaly. Dále budeme diskutovat o jejich vlastnostech z mechanického hlediska.

2.1.5.1 Funkce a mechanické vlastnosti kosti

Odolnost kostní tkáně proti mechanickému zatížení lze charakterizovat takovými vlastnostmi, jako je tvrdost, tuhost a pružnost. Kosti jsou také nehomogenní a anizotropní, což znamená, že jejich vlastnosti jsou přímo závislé na směru působení síly.

Pružnost je určena Youngovým modulem, který je také modulem pružnosti. Je důležité si uvědomit, že modul pružnosti záleží pouze na vlastnostech biomateriálu, vůbec ne na jeho velikosti. Dva důležité body při nárůstu napětí jsou mez pružnosti a mez pevnosti. První bod je bod bez návratu, kdy se po ukončení zátěže tkáň nevrátí do své původní polohy. Po překročení druhého bodu, meze pevnosti, dojde k narušení integrity tkáně. Mez pevnosti je vždy větší než mez pružnosti (Bernaciková, Kalichová a Beránková, 2010).

2.1.5.2 Funkce a mechanické vlastnosti šlachy

Hlavní funkcí šlach, jako pojivové tkáně, je přenos síly mezi svalem a kostí a uložení elastické energie. Šlachy se skládají ze dvou typů vláken, elastických a kolagenních. Poslední se mohou natahovat kolem 10% jejich délky.

Síla šlach je asi čtyřnásobkem maximálního izometrického tahu odpovídajícího svalu. Stejně tak šlachy jsou nelineární elastické struktury. Jakmile se zvyšuje napětí, zvyšuje se také tuhost šlachy. Mez pevnosti šlachy je přibližně 100 MPa. Důležitým faktorem pro kontrakci aktivních svalů je pružnost šlach. Když je šlacha napnutá, sval se stahuje a naopak. Také vzhledem k tomu, že šlacha má vyšší pevnost než sval, v případě úrazu nejčastěji praskne sval (Bernaciková, Kalichová a Beránková, 2010).

2.1.5.3 Funkce a mechanické vlastnosti svalu

Hlavní funkcí svalů je uvedení těla do pohybu a zahřátí těla. Kosterní svaly jsou navrženy tak, aby poskytovaly ochranu před vnější zátěží, uvádějí tělo do pohybu, zpomalují nebo zrychlují pohyb. Do pohybu jsou zapojeny složité komunikující svalové skupiny spolu s jejich fixátory, antagonisty a svaly s neutralizační funkcí. Klidová pevnost v tahu lidské svalové tkáně se pohybuje mezi 0,26 - 0,90 *MPa*. V případě nátahu svalové tkáně o 40–50% fyziologické délky dojde k nevratným změnám. Poškození cestou přetržení svalové tkáně nastává v případě změny fyziologické délky o jeden a půl až dvakrát.

Síla svalových vláken v maximálně kontrahovaném svalu se u různých typů svalů liší. Přibližná střední hodnota je asi 1,25 *MPa*. Účinnost svalové práce je přibližně 20%, zbytek energie se přemění na teplo (Bernaciková, Kalichová a Beránková, 2010).

2.1.5.4 Svalová síla a její hodnoty

Svalová síla je definovaná jako síla, kterou jsou stahovány k sobě dva protilehlé úpony svalu. Jsou dva druhy svalové síly, statická a dynamická.

Statická svalová síla nemá zkrácení svalů, mění se jenom svalové napětí. Je prakticky změřitelná. Typický příklad – držení břemene.

Dynamická svalová síla podmiňuje to, že napětí zůstává stejné, ale sval se zkracuje. Není přímo měřitelná. Příkladem v praxi je ruční ovládání stroje. Sval při stahu vyrábí sílu, která je úměrná jeho průřezu. Maximální síla svalu je 70 až 120 *N* na *cm*² (Malý, Král a Hanáková, 2010).

Základní ustanovení doporučených mezních sil při obsluze strojních zařízení jsou v ČSN EN 1005 část 3: Bezpečnost strojních zařízení – Fyzický výkon člověka. Hodnocení sil v této souvislosti se provádí ve třech krocích:

- určení typu uživatelů (muži, ženy, věk),
- určení izometrické síly vzhledem k uživatelům s ohledem na rychlost, frekvenci a trvání vynakládané síly,
- stanovení přípustnosti a rizika při vynakládání síly.

Maximální izometrická síla při práci jednou rukou je v pracovní poloze vsedě směrem nahoru 50 *N*, dolů 75 *N*, ven 55 *N*, dovnitř 75 *N*.

Při tlačení s oporou trupu 275 *N*, bez opory trupu 62 *N*, při tažení s oporou trupu 225 *N* a bez opory trupu 55 *N*.

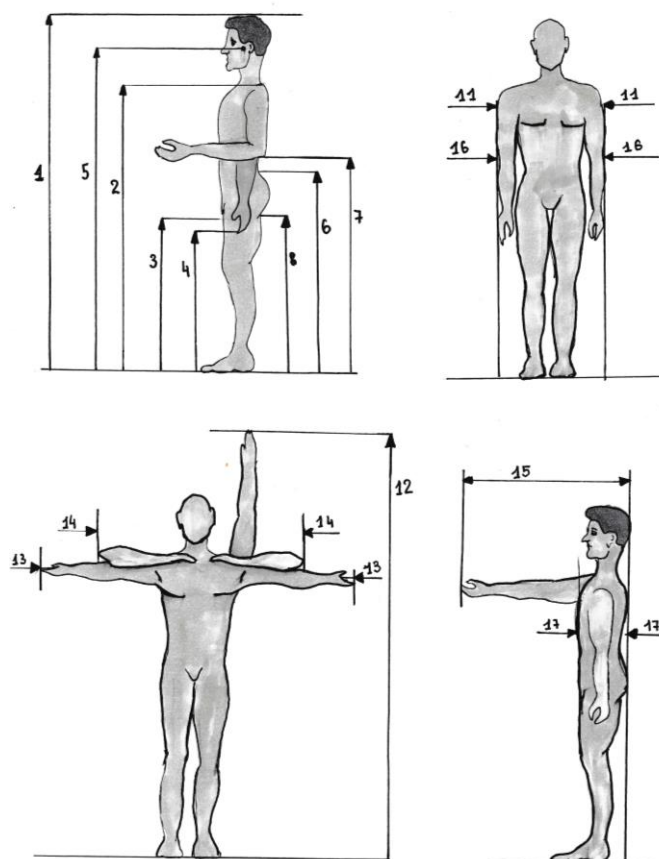
Při práci vstoje (zapojení celého těla) při tlačení 200 *N* a při tažení 145 *N* (ČSN EN 1005–3 + A1, 2009).

2.1.6 Antropometrické údaje

Nejdůležitější z ergonomických vlastností – velikost těla a jeho parametry, jsou klíčem k designu a konstrukci. Vzhledem k tomu, že drtivá většina budov a staveb je navržena tak, aby v nich člověk mohl setrvávat, jejich prostorové parametry jsou regulovány antropometrickými ukazateli, včetně statických rozměrů a proporcí těla. Stejně se přihlíží i k objemu pracovního prostoru člověka v procesu a vzdáleností pohybu a na pracovním místě.

Všeobecně jsou klasické a ergonomické antropometrické prvky. První z nich se používají při studiu tělesných proporcí, věkové morfologie, k porovnání morfologických charakteristik různých skupin populace a druhé se používají při navrhování produktů a organizaci práce (Serdyuk, 2019).

Aby bylo možné aplikovat ergonomické standardy v automobilovém průmyslu, je nutné vzít v úvahu obrovské rozdíly v charakteristických rozměrech lidského těla. Evropská norma ČSN EN 547-3+A1 popisuje hlavní údaje o rozměrech částí těla platné pro střeoevropskou populaci. Antropometrické údaje uvedené v EN 547-3 jsou dané na základě statických měření nahých osob. To znamená, že neberou v úvahu pohyby těla, oděv, zařízení, činnost strojního zařízení ani podmínky prostředí. Údaje v normě jsou udělané na základě výsledků antropometrických šetření pro populační skupiny v Evropě. Berou se v úvahu muži i ženy. Podle požadavků uvedených v EN 547-1 a EN 547-2 se uvádějí hodnoty 5., 95., a 99. percentilu příslušné populační skupiny v Evropě (ČSN EN 547-3 + A1, 2009).



Obrázek 4: Příklad základních antropometrických měření ve stoje. Zdroj: autor.

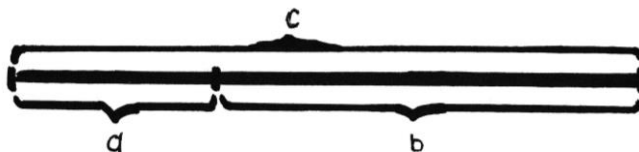
Existuje koncept tzv. standardního člověka. Podle ČSN EN 8996 standardním člověkem se rozumí z hlediska tělesných rozměrů osoba s průměrnými antropometrickými znaky (viz Tabulka 1).

Tabulka 1: Údaje pro standardní osoby (podle ČSN EN 8996)

Tělesná výška v Tělesná výška (v metrech)	1,75 (muži)	1,6 (ženy)
Tělesná hmotnost (v kilogramech)	70	60
Povrch těla (ve čtverečních metrech)	1,8	1,6
Věk (v počtu roků)	30	30
Klidový metabolismus (ve wattech na čtvereční metr)	50	50

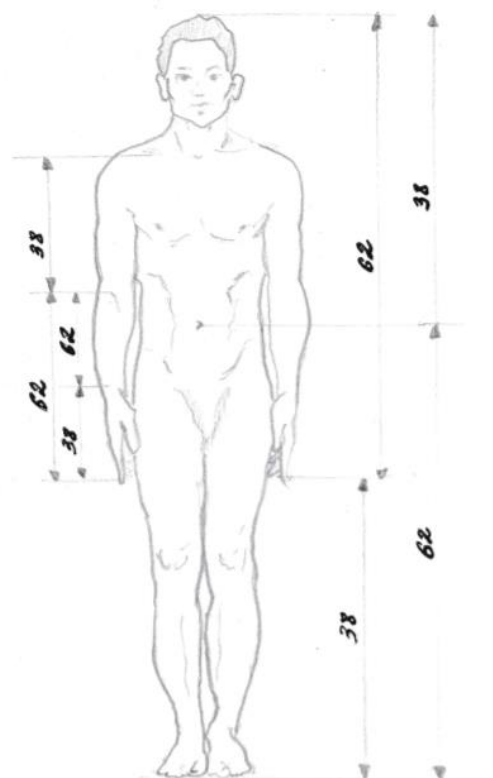
2.1.6.1 Zlatý řez v proporcích člověka

Vše v přírodě má přibližně stejné proporce. Číslo vyjadřující tyto proporce je 1,618. Zlatým řezem se označují rozdělené úsečky na dvě části tak, aby platilo, že poměr menší části k větší části bude ten samý jako poměr větší část k celé úsečce (Brandejský, 2014).



Obrázek 5: Proporce zlatého řezu. Zdroj: autor.

Pojem zlatého řezu je široce používán v architektuře a umění, ale lze ho najít také v této bakalářské práci. V roce 1854 vydal německý badatel profesor Zeising svou práci „Nejnovější teorie o proporcích lidského těla“, kde se zabývá zlatým řezem. Zeising měřil asi dva tisíce lidských těl a dospěl k závěru, že zlatý řez vyjadřuje průměrný indikátor.



Obrázek 6: Zlatý řez v proporcích člověka. Zdroj: autor.

Rozdělení těla podél pupeční jizvy je nejdůležitějším ukazatelem zlatého řezu. Proporce mužského těla kolísají v průměrném poměru $13:8 = 1,625$ a jsou poněkud blíže zlatému poměru než proporce ženského těla, ve vztahu, k nimž je průměrná hodnota poměru vyjádřena v poměru $8:5 = 1,6$. Proporce zlatého řezu se také projevují ve vztahu k ostatním částem těla – délce ramene, předloktí a ruky, ruce a prstů atd (Brandejský, 2014).

I když antropometrické údaje mohou dávat odlišné proporce, stejně lze zlatý řez použít pro přibližné relativní výpočty.

2.2 Technická část

2.2.1 Robotika

Robotika je odvětví strojírenství, které se zabývá vývojem, tvorbou, provozováním strojů a zařízení naprogramovaných tak, aby nezávisle plnily konkrétní úkoly. V závislosti na cílech a oblasti použití se rozlišují různé typy robotiky: vesmírná, domácí, průmyslová, lékařská atd. Dnes je již obtížné najít pole činnosti, které by nebylo robotizováno. Důvodem je obrovská škála vyráběných robotů a technická řešení, která se v nich používají (Havelka a Stoffová, 2017). Například podle svého účelu se roboti dělí na manipulační a mobilní. První se vyznačují velmi vysokou přesností a velkým počtem operací, které jsou schopni provádět vlastní rukou (manipulátorem). Posledně jmenovaní používají pro pohyb různá technická řešení: na kolech, pásech, vzduchem, plazením. Například roboti pohybující se plazením jsou velmi užitečné pro pátrání a záchranu osob uvězněných pod troskami budov v důsledku přírodních katastrof (Hlavač).

S využitím robotiky by mohlo být školení a training zaměstnanců v automobilovém průmyslu více atraktivní pro zaměstnance a méně zatěžující pro školící personál.

2.2.1.1 Kolaborativní roboty

V dnešním světě se postupně zvyšuje zájem o kolaborativní robotiku. Jedním z důvodů je koncept Průmyslu 4.0, který naznačuje vysoký podíl automatizace v celém průmyslu (Pokorná, 2020). Koncept Průmyslu 4.0 popisuje decentralizovaný výrobní řetězec, který sahá od návrhu až po dodavatelský řetězec, výrobu, distribuci a služby zákazníkům (Kraft, 2017).










Kolaborativní nebo kooperativní robot (obvykle se označují slovem cobot) je automatické zařízení, které může vytvářet nebo vyrábět různé produkty ve spolupráci s člověkem. Coboty – nový směr ve vývoji průmyslové robotiky, jsou navrženy pro interakci s lidmi a sdílení společného pracovního prostoru. Mezinárodní Federace Robotiky předpokládá, že coboty jako jeden z nejdůležitějších trendů v budoucnu budou formovat trh (Anon, 2019).

Průmyslové roboty jsou naprogramovány tak, aby prováděly určité operace, a nejsou schopné reagovat na skutečnost, že kolem nich mohou lidé pracovat, proto ve výrobě mohou ohrozit lidský život a zdraví. Lze říci, že průmyslové roboty jsou schopné porušit první zákon Asimovovy robotiky „*Robot nemůže ublížit člověku nebo svou nečinností nedovolí člověku být poškozeno*“ (Asimov, 2011). Proto jsou instalovány na speciálně určených místech (ochranné oplocení), natřeny jasnými barvami a celkově je prostor robota chráněn tak, aby neohrožoval lidi. U jakékoli fyzické interakce mezi člověkem a průmyslovým robotem musí být mechanismus nejprve vypnut. Oproti tomu coboty jsou vybaveny senzory, které na základě měření zatěžujícího momentu dokáží detekovat kontakt s člověkem a včas reagovat, aniž by mu ublížili. Dá se říct, že jsou navrženy tak, aby je bylo možné použít v aplikacích, kde nebudou první zákon robotiky. Některé modely lze instalovat přímo na pracovišti s člověkem. Coboty se, na rozdíl od průmyslových robotů, programují velmi snadno. Mohou jim být zadány pracovní pokyny bez kódování pomocí grafického uživatelského rozhraní (Anon, 2021).

Plánování trajektorie zahrnuje předběžné formalizace a prezentace parametrů trajektorií pohybu (Černohorský a Bogdanovskiy, 2017). Některé modely robota jsou schopné se učit. Pracovník může například nejprve pohybovat manipulátorem pomocí rukou po požadovaných trajektoriích do požadovaných pozic, dále bude cobot tyto pohyby opakovat sám. Kvalifikovaní zaměstnanci tak mohou snadno přeprogramovat coboty a použít je pro nejrůznější úkoly. Coboti jsou v současné době dražší, než průmysloví roboti odpovídajících parametrů (dosah, nosnost). Pro jejich umístění

se zpravidla nevyžaduje vyhrazená oddělená oblast. Rychlost jejich pohybu je ale nižší, než rychlost běžných průmyslových robotů, což znamená, že jejich produktivita je nižší a nehodí se na všechny druhy úloh (Pokorná, 2020).

Tabulka 1: Přehled cobotů a jejich nejdůležitějších parametrů zpracované dle Technored.ru

Obrázek	Název	Počet os	Dosah [mm]	Užitečné zatížení [kg]	Přesnost opakování [mm]	Hmotnost [kg]
	LIFE ROBOTICS CORO	7	865	2	1,0	26
	PRODUCTIVEROBOTICS OB7	7	1000	5	0,1	24
	UNIVERSAL ROBOTS – UR10e	6	1300	10	0,1	18,4
	KUKA – LBR IIWA 7 R800	7	800	7	0,1	22
	KUKA – LBR IIWA 14R820	7	820	14	0,15	30
	FANUC CR 4IA	6	550	4	0,02	48
	F&P PERSONAL ROBOTICS – PROB 2R	6	775	3	0,01	20
	KAWADA INDUSTRIES NEXTAGE	15	577	1,5	0,03	29
	MOTOMAN/YASKAVA – HV10	6	1200	10	0,1	47
	MABI SPEEDY 12	7	1250	6	0,1	12
	PRECISEAUTOMATION PAVP6	6	432	2,5	0,02	28

Většina cobotů jsou malé a lehké (15–20 kg, výška asi 1,5 m). Proto je lze relativně snadno přemístit a použít v různých bodech výrobního řetězce. Coboti jsou obvykle schopni manipulovat s břemeny o hmotnosti do 10 kg nedělají jim problém opakované činnosti. Bezpečnostní funkce programu a výkon kolaborativního robota jsou definované technickou specifikací ISO/TS 15066 a souborem norem ČSN EN ISO 10218 (Anon, 2021).

Podle mezinárodní normy ČSN EN ISO 10218-1 existují čtyři typy provozu kolaborativních robotů:

- **bezpečnostní monitorované zastavení:** když se osoba přiblíží, cobot načte pohyb pomocí senzorů a zastaví se, dokud osoba neopustí pracovní prostor,
- **ruční ovládání:** cobot je vybaven speciálními zařízeními, která rozpoznávají tlak ruky. Když se robot "neučí", ale vykonává své přímé funkce, musí být člověk mimo hranice svého pracovního prostoru,
- **monitorování rychlosti a polohy:** cobot, který sleduje pohyb lidských pracovníků a zpomaluje na bezpečnou rychlost nebo se úplně zastaví, když se k němu přiblíží osoba,
- **omezení síly a příkonu vlastní konstrukcí nebo ovládáním:** pokud cobot cítí v cestě silný odpor, zastaví se (ČSN EN ISO 10218-1, 2012).

Robot, kterého jsme použili k provedení experimentu, je jedním z malého počtu cobotů, které jsou pro dané účely vhodné. Za prvé, KUKA LBR iiwa 7 patří k typu kolaborativních robotů s omezením síly a příkonu vlastní konstrukce nebo ovládáním, což umožňuje měřit sílu působící na robota. Za druhé, mnoho cobotů má mnohem nižší užiteční zatížení než KUKA LBR iiwa (viz Tabulka 1). Díky sedmi osám je tenhle robot vynikajícím pomocníkem při práci s lidmi, a zejména v našem experimentu. Jeho konstrukce díky počtu os zabraňuje zaseknutí lidské ruky mezi klouby robota (Ferkl, 2019).

2.2.2 Singularita

Americký národní standard pro průmyslové roboty a robotické systémy definuje singularitu jako „stav způsobený kolineárním vyrovnáním dvou nebo více os robotů, které

má za následek nepředvídatelný pohyb a rychlost robota“. Proto jsou definovány tři typy singularit, podle kterých zarovnání kloubů způsobuje problém:

- **Singularita zápěstí.** Dochází k nim, když se dvě osy zápěstí robota srovnají navzájem. To může způsobit, že se tyto klouby okamžitě pokusí otočit o 180 stupňů.
- **Singularita ramen.** K tomu dochází, když se střed zápěstí robota vyrovná s osou kloubu 1. Způsobí to, že se klouby okamžitě otočí o 180 stupňů. Podmnožinou je singularita zarovnání, kde se první a poslední klouby robota navzájem srovnávají.
- **Singularita loktů.** K tomu dochází, když střed zápěstí robota leží ve stejné rovině jako klouby 2 a 3. Singularity loktů vypadají, jako by robot „dosáhl příliš daleko“, což způsobí zablokování lokte v dané poloze. (Owen-HILL, 2016)

3 Výzkumná část

V rámci výzkumné části jsme vytvořily modelovou situaci pro použití a nácvik utahovačky. Dále jsou v této kapitole uvedeny metodické postupy pro správný nácvik konkrétní pracovní operací z pohledu biomechaniky a ergonomii a taktéž výsledky experimentu.

3.1 Cíle a výzkumné předpoklady

V daném výzkumu provedeme návrh modelové situace pro použití a nácvik utahovačky, vypracujeme metodické postupy pro správný nácvik konkrétní pracovní operace z pohledu biomechaniky a hlavně prověřit možnost využití interaktivních robotů pro správný nácvik ergonomických postupu ve výrobě.

Během experimentu předpokládáme, že se interaktivní roboty firmy KUKA mohou využívat pro správný nácvik ergonomických postupů ve výrobě a také předpokládáme, že metodické postupy vypracované z pohledu biomechaniky umožňují provádět konkrétní pracovní operací nejméně energeticky náročně. Použijme získané teoretické dovednosti na odpovídání výzkumné otázky ohledně ergonomických vlastnosti utahovačky.

3.2 Metodika výzkumu

Pokus byl proveden pouze v laboratořích robotiky CXI TUL, protože z důvodu opatření souvisejících s pandemií COVID-19 nebylo možné jej provést v rámci závodní polikliniky Škoda-Auto.

Pro experimentální modelování pracovní operaci jsme použili program, který vytvořil v rámci své diplomové práce student Marhoul (2017). Aplikace je vytvořena takovým způsobem, že umožňuje nastavit velké množství cvičení pro rehabilitaci jednoho pacienta. Za účelem ověření konkrétní operaci pomoci figurantů jsme prohodili funkce programu, tím pádem jsme použili jeden cvik pro více „pacientů“.

Program má několik funkcí. Ukládání karty pacienta se jménem, což v případě prohození funkce znamená uložení složky se jménem cviku. Ukládání dat vzniklých v průběhu provedení cvičení. Nastavení stálé rychlosti robota během cviku, nebo

intervalu zaznamenání bodu umožňující nastavení individuální rychlosti. Obě funkce nemohou být vybrané současně. Dále obsahuje funkce, související přímo s definováním cviků. Na začátku je nastavení počáteční polohy. Po jejím úspěšném zadání a potvrzení následuje volitelná funkce nastavení fixace libovolných os robota. Po jejím nastavení, nebo přeskočení je následně dostupná funkce zadávání cviku. Dále je možnost ukládání cviku ve složce pacienta, nebo smazat ho a provést změny. Při nahrávání cviku máme volitelnou možnost vybrat tuhost os, čímž se dá zvětšit citlivost robota a do určité míry měnit trajektorii pohybu. Poslední funkce programu je uložení získaných v průběhu cviku dat.

Při používání tohoto programu jsme narazili na určité potíže. První problém se objevil okamžitě při pokusu o použití programu v jiném počítači. Vyřešili jsme to instalací programu na původní školní počítač, na kterém byl psán kód. Potíže byly i dále, v nastavování cvičení robot otáčel klouby v místech bránicích pohodlné poloze vstojе pro člověka. Důvodem jsou samotné vlastnosti robota: 7 stupňů volnosti, které mu umožňují nekonečný počet poloh dosahování bodu a vyhýbání singularitě os. Našli jsme částečné řešení problému blokováním 1. osy v prvním cviku a 3. osy ve druhém cviku. Tímto způsobem jsme částečně omezili nezávislý pohyb robota. Možným řešením problému by byla schopnost omezit robota v kartézských souřadnicích. Zjistili jsme také problém s ukládáním dat. Adresář byl uveden napevno v kódu programu, a proto bylo nutné přeinstalovat program na jiný disk.

Navíc jsme objevili při experimentu limity samotného robota. To spočívá v nepřesnosti výpočtu aplikované síly. K tomu dochází ze dvou důvodů. První je vlastní výpočetní systém robota. Síla se nevypočítává přímo v místě působení, ale vypočítává se na základě momentu působící síly a polohy robota v daném okamžiku. Takže pro stejně působící sílu při různých pozicích robota systém vypočítává dvě různé hodnoty. Druhým důvodem nepřesnosti je kompenzace gravitační síly. Působí na všechny klouby robota a také nemůže být dokonale přesná.

Celkově program umožňuje vytvářet cviky nahrubo, ale pro přesnější zadávání trajektorií za účelem nácviku ergonomických postupů ve výrobě jsou nutné buď další funkce ladění, anebo jiný interaktivní robot.

3.2.1 Utahovačka firmy Makita a její ergonomické vlastnosti

Utahovák je zařízení, pomocí kterého se spojují a rozebírají závitové spoje. Používá se například v případech, kdy není možnost použít jednoduchý klíč, například těžko přístupná spojení, zrezivělý kov, kde se musí odšroubovat zvláštní matice, ale hlavně tam, kde je nutné dodržet přesně předepsaný dotahovací moment a další parametry (z důvodu zaručení kvality spoje). Hlavním rysem utahováku je kontrolovaný točivý moment při utahování nebo odšroubování závitových spojů a možnost záznamu naměřených hodnot při utahování. Cena rázových utahováků se velmi liší, vše záleží na modelu, typu a vlastnostech.

Pro provedení experimentální činnosti s kolaborativním robotem firmy KUKA jsme použili nefunkční model rázového utahováku firmy Makita.

Tento kompaktní přístroj váží přibližně 2,1 kg spolu s akumulátorem. Právě přítomnost akumulátoru dává tomuto zařízení určité výhody a nevýhody. Díky němu je zařízení zcela autonomní. Tato vlastnost je nezbytná v místech, kde z jakéhokoli důvodu není stabilní pracovní napájecí zdroj.

Mezi hlavní výhody utahováku patří ergonomicky tvarovaná rukojeť s pogumovaným povrchem, což dává možnost pohodlně držet nástroj v ruce při vykonávání rozmanitých druhů prací. Naopak nevýhodou z hlediska ergonomie je váha přístroje, což může vyvolávat větší únavu pracovníka při delší činnosti.

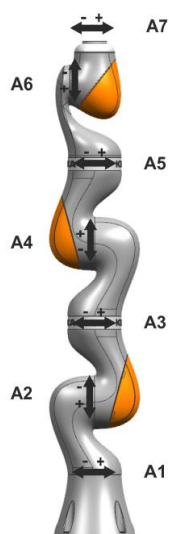
3.2.2 Robot KUKA LBR iiwa

Robot KUKA LBR iiWA je sériově vyráběný senzitivní robot, který dokáže spolupracovat s lidmi. LBR znamená německý „Leichtbauroboter“ (lehký robot), iiWA znamená anglický „intelligent industrial workassistant“ (inteligentní průmyslový asistent). Kolaborativní robot KUKA LBR iiwa je k dispozici ve dvou verzích s užitečným zatížením 7 kg a 14 kg (KUKA Roboter, 2015).



Obrázek 7: Robot KUKA LBR iiwa a jeho součásti (KUKA ROBOTER, 2015, s.9)

Pro výzkumnou část dané bakalářské práce jsme použili robota s nosností 7 kg. Robot je spojen klouby a má 7 os (viz Obrázek 7). Má tedy 7 stupňů volnosti. Tento rys umožňuje robotovi dosáhnout libovolného bodu s nekonečným počtem pozic, který u průmyslových robotů se 6 stupni volnosti není.



Obrázek 8: Osy KUKA LBR iiwa (KUKA ROBOTER, 2015, s.9)

Všechna elektrická vedení, řadiče motoru i samotné motory jsou instalovány uvnitř mechanického systému, což je další rys, který umožňuje bezpečné používání robota v blízké práci s člověkem. Každý kloub je vybaven snímačem polohy na vstupní straně a snímačem točivého momentu na výstupní straně. Tímto způsobem lze měřit vnější zatížení robota a přepočítávat jeho hodnotu na velikost a směr vnější síly (KUKA ROBOTER, 2015).

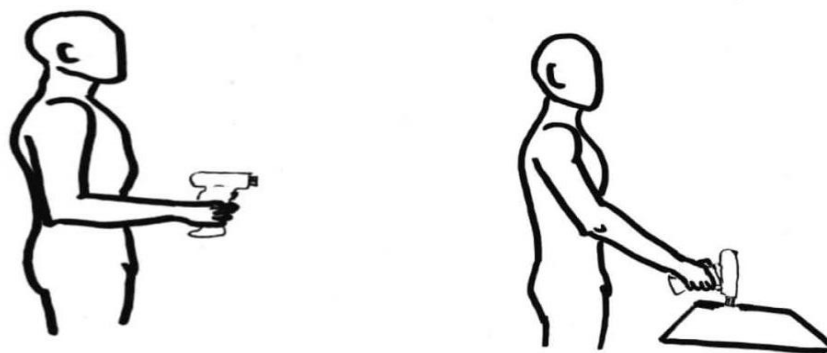
U tohoto robota jsme použili speciální konstrukci, která usnadňuje použití utahováku přichyceného na konci (viz Obrázek 9). Tato konstrukce je návrhem konstruktérů z Laboratoře robotiky CXI TUL



Obrázek 9: Namontována pomocná konstrukce. Zdroj: autor.

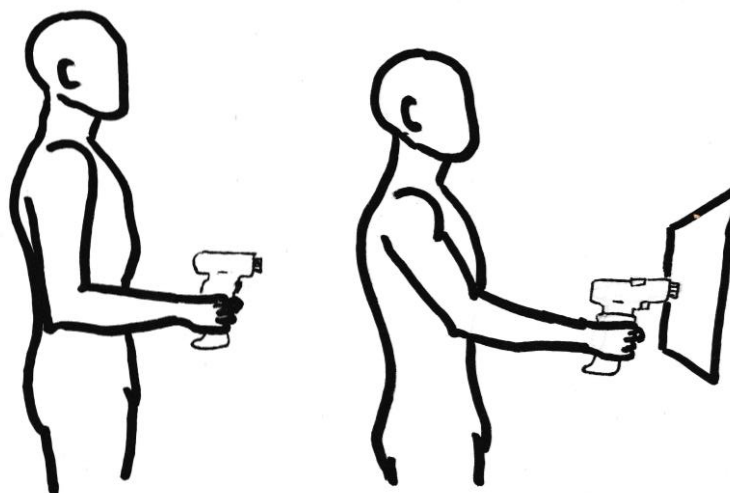
3.2.3 Návrh modelových situací

Za použití videí, které nám poskytla společnost Škoda-Auto s.r.o. (Martinec, 2021), jsme se rozhodli za modelovou situaci nadefinovat dva jednoduché cviky. První cvik pojmenovaný „Pohyb dolů“ představuje základní pohyb při práci s utahovákem, kde člověk navede svou rukou nástroj dolů, k pracovnímu panelu. Robot plynule z počáteční polohy začne směřovat lidskou ruku dolů na pracovní panel. Cílem figurantů v experimentu je umožnit robotu nasměřovat ruku dolů bez odporu. Poté, co robot dorazí k panelu, robot začne napodobovat práci utahováku, a konkrétně dělat chaotické pohyby do stran, jako kdyby člověk nedržel pevně rukojeť nástroje. V tomto kroku figuranti musejí zafixovat nástroj co nejpřesněji na jednom místě, čímž napodobí uvolnění šroubu. Po nějaké době se robot zastaví a plynule přesune lidskou ruku zpět do původní polohy. Úkolem je zde také nebránit pohybu robota.



Obrázek 10: Modelová situace "Pohyb dolu". Zdroj: autor.

Druhý cvik jsme pojmenovali „Pohyb dopředu“. Představuje také základní pohyb při práci s utahovákem, a konkrétně přímý pohyb vpřed. „Pohyb dopředu“ opakuje postup prvního cviku. Po posunu z počáteční polohy robot najíždí směrem k pracovnímu panelu, zatím co simuluje činnost utahováku při utahování šroubu. Poté se vrátí do své původní polohy. Cíle figurantů, které budou tím cvikem procházet, se neliší od cílů při vykonávání prvního cviku.



Obrázek 11: Modelová situace " Pohyb dopředu". Zdroj: autor.

3.2.4 Metodické postupy při zadávání cviků

Na základě provedené teoretické analýzy jsme zjistili, že při definici cvičení je nutné splnit několik podmínek, aby cviky vyhovovali ergonomickým normám.

Podle doporučených postupů práci s nářadím je doporučeno zachování neutrální polohy zápěstí. Tím je myšleno, že ve cviku se doporučuje nastavovat různé polohy nástrojů, nikoliv ruky. Při výběru nářadí, které se bude používat na cviky, je doporučeno dát přednost nářadí, které je určeno pro držení celou dlaní, nikoliv jenom prsty ruky.

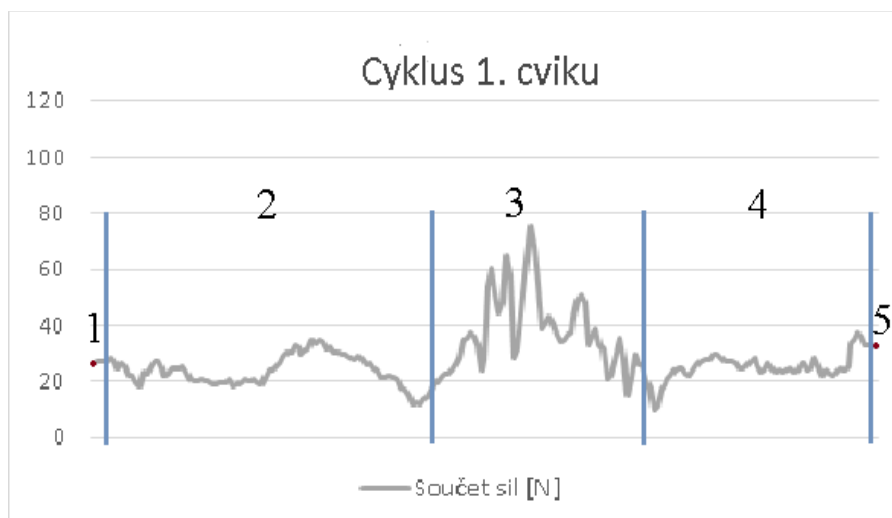
Prvním krokem u obou cviků je počáteční poloha. Kvůli tomu, že práce s utahovákem předpokládá polohu ve stoje, řídili jsme se optimální polohou, popsanou v kapitole 2.1.3. což zaručí narovnané tělo, rovnoměrnou podporou na obou nohách, absencí extrémních poloh v kloubech horních končetin a úsporné pohyby. Cvičení definoval pravák, proto byla při nastavení počáteční polohy pravá ruka ohnuta v úhlu 90°.

Druhým krokem při nastavování cviků je stanovení omezení v souladu s ergonomickými normami pro dosah ruky. Vzhledem k tomu, že pracovní poloha při utahování matic spadá do kategorie poměrně častých, ale ne zcela přesných pohybů, můžeme umožnit nastavit cviky ve všech třech oblastech (viz Obrázek 2.), doporučeným kritériem je však stále neopouštění zóny B během cviku.

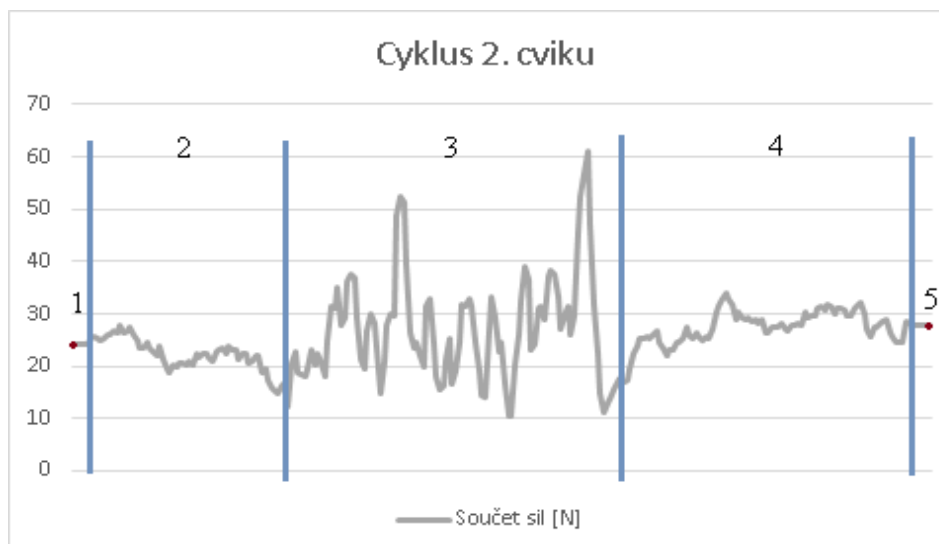
3.3 Analýza výzkumných dat

V této kapitole jsou představeny výsledky experimentu a grafy, zobrazující naměřené hodnoty v průběhu nácviku.

Robot je schopen vypočítat součet sil nebo jednotlivé síly působící na kartézské souřadnice. V souladu s tím jsme získali údaje o síle v osách X, Y a Z a absolutní hodnotu jejich součtu. Jakákoliv změna polohy os by však ovlivnila výsledky získané během experimentu. Odpovídající hodnoty lze tedy získat pouze ve formě součtu sil.



Graf 1: Cyklus cviku „Pohyb dolů“. Zdroj: autor.

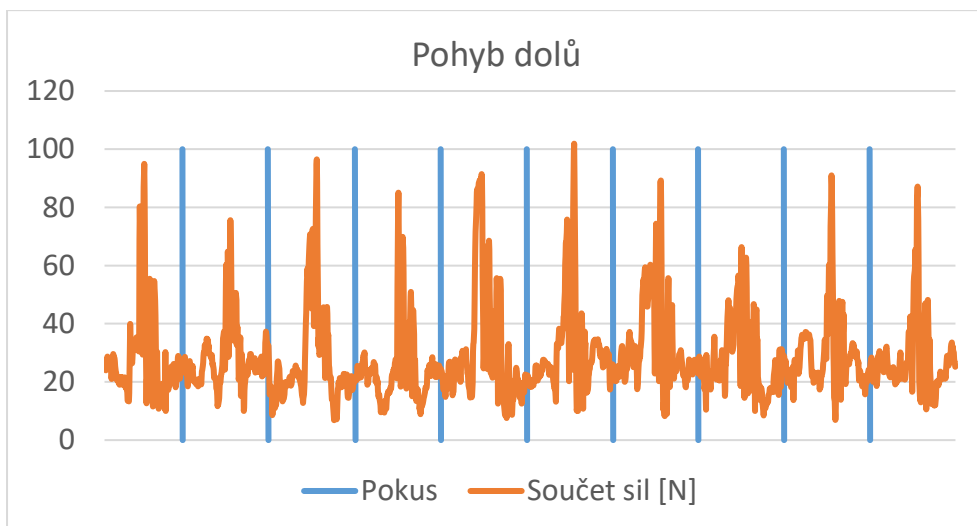


Graf 2: Cyklus cviku „Pohyb dopředu“. Zdroj: autor.

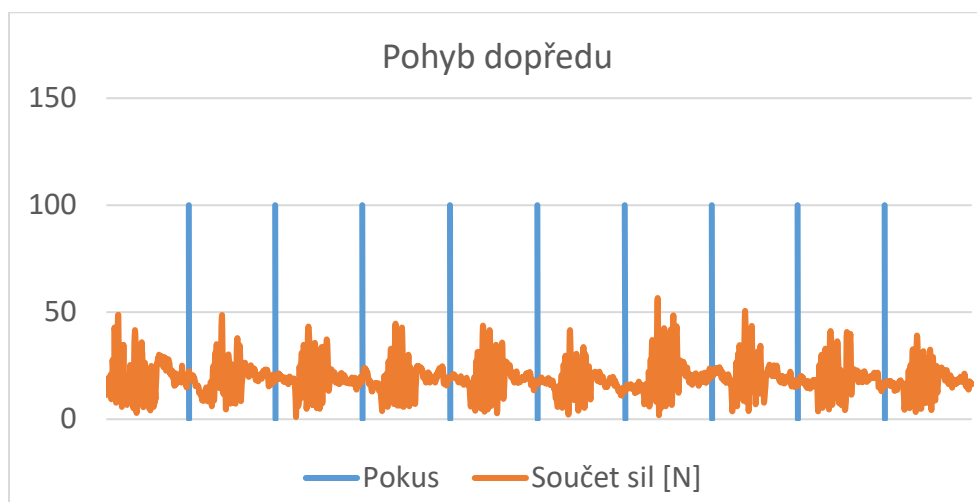
Rozdělili jsme provedení jednoho cyklu cvičení do 5 fází, abychom pomocí grafů ukázali průběh experimentu (viz Graf 1, Graf 2).

1. **Počáteční poloha A.** V této fázi figurant stojí v počáteční pozici a je připraven ke cviku.
2. **Pohyb k panelu.** Robot se začne pohybovat směrem k pracovnímu panelu. V této fázi není nutná žádná síla.
3. **Přikládání síly.** Jak je patrné z grafů (viz Graf 1, Graf 2), v této fázi se amplituda aplikované síly zvyšuje. Od respondenta se proto vyžaduje použití síly.
4. **Vrácení k počáteční poloze.** Robot postupně posune ruku figuranta směrem od pracovního panelu. V této fázi není vyžadováno použití síly.
5. **Počáteční poloha B.** Návrat na výchozí bod a taky začátek dalšího cyklu.

Respondent číslo 1 je muž, pravák, 178 cm. Tento figurant provedl obě cvičení, při kterých bylo zjištěno, že ho nic nerušilo. Tento respondent postupoval podle metodických postupů. V prvním cvičení byly síly náhodně rozloženy pouze v prvním opakování, poté respondent zlepšil své pohyby (viz Graf 3). Ve druhém cviku byly síly od začátku dobře uspořádané, poté došlo ke zlepšení nastavených pohybů (viz Graf 4).

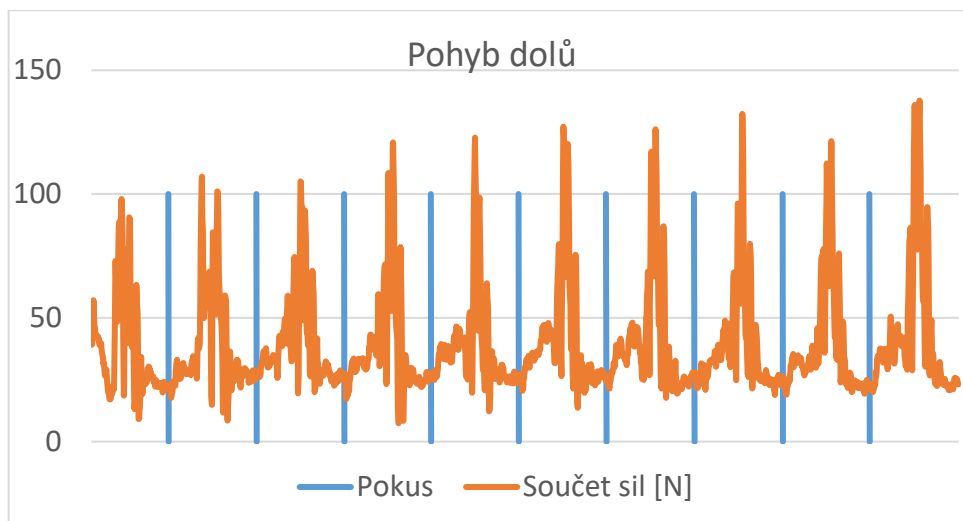


Graf 3: Výsledky prvního cviku respondenta č. 1. Zdroj: autor.

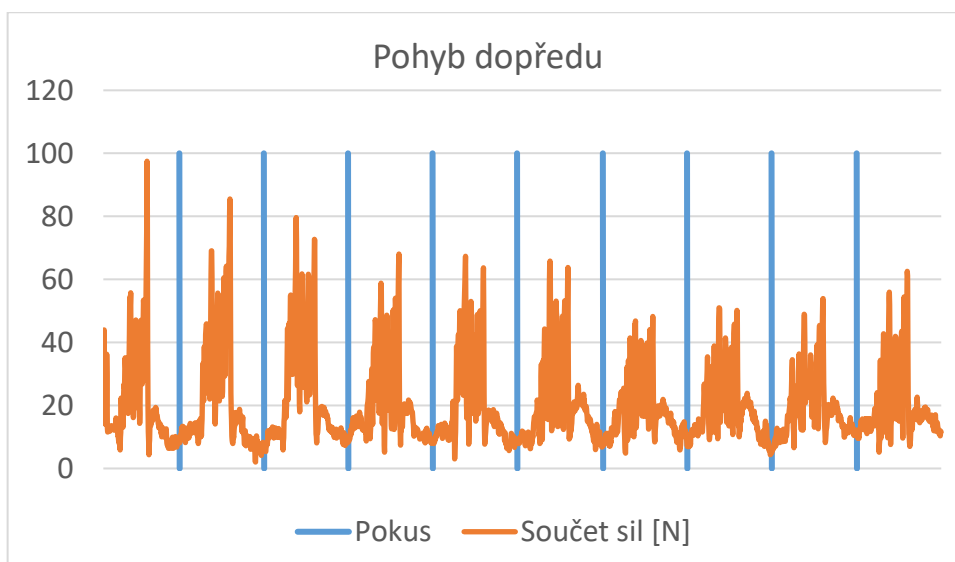


Graf 4: Výsledky druhého cviku respondenta č. 1. Zdroj: autor.

Respondent číslo 2 je žena, pravák, 168 cm. Tento respondent neměl při provádění cvičení žádné potíže. Rovněž byly dodrženy metodické postupy. V prvním cvičení je však vidět, že respondentka neučinila s každým novým opakováním úspornější pohyby, ale naopak v určité fázi cvičení zvýšila svoji sílu (viz Graf 5). Ve druhém cvičení graf ukazuje, že respondentka použila větší sílu v prvních třech opakováních, ale následná opakování způsobovala, že její pohyby byly stále úspornější (viz Graf 6).

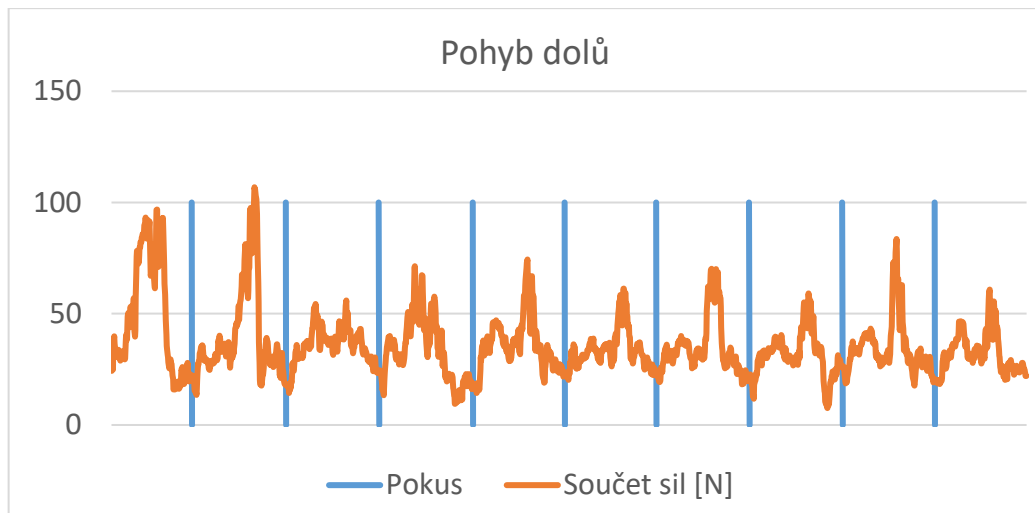


Graf 5: Výsledky prvního cviku respondenta č. 2. Zdroj: autor.

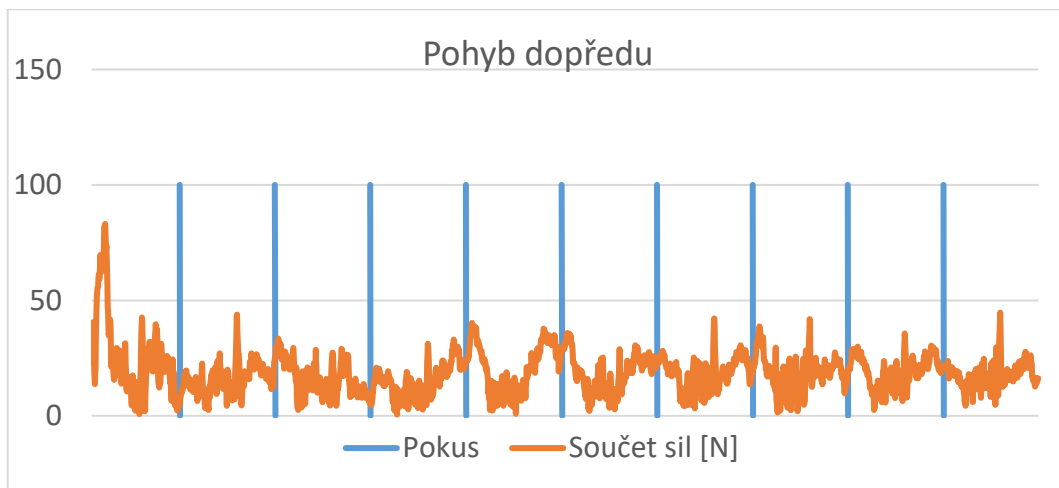


Graf 6: Výsledky druhého cviku respondenta č. 2. Zdroj: autor.

Respondent číslo 3 je muž, pravák, výška 173 cm. Při plnění obou úkolů respondent postupoval podle všech metodických postupů. Při provádění prvního cvičení, jak je vidět na grafu (viz Graf 7), byly provedeny chaotické pohyby pro první čtyři opakování, poté respondent vyladil účinnost pohybů. Druhé cvičení přináší stejné závěry.

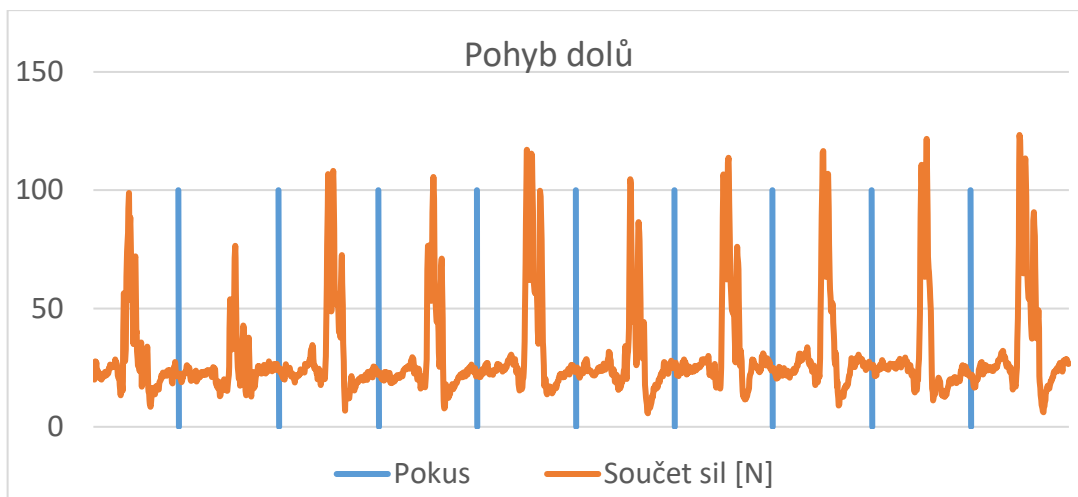


Graf 7: Výsledky prvního cviku respondenta č. 3. Zdroj: autor.

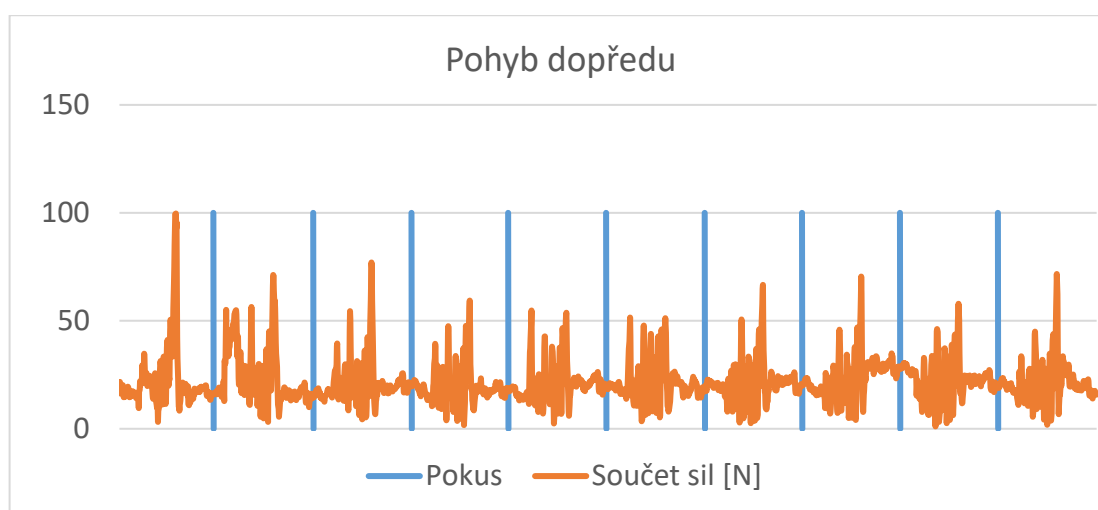


Graf 8: Výsledky druhého cviku respondenta č. 3. Zdroj: autor.

Respondent číslo 4 je muž, pravák, výška 183 cm. Tento respondent při provádění obou cvičení splnil metodické postupy. Během prvního cvičení, hned od prvního opakování začínají přesné pohyby (viz Graf 9). Při provádění druhého cvičení měl respondent náhodně rozložené síly až do druhého opakování (viz Graf 10), poté byly pohyby účinnější.

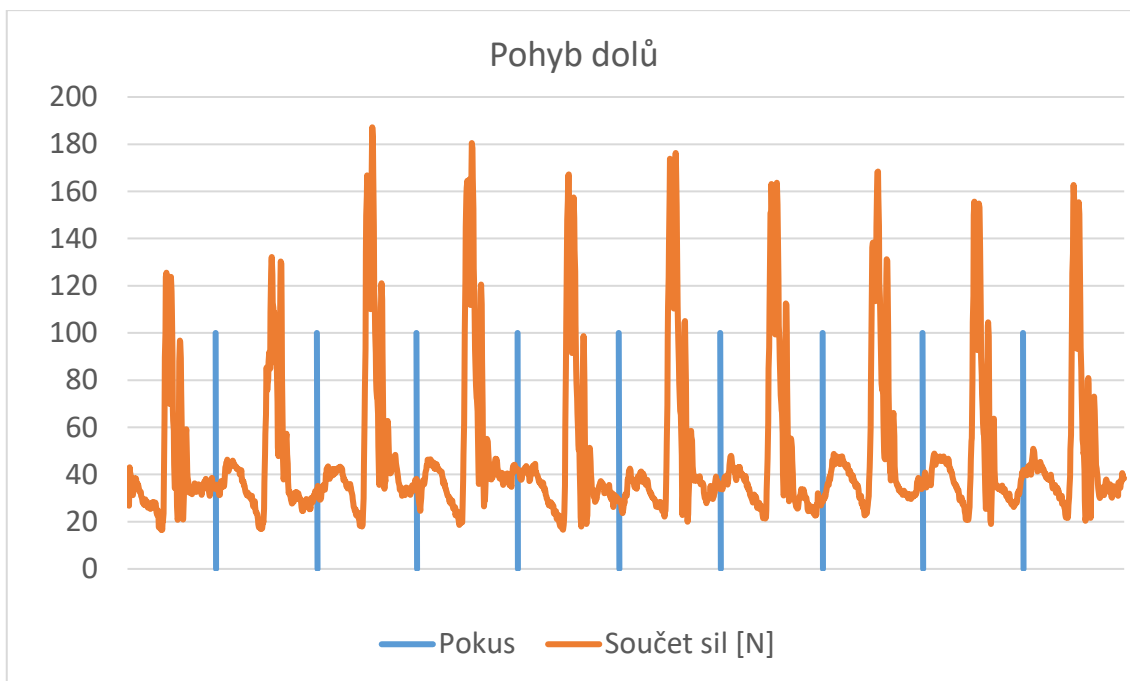


Graf 9: Výsledky prvního cviku respondenta č. 4. Zdroj: autor.

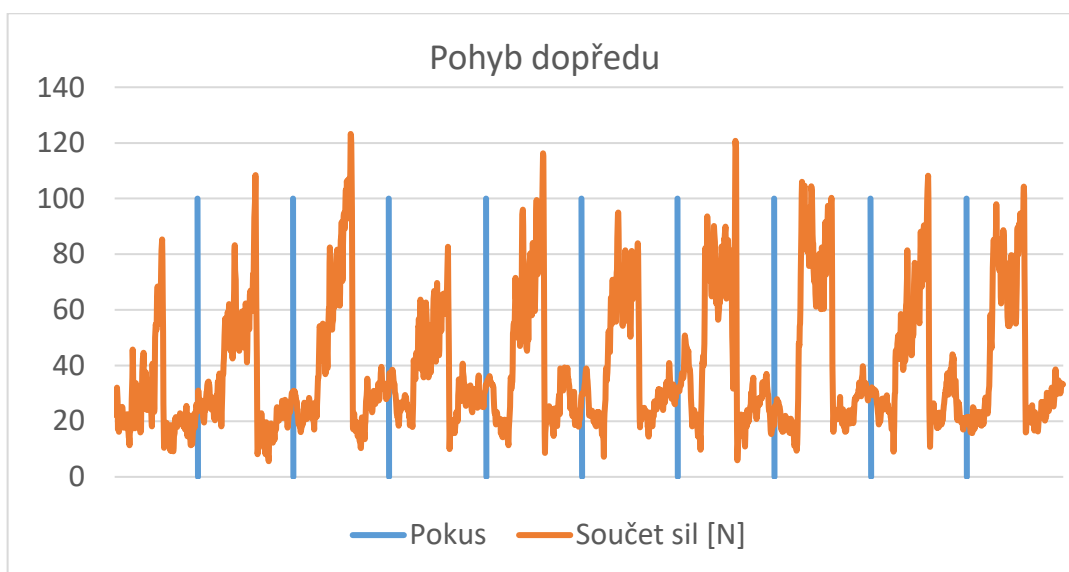


Graf 10: Výsledky druhého cviku respondenta č. 4. Zdroj: autor.

Respondent číslo 5 je muž, výška 184 cm, levák. Tento respondent je jediný ze všech respondentů, který běžně pracuje s utahovákem. Použitá síla výrazně překračuje ostatní výsledky (viz Graf 11, Graf 12). Lze předpokládat, že příčinou je rozvinutý svalový komplex v této oblasti použití, ale nelze to ověřit, protože v tomto výzkumu už takoví respondenti nejsou. Jelikož tento respondent patří do kategorie leváků, poloha kloubů robota mu bránila v provádění metodických postupů, a proto nemohl splnit správné provádění cvičení z ergonomického hlediska.

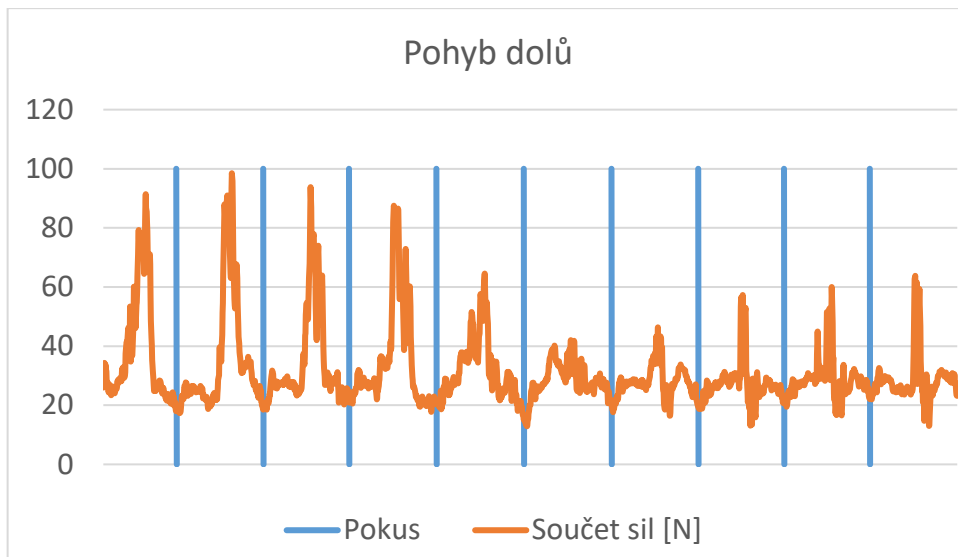


Graf 11: Výsledky prvního cviku respondenta č. 5. Zdroj: autor.

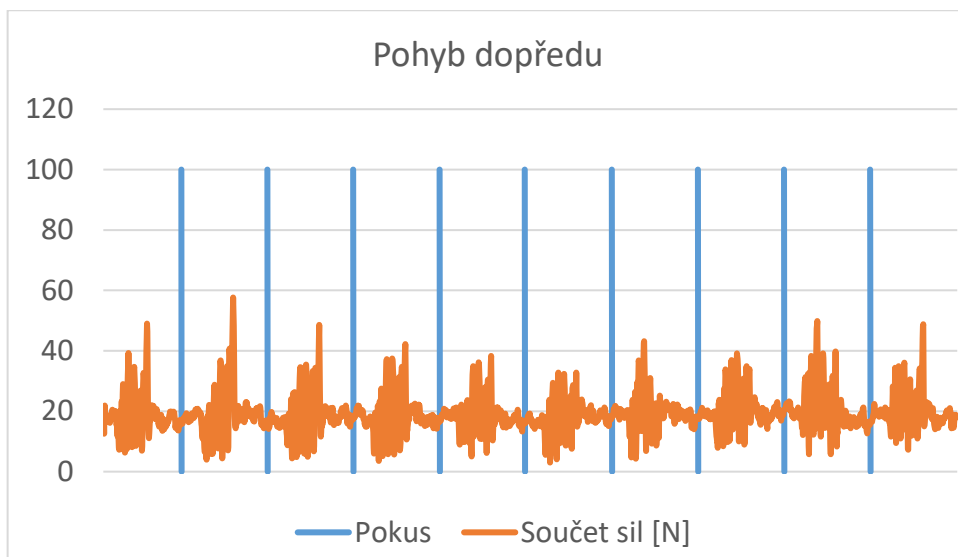


Graf 12: Výsledky druhého cviku respondenta č. 5. Zdroj: autor.

Respondent číslo 6 je žena, pravák, výška 167 cm Tento respondent splnil všechny metodické kroky, při provádění cvičení nebyly žádné problémy. V prvním cvičení respondent aplikoval síly chaoticky během prvních čtyř opakování (viz Graf 13), poté zdůraznil efektivnější pohyby. Ve druhém cvičení se respondent okamžitě zaměřil na efektivnější pohyby (viz Graf 14).

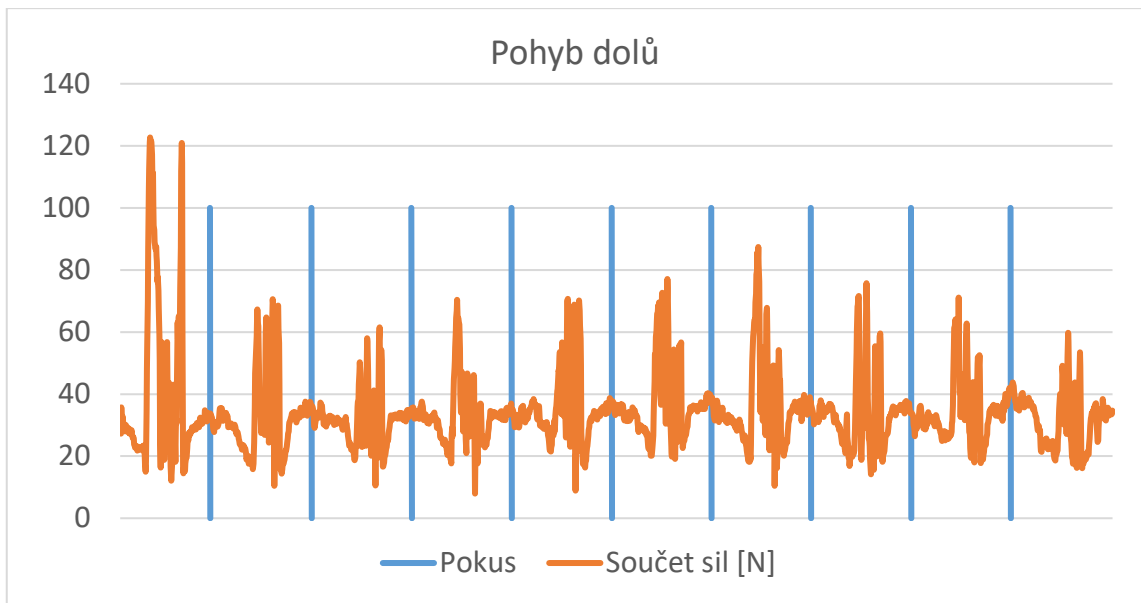


Graf 13: Výsledky prvního cviku respondenta č. 6. Zdroj: autor.

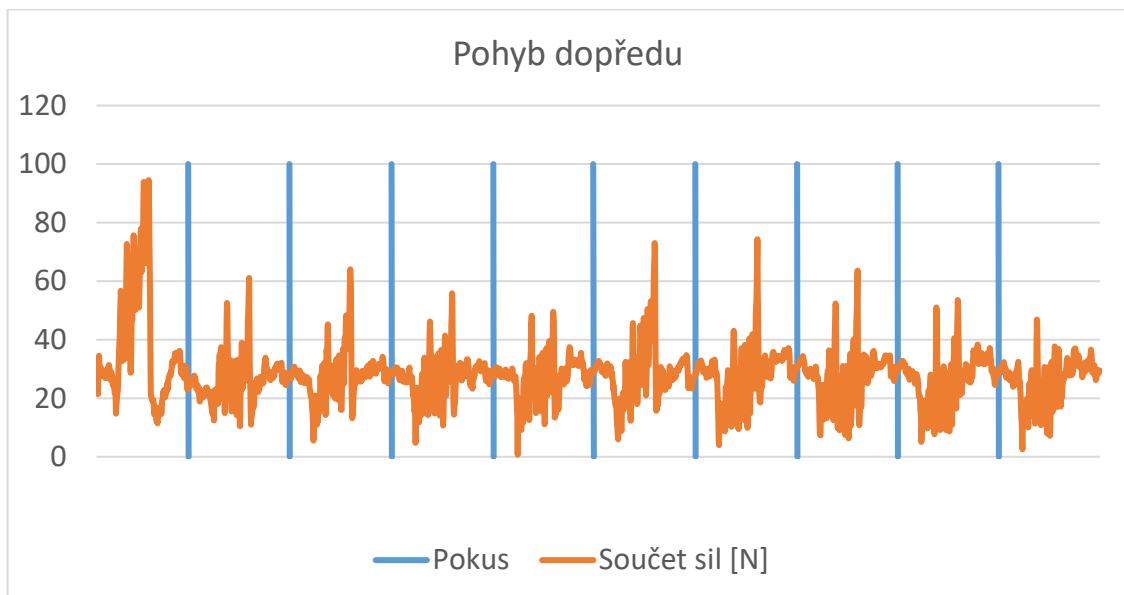


Graf 14: Výsledky druhého cviku respondenta č. 6. Zdroj: autor.

Respondent číslo 7 je muž, pravák, výška 188 cm. Tento respondent měl potíže s prvním cvikem. Klouby robota mu vadily při pohybu rukou. Během druhého cvičení nebyly zjištěny žádné potíže. Oba cviky tohoto respondenta se po prvním opakování zaměřily na efektivitu pohybů (viz Graf 15, Graf 16). Metodické kroky byly splněny až ve druhém cvičení.

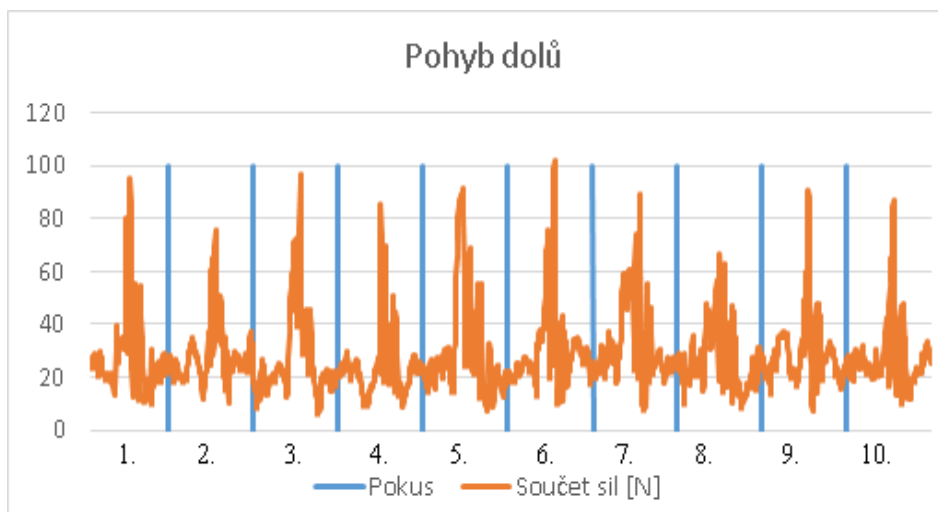


Graf 15: Výsledky prvního cviku respondenta č. 7. Zdroj: autor.

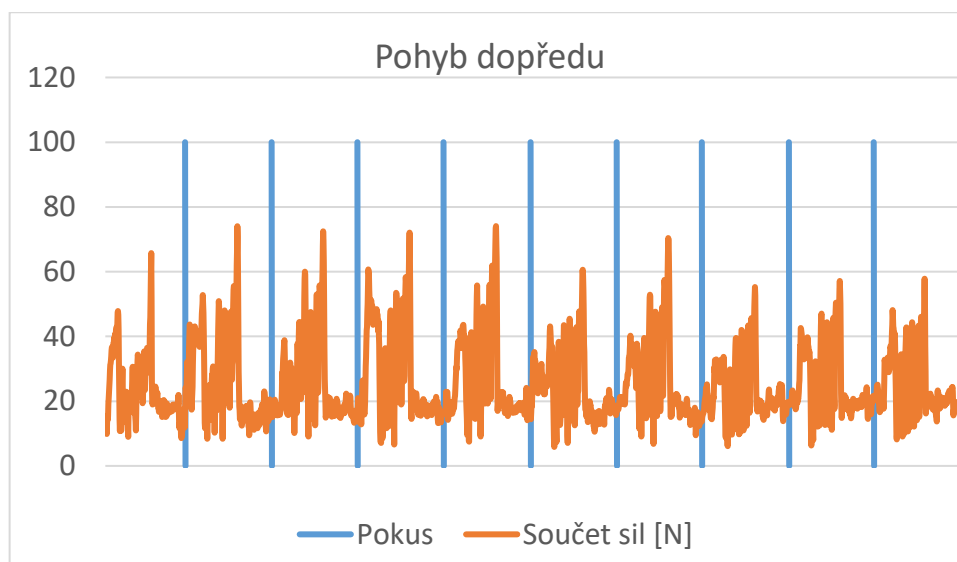


Graf 16: Výsledky druhého cviku respondenta č. 7. Zdroj: autor.

Respondent číslo 8 je muž, pravák, výška 189cm. Tento respondent se během prvního cvičení silně naklonil dopředu. Pohyby rukou byli taky omezené klouby robota. Druhé cvičení proběhlo hladce. Nepřesné rozložení sil je přítomno v prvním cvičení v prvních třech opakováních (viz Graf 17) a ve druhém cvičení v prvním opakování (viz Graf 18).

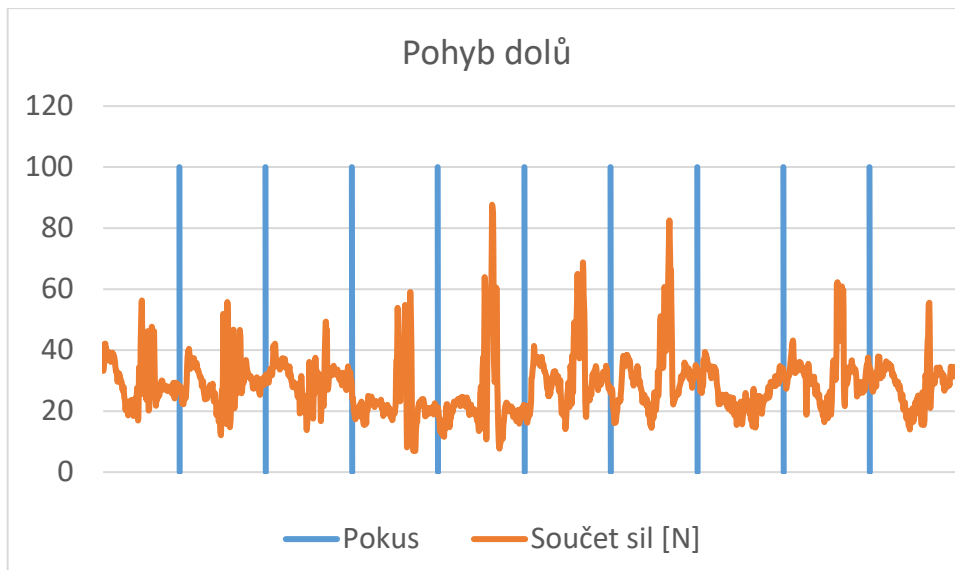


Graf 17: Výsledky prvního cviku respondenta č. 8. Zdroj: autor.

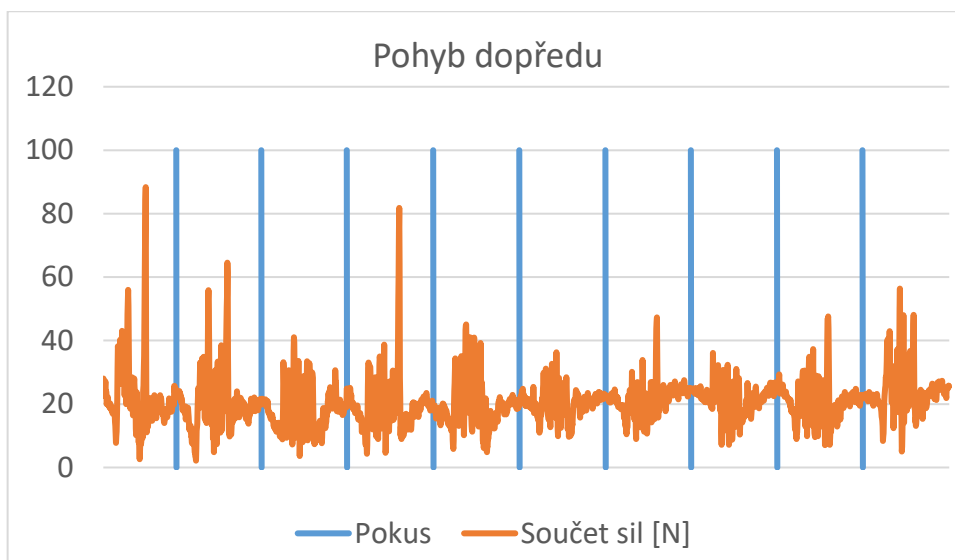


Graf 18: Výsledky druhého cviku respondenta č. 8. Zdroj: autor.

Respondent číslo 9 je žena, pravák, výška 150cm. Tento respondent měl kvůli své výšce vážné potíže při provádění cvičení. Během obou cvičení byl nepřípustně zvednut loket a také bylo nutné provést další pohyby, které nebyly stanoveny metodickými postupy. Ergonomické požadavky za těchto podmínek pro tohoto respondenta nelze splnit.

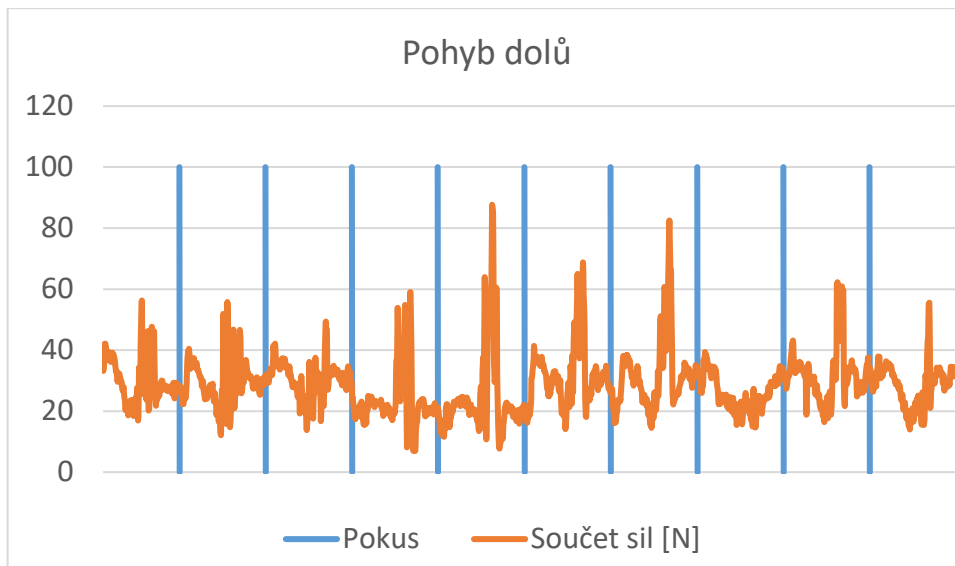


Graf 19: Výsledky prvního cviku respondenta č. 9. Zdroj: autor.

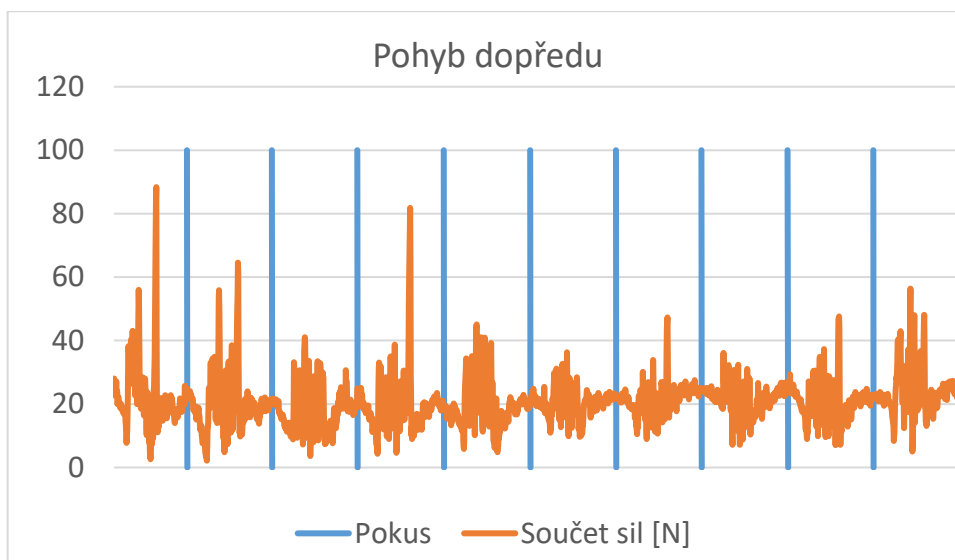


Graf 20: Výsledky druhého cviku respondenta č. 9. Zdroj: autor.

Respondent číslo 10 je žena, levák, výška 163cm. Tento respondent měl také problémy kvůli své výšce. Loket byl nadzvednut, dělaly se nepředepsané pohyby. Tento respondent je také levák, takže mu při cvičení bránila obrácená poloha kloubů robota.

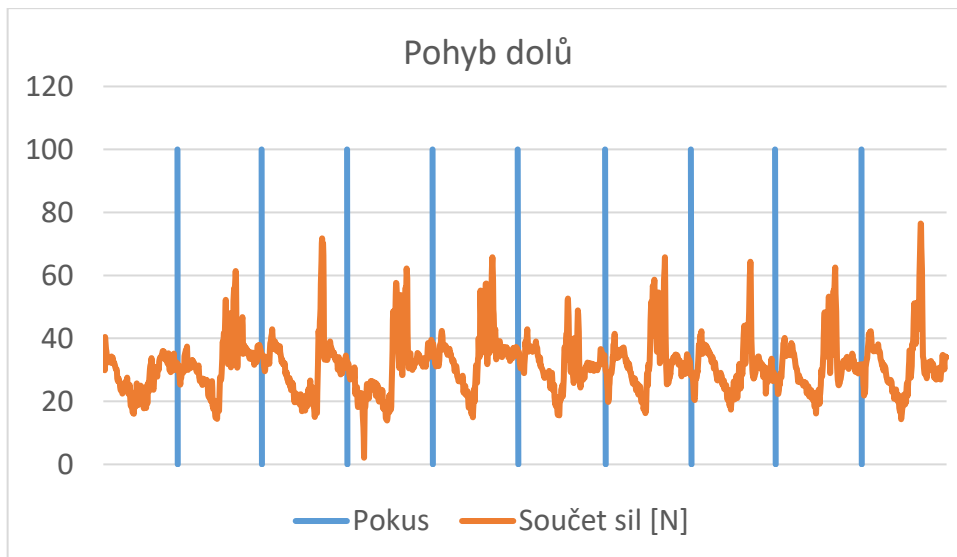


Graf 21: Výsledky prvního cviku respondenta č. 10. Zdroj: autor.

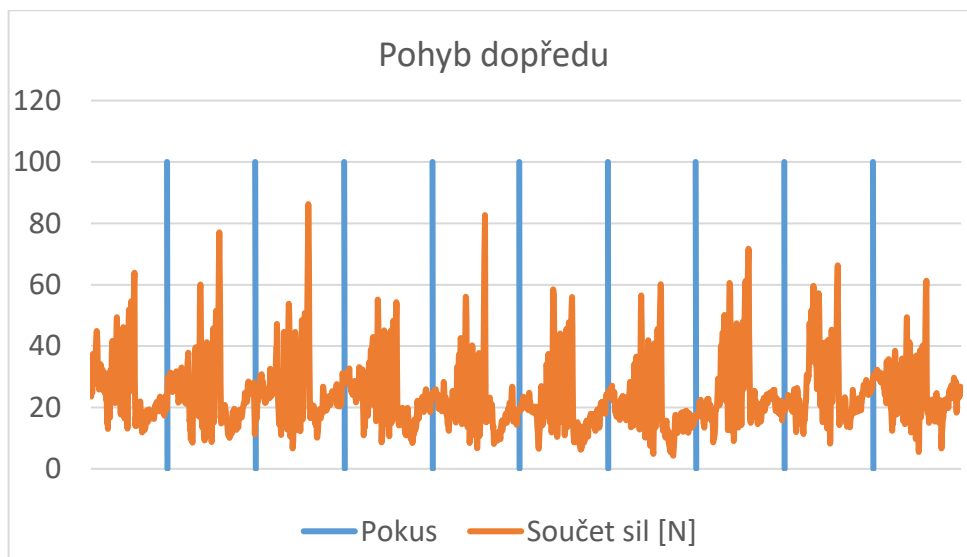


Graf 22: Výsledky druhého cviku respondenta č. 10. Zdroj: autor.

Respondent číslo 11 je muž, levák, výška 178cm. Tento respondent patří ke kategorii leváků. Kvůli tomuto faktoru nemohl provádět správné metodické postupy ani v jednom ze dvou cvičení. V prvním cvičení se podle grafu vidí, že respondent první tři opakování nepřesně rozkládal síly (viz Graf 25). Ve druhém cviku nepřesné rozložení sil dá se už pozorovat jen v prvním opakování (viz Graf 26).



Graf 23: Výsledky prvního cviku respondenta č. 11. Zdroj: autor.



Graf 24: Výsledky druhého cviku respondenta č. 11. Zdroj: autor.

3.4 Výsledky experimentu

Cílem experimentu bylo ověřit možnost využití interaktivních robotů při nácviku ergonomicky správných pohybů pomocí opakování cviků lidmi s různými antropometrickými daty.

Každý z 11 respondentů provedl 10krát opakování každého cviku. Obdrželi jsme údaje v tabulkách MS Office Excel o velikosti odporové síly těchto figurantů během

provádění cviků. Do tabulky jsme uvedli maximální naměřenou hodnotu síly během všech opakování prvního a druhého cviku.

Tabulka 2: Souhrn výsledků respondentů. Zdroj: autor.

Číslo respondentu	1 cvik Maximum	2 cvik Maximum	Levák/ Pravák	Výška	Pohlaví
1	123,348	99,705	Pravák	178	Muž
2	137,793	97,495	Pravák	168	Žena
3	106,854	83,127	Levák	173	Muž
4	101,897	56,645	Pravák	183	Muž
5	187,152	137,266	Levák	184	Muž
6	98,4816	57,647	Pravák	167	Žena
7	122,693	94,534	Pravák	188	Muž
8	101,897	74,087	pravák	189	Muž
9	88,001	88,914	Pravák	150	Žena
10	87,667	88,359	Levák	163	Žena
11	76,479	86,263	Levák	178	Muž

Jak je vidět z tabulky, nikdo z respondentů nepřekročil hranici síly 200 newtonů při práci vstoje (zapojení celého těla) při tlačení. Celkově většina výsledků prokázala v 1. až 4. opakování chaotické aplikace sil. To naznačuje, že figuranti použili první pokusy na zaměření se a přizpůsobení se pohybům robota. Dále, od 5. do 8. opakování použití síly už je lokálnější. Důvodem je asimilace účastníků na podmínky cvičení a pokus o provádění přesnějších a současně s tím více ekonomických pohybů. V opakováních 9. až 10. není tak významný rozdíl, protože pohyby figurantů na konci jednoduchých cviků získaly vyžadovanou přesnost a ergonmičnost.

Pro výsledky týkající se používání konkrétních cviků v širokém měřítku jsme vybrali některé antropometrické kategorie. Všechny zúčastněné osoby byly přiřazeny do určitých kategorií, a to: muž, žena, levák, pravák a podle výšky. Nebyly zjištěny žádné zvláštní rozdíly v pohlaví, kromě velikosti použité síly. U figurantů mužského pohlaví byly naměřeny vyšší hodnoty sil než u figurantů ženského pohlaví.

Významné rozdíly v podobě obtíží byly nalezeny v kategoriích pravák a levák. Cviky definoval člověk z kategorie praváků, proto při provádění experimentu klouby robota mířily opačným směrem než aktivní ruka. To znemožnilo levákům stát v ergonomicky správné a optimální poloze.

V kategorii výškového rozložení jsme se také setkali s problémem nastavení ergonomicky správné polohy ve stoje. Tato potíž je způsobena tím, že definovala cvičení osoba s výškou 176 cm. Bylo zjištěno, že kritickými hodnotami v této kategorii jsou osoby nad 185 cm a osoby do 165 cm.

Kvůli délce končetin se v prvním případě musí figurant ohýbat o více než 20 stupňů a ve druhém případě má figurant příliš malý dosah ruky a při provádění cviku se loket osoby zvedne příliš vysoko, což je příkladem nefyziologické pracovní polohy a nesplňuje ergonomické postupy.

4 Diskuze

V moderním světě jsou interaktivní roboti široce užíváni v různých sférách okolního života. Lze je najít ve sféře vzdělávání, sféře zábavy, v medicíně, v automobilovém průmyslu atd.

V této bakalářské práci jako hlavní cíl je diskutováno, zda je možné použít interaktivních robotů KUKA pro nácviky ergonomického postupu ve výrobě.

Po prostudování příslušné literatury a provedení modelování konkrétních operací jsme provedli výzkum a zjistili jsme, že využití možné je.

Aby však bylo možné touto metodou proškolit personál v širokém rozsahu v průmyslu, je nutné najít způsoby řešení některých problémů, které během experimentu vznikly.

Data ukázala, že namodelované cviky nejsou vhodné pro leváky, protože klouby robota narušují ergonomicky správnou polohu vstoje. Možná lze tento problém vyřešit změnou umístění robota a orientace cviků. V případě těchto cvičení je připevněn ke stolu, ale pokud se jeho základna přesune ke stropu, mohlo by to umožnit použití robota ve vzpřímenější poloze, čímž vymizí problém inverzního postavení kloubů pro leváky. Možným řešením je změna polohy robota před cvičícím figurantem. Lidský pracovní prostor bude tedy méně limitován robotem.

Rovněž věříme, že změna pomocné konstrukce by mohla zlepšit použitelnost a zachovat zadané parametry cvičení. Delší konstrukce nebo exoskelet na paži by pomohly vyhnout se problémům s pohybovými poruchami spojenými se zasahováním kloubů a ramen robota do pracovního prostoru.

Navrhované cviky také nemohou být široce používány kvůli rozmanitosti antropometrických údajů, což vede k nesplnění zadaných ergonomických úkolů. Možná by mohla pomoci další naprogramovaná funkce nastavení vztahu mezi poloměrem pohybu ve cviku a relativními antropometrickými údaji na základě výšky. Vzhledem k vlastnostem lidského těla, vyjádřeným v relativních proporcích lidského těla, je možné předpokládat potřebné délky ergonomicky důležitých segmentů těla na základě výšky člověka. To lze použít k opravě poloměru pohybu jako dodání funkce v rámci vykonání jednoho cviku.

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo prověřit možnost využití interaktivních robotů firmy KUKA pro správný nácvik ergonomických postupů ve výrobě.

Pomocí videí od společnosti Škoda-Auto a za předpokladu, že interaktivní roboty firmy KUKA se mohou využívat pro nácvik, jsme navrhli modelovou situaci pro použití a nácvik utahovačky. V průběhu výzkumu uvedli jsme podstatné teoretické informace v oblasti ergonomických vlastností pracovního prostředí, samotného nářadí a pracovních poloh. Na základě teoretických dovedností a podle ergonomických norem jsme vypracovali metodické postupy z pohledu biomechaniky a ergonomii. Výstupem této bakalářské práce je ověření na konkrétní operace pomocí figurantů.

Na základě provedeného výzkumu jsme zjistili, že využití senzitivního robota v zadaných podmínkách je možné. Během experimentů jsme ale našli některá omezení, kvůli kterým nemůže být použito jednotných cviků pro široký rozsah pracovníků ve výrobě.

Seznam použité literatury

ANON. Čtyři typy provozu kolaborativních robotů. KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ ELEKTROPRŮMYSL.CZ. *Elektroprumysl.cz* [online]. [Hajany]: 2021-08-06, [cit. 2021-08-18]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/ctyri-typy-provozu-kolaborativnich-robotu>

ANON. Ergonomie: Ergonomie pracovního místa. KOLEKTIV PRACOVNÍKU VÚBP. *Znalostní systém prevenci rizik v BOZP* [online]. [Praha]: Výzkumní Ústav Bezpečnosti Práce, v.v.i., 2016, [cit. 2021-07-21] Dostupné z: <https://zsbozp.vubp.cz/pracovni-prostredi/ergonomie/337-ergonomie-pracovniho-mista>

ANON. Kolaborativní roboty. KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ W – TECHNIKA GROUP S.R.O. *W-technika group s. r. o.* [online]. Praha: W – Technika group s. r. o., 2021 [cit. 2021-07-23]. Dostupné z: <https://sluzby.w-technika.cz/prumyslova-robotizace/>

ANON. Ruční nářadí. KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ VÚBP. *Znalostní systém prevenci rizik v BOZP* [online]. [Praha]: Výzkumní Ústav Bezpečnosti Práce, v.v.i., 2016, [cit. 2021-07-21] Dostupné z: <https://zsbozp.vubp.cz/technicka-bezpecnost/elektricka-naradi/433-ergonomie-rucniho-naradi>

ASIMOV, Isaac. *Já, robot*. Praha: Argo, 2011. ISBN 978-80-1387-491-9.

BENDOVÁ, Michaela et al. Seznam testových otázek pro přípravu ke zkoušce z odborné způsobilosti: Specialista v ergonomii. KOLEKTIV PRACOVNÍKU VÚBP. *Výzkumní Ústav Bezpečnosti Práce* [online PDF]. [Praha]: Výzkumní Ústav Bezpečnosti Práce, v.v.i., 2020, [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://vubp.cz/soubory/kurzy-a-zkousky/ergonomie/ergo-otazky-k-pisemne-casti-zkousky.pdf>

BERNACIKOVÁ, M., M. KALICHOVÁ a L. BERÁNKOVÁ. Základní složky pohybového systému. KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ MUNI. *Informační systém MU* [online]. [Brno]: Masaryková Univerzita, 2010 [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/1451/e-learning/kineziologie/elportal/pages/zakladni_slozky.html

BITTNER, Václav et al. Material, structure, chosen mechanical and comfort properties of kinesiology tape. *Journal of the Textile Institute*, 2017, **108**(12), 2132–2146. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1315797>

BRANDEJSKÝ, Petr. Ergonomie, věda o rozměrech a poměrech – teorie zlatého řezu. KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ TOP INFO S.R.O. *Estav.cz* [online]. Praha: Topinfo s.r.o. 2014-12-03 [cit. 2021-07-23]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/945.ergonomie-veda-o-rozmerech-a-pomerech-lidske-telo>

BRANDEJSKÝ, Petr. Lidské tělo – rozměry a proporce. KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ TOP INFO S.R.O. *Estav.cz* [online]. Praha: Topinfo s.r.o. 2014-11-26 [cit. 2021-07-23]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/984.ergonomie-veda-o-rozmerech-a-pomerech-teorie-zlateho-rezu>

CEJKA, Jan a Josef CERNOHORSKY. Optimization of robotic workplaces. KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ TUKE. *TUKE* [online]. IEEE, 2016, s. 146-150 [cit. 2021-07-18]. DOI: 10.1109/CarpathianCC.2016.7501083. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7501083/>

ČAPEK, L., P. HÁJEK a P. HENYŠ. *Biomechanika člověka*. Praha: Grada, 2018. ISBN 978-80-271-0367-6.

ČERNOHORSKÝ, Jozef a Marcel HORÁK. Vertical Climber 02 - Řízení pneumatických komponent. *KOPES 2014: kolokvium pedagogů elektrických strojů: sborník příspěvků z mezinárodní konference: Liberec, 21.-23. 1. 2014*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014, s. 13–16. ISBN 978-80-7494-034-7.

ČERNOHORSKÝ, Jozef a Martin BOGDANOVSKYI. Industrial robots trajectories planning for flexible manufacturing systems. *International Journal of Modeling and Optimization*. 2017, 7(5), 270–274. ISSN 2010-3697.

ČSN EN 1005-3+A1. *Bezpečnost strojních zařízení – Fyzická výkonnost člověka – Část 3: Doporučené mezní síly pro obsluhu strojních zařízení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

ČSN EN 547-3+A1. *Bezpečnost strojních zařízení – Tělesné rozměry – Část 3: Antropometrické údaje*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

ČSN EN ISO 10218-1. *Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 1: Roboty*. Praha: Český normalizační institut, 2012.

ČSN EN ISO 8996. *Ergonomie tepelného prostředí – Určování metabolismu*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

FERKL, Jan. *Programování robota KUKA iiwa pro využití rehabilitace*. Liberec, 2019. Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta zdravotnických studií. Dostupné také z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/153363/Bakalarska_prace_2019_Jan_Ferkl.pdf?sequence=1&isAllowed=y

GILBERTOVÁ, Sylvia a Dagmar PAVLŮ. Ulehčí si práci vstoje. KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ SZÚ. *SZÚ* [online]. 2. Vydání. Praha: Geoprint s.r.o., 2008. [Cit. 2021-07-21]. Dostupné také z: http://www.szu.cz/uploads/documents/czpz/edice/plne_znani/plakaty/ulehci_si_praci_vstoje.pdf

HAVELKA, Martin a Veronika STOFFOVÁ. *Robotika – stavba a programování robotů*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2017. ISBN 978-80-244-5194-7.

HLAVÁČ, Vaclav. Úvod do robotiky. HLAVÁČ VÁCLAV. *Center for Machine Perception* [online Power Point]. [Praha]: České Vysoké Učení Technické, [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <http://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/51Robotika/01UvodRobotika.pdf>

HORÁK, Marcel et al. New Generation of Mobile Platform of Service Robot for Motion Along Vertical Walls. In: HAJDUK, Mikulas a Lucia KOUKOLOVA. *Industrial and*

Service Robotics, Book Series: Applied Mechanics and Materials. 613. vyd. Zürich: Trans Tech Publications Ltd, 2014, s. 126–131. ISBN 978-3-03835-202-0.

CHUNDELA, Lubor. *Ergonomie*. 3. vyd. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2013. ISBN 978-80-01-05173-3.

KRAFT, J., A. A. ZAJCEV a A. V. ZAJCEV. *Discovering the lean production secrets on the verge of industry 4.0*. Liberec: Technical University of Liberec, 2017. ISBN 978-80-7494-392-8.

KUKA ROBOTER. 2015. *LBR iiwa: assembly instructions*. 5th edition. Augsburg.

MALÝ, Stanislav, Miroslav KRÁL a Eva HANÁKOVÁ. *ABC ergonomie*. Praha: Professional Publishing, 2010. ISBN 978-80-7431-027-0

MARTINCOVÁ, Zuzana. *Práce ve stoje: Jak snížit zdravotní rizika a zvýšit produktivitu? KOLEKTIV PRACOVNÍKU VÚPB. BOZPinfo* [online]. Lindstör Group, 2019-08-09 [cit. 2021-07-23]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/prace-ve-stoje-jak-snizit-zdravotni-rizika-zvysit-produktivitu>.

MARTINEC, Tomáš. BP [elektronická komunikace]. Message to: Daria ACULENCO. 24 března 2021 08:34 [cit. 2021-07-21]. Osobní komunikace.

MLÝNEK, J., M. PETRŮ a T. MARTINEC. Calculation of industrial robot trajectory in frame composite production. In: *Proceedings of the conference Programs and Algorithms of Numerical Mathematics*. Prague: Academy of Sciences of the Czech Republic, 2017, s. 81–88. ISBN 978-80-85823-67-7.

MONAHAN, Bridget et al. 11 principles to guide HMI design for critical drilling equipment. *Official Magazine of the International Association of Drilling Contractors*. [online]. 2016, **72**(5). Dostupné z: <https://www.drillingcontractor.org/11-principles-guide-hmi-design-critical-drilling-equipment-40154>

NEKOLNÁ, Jaroslava et al. *Česká Ergonomie 2015*. Praha: Česká ergonomická společnost, 2015. ISBN 978-80-87400-18-0. Dostupné také z: <https://www.ergonomicka.cz/app/uploads/sbornik-ces-2015.pdf>

NOVÁK, Josef. *Racionalizace a ergonomie výrobních procesů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2011. ISBN 978-80-248-2684-4

NOVOTNÁ, Karolína. *Role ergoterapeuta v Eng in Design 2+*. Plzeň, 2017. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita v Plzni, Fakulta zdravotnických studií. Dostupné také z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27000/1/ROLE%20ERGOTERAPEUTA%20V%20ENG%20IN%20DESIGN%202%2B.p>

OWEN-HILL, Alex. 2016. 3 types of robot singularities and how to avoid them. TÝM PRACOVNÍKŮ ROBOHUB. *Robohub* [online]. 2. 3. 2016 [cit. 2021-07-22]. Dostupné z: <https://robohub.org/3-types-of-robot-singularities-and-how-to-avoid-them/>

PEEREBOOM, Kees a Nicolien DE LANGEN. *Dlouhé omezené stání*. Lucemburk: Úřad pro publikace Evropské Unie, 2021. Dostupné také z: <https://osha.europa.eu/cs/publications/summary-prolonged-constrained-standing-health-effects-and-good-practice-advice/view>

PLATONOV A. K. et al. *Methods of Biomechatronics for Human Arm Simulator*. Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences, 2012. Dostupné z: https://keldysh.ru/papers/2012/prep2012_82.pdf

POKORNÁ, Václava. Základní přístup k otázkám bezpečnosti a ergonomie při projektování kolaborativních pracovišť. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online]. 2020, **13**, (2-3). ISSN 1803-3687. Dostupný z: <https://www.bozpinfo.cz/josra/zakladni-pristup-k-otazkam-bezpecnosti-ergonomie-pri-projektovani-kolaborativnichpracovist>.

SERDYUK, V.S. *Эргономические основы безопасности труда: учебное пособие*. Omsk: Omsk State Technical University, 2019. ISBN 978-5-8149-2592-3.

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled cobotů a jejich nejdůležitějších parametrů zpracované dle Technored.ru	29
Tabulka 2: Souhrn výsledků respondentů.....	51

Seznam obrázků

Obrázek 1: Mechanismus vytváření mechanického zatížení meziobratlových plotének.	18
Obrázek 2: Dosahy horních končetin při práci vsedě a vstoje	19
Obrázek 3: Zjednodušená kinematika ruky	20
Obrázek 4: Příklad základních antropometrických měření ve stoje	25
Obrázek 5: Proporce zlatého řezu	26
Obrázek 6: Zlatý řez v proporcích člověka.....	26
Obrázek 7: Robot KUKA LBR iiwa a jeho součásti	35
Obrázek 8: Osy KUKA LBR iiwa	35
Obrázek 9: Namontována pomocná konstrukce.	36
Obrázek 10: Modelová situace "Pohyb dolu".....	37
Obrázek 11: Modelová situace " Pohyb dopředu".....	37

Seznam grafů

Graf 1: Cyklus cviku „Pohyb dolů“	38
Graf 2: Cyklus cviku „Pohyb dopředu“	39
Graf 3: Výsledky prvního cviku respondentu č. 1	40
Graf 4: Výsledky druhého cviku respondentu č. 1	40
Graf 5: Výsledky prvního cviku respondentu č. 2	41
Graf 6: Výsledky druhého cviku respondentu č. 2	41
Graf 7: Výsledky prvního cviku respondentu č. 3	42
Graf 8: Výsledky druhého cviku respondentu č. 3	42
Graf 9: Výsledky prvního cviku respondentu č. 4	43
Graf 10: Výsledky druhého cviku respondentu č. 4	43
Graf 11: Výsledky prvního cviku respondentu č. 5	44
Graf 12: Výsledky druhého cviku respondentu č. 5	44
Graf 13: Výsledky prvního cviku respondentu č. 6	45
Graf 14: Výsledky druhého cviku respondentu č. 6	45
Graf 15: Výsledky prvního cviku respondentu č. 7	46
Graf 16: Výsledky druhého cviku respondentu č. 7	46
Graf 19: Výsledky prvního cviku respondentu č. 8	47
Graf 20: Výsledky druhého cviku respondentu č. 8	47
Graf 21: Výsledky prvního cviku respondentu č. 9	48
Graf 22: Výsledky druhého cviku respondentu č. 9	48
Graf 23: Výsledky prvního cviku respondentu č. 10	49
Graf 24: Výsledky druhého cviku respondentu č. 10	49
Graf 25: Výsledky prvního cviku respondentu č. 11	50
Graf 26: Výsledky druhého cviku respondentu č. 11	50

Seznam příloh

Příloha A: CD disk

- Výsledky experimentu v podobě tabulek MS Excel
- Elektronická podoba práce