



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OBRÁBĚNÍ POMOCÍ ROBOTŮ

ROBOTIC MACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Martin VORÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jan ZOUHAR, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Voráček

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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

Obrábění pomocí robotů

v anglickém jazyce:

Robotic machining

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem studenta je vypracovat rozbor problematiky obrábění pomocí průmyslových robotů. Představit společnost, robotizované výrobní zařízení a provést cenovou kalkulaci výhodnosti jeho zavedení. Dále analyzovat nepřesnosti při výrobě konkrétní součásti a navrhnout možná řešení. Z navržených řešení student vybere optimální řešení, které bude společnosti doporučeno.

Cíle diplomové práce:

- rešeršní studie obrábění pomocí průmyslových robotů
- vyhodnocení stávající technologie výroby součásti pomocí robotů
- návrh variant pro optimalizaci řešení
- ekonomické zhodnocení variant
- návrh a zpracování vhodné varianty řešení.

Seznam odborné literatury:

Pires, J. N. Industrial Robots Programming: Building Applications for the Factories of the Future. Springer, 2007. 282 s. ISBN 978-0-387-23325-3

Kolíbal, Z. Průmyslové roboty I. Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů. PRaM 1. vyd. Brno VUT Brno 1993 189 s. ISBN 80-214-0526-0

Forejt, M., Píška, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje / Vyd. 1. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9

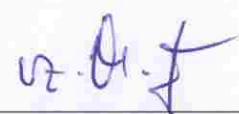
Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 12.11.2014




prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu


doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce předkládá rešeršní studii zaměřenou na současnou úroveň průmyslových robotů a jejich využití v procesu obrábění. Představuje současnou technologii využívanou ve vybrané společnosti k výrobě komponent pro automobilový průmysl. Na základě analýzy hotových výrobků představuje možné způsoby úpravy současné technologie, aby byla zajištěna požadovaná jakost produkce. Práce rovněž obsahuje finanční zhodnocení současné technologie.

Klíčová slova

průmyslové roboty, obrábění robotem, vrtání, automobilový průmysl, automatizace

ABSTRACT

Diploma thesis presents a study focused at the current level of industrial robots and their applications in the machining process. It presents current technology used in the selected company to produce components for the automotive industry. Based on analysis of the finished products presents the possible ways of alternating the current technology to ensure the required quality of production. This thesis also includes a financial assessment of current technology.

Key words

industrial robots, robotic machining, drilling, automotive industry, automatization

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VORÁČEK, M. *Obrábění pomocí robotů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 82 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Obrábění pomocí robotů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Martin Voráček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Janu Zouharovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Zároveň děkuji zaměstnancům společnosti Edscha Automotive Kamenice, zejména Václavu Matějů za trpělivost a ochotu při provádění technických zkoušek.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 REŠERŠNÍ STUDIE OBRÁBĚNÍ POMOCÍ ROBOTŮ.....	10
1.1 Historie robotiky	10
1.2 Základní pojmy v robotice	13
1.3 Kinematika robotů.....	14
1.4 Způsoby programování robotů.....	15
1.4.1 Přímé programování robotu – učení	18
1.4.2 Nepřímé offline programování	20
1.4.3 Přímé online programování	20
1.5 Pohony průmyslových robotů	21
1.5.1 Požadavky na pohon robotu.....	21
1.5.2 Struktura a uspořádání pohonu	23
1.5.3 Druhy pohonů	25
1.6 Využití průmyslových robotů při obrábění	30
1.7 Významní výrobci robotů	33
1.7.1 KUKA.....	33
1.7.2 ABB	34
1.7.3 Yaskawa.....	36
1.7.4 FANUC.....	37
2 POPIS STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE.....	38
2.1 Představení společnosti	38
2.2 Vyráběný díl.....	39
2.3 Postup výroby.....	40
2.4 Výrobní linka	42
2.5 Vybavení pracoviště vrtání	43
3 POPIS VÝSLEDKŮ PŘI POUŽITÍ STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE.....	48
3.1 Analýza přesnosti vyvrtaných otvorů.....	48
3.2 Zkoušky přesnosti najetí robotu na pozici	50
3.3 Porovnání vzorků s CAD modely	55
4 NÁVRH NOVÉ TECHNOLOGIE	57

4.1	Výpočet korekcí programu.....	57
4.1.1	Korekce pro levý díl	57
4.1.2	Korekce pro pravý díl	59
4.2	Výsledek měření po aplikaci korekcí	60
4.3	Systém měření na 3D měřicím centru	62
4.4	Návrh nového měřicího postupu	63
4.4.1	Výsledek měření	64
4.5	Návrh nové vrtací hlavy	65
4.5.1	Výpočet potřebného výkonu vřetene	65
4.5.2	Volba vřetene a translačního pohonu.....	66
4.5.3	Model vrtací hlavy	67
4.5.4	Hmotnostní kalkulace návrhu	68
4.6	Rozšíření tolerančních mezí	69
5	EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ	71
5.1	Cenová kalkulace navržené vrtací hlavy	71
5.2	Zhodnocení výhodnosti technologie	72
	ZÁVĚR	75
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	79
	SEZNAM PŘÍLOH.....	82

ÚVOD

Trendem moderní doby je vzrůstající spotřeba, která vyvolává neustálý tlak na zvyšování produktivity práce. Tento tlak, spolu s požadavky na minimální výrobní náklady, vede průmyslové podniky k automatizaci svých pracovišť a výrobních linek. Ruku v ruce s pokračujícím vývojem v oblasti robotů přistupuje mnoho společností k tomu, že k automatizaci výroby využije průmyslové roboty. Nejinak je tomu v případě automobilového průmyslu. Odběratelé jednotlivých komponent přísně dbají na dodržování předepsané jakosti produkce, aby udrželi vysoký standard bezpečnosti osobních i nákladních automobilů.

V případě společnosti EDSCHA Automotive Kamenice, s.r.o. je součástí výrobní linky, která produkuje komponenty pro společnost AUDI, robotizované pracoviště, kde je realizována operace vrtání. Vyráběn je zde díl, který je součástí sestavy závěsu víka zavazadlového prostoru. Vrtání je prováděno do tenkostěnných obdélníkových profilů, které jsou v jedné z předcházejících operací ohýbány. V případě tohoto pracoviště je vrtání realizováno pomocí dvojice průmyslových robotů vybavených vrtacími hlavami. Bohužel kvalita produkce tohoto pracoviště nedosahuje požadované úrovně požadované odběratelem.

Cílem této diplomové práce je analýza jakosti hotových produktů a následný návrh vhodné úpravy používané technologie, aby bylo dosahováno produkce požadované jakosti. V práci bude rovněž uvedeno finanční zhodnocení současně využívané technologie.

1 REŠERŠNÍ STUDIE OBRÁBĚNÍ POMOCÍ ROBOTŮ

1.1 Historie robotiky

Samotné slovo robot, které je odvozeno od českého slova robota, bylo poprvé použito roku 1920 ve vědeckofantastickém dramatu Karla Čapka *Rossumovi universální roboti*. Stalo se tak na radu Karlova bratra Josefa. Sám Karel Čapek chtěl své stroje nazvat laboři [1].

Představa neúnavných strojů zastávající lidskou práci však sahá hluboko do minulosti. Prvopočátky robotiky lze nalézt v antickém Řecku, odkud pocházejí zmínky o konstrukci strojů s pohyblivými částmi. Takovým strojem byl například výtvar řeckého matematika a filozofa Archytáse z Tarentu nazvaný holub z roku 350 před Kristem. Jednalo se o létající stroj s pohonem na principu stlačeného vzduchu a páry, který byl údajně schopen doletět do vzdálenosti 200 metrů. Dalším převratným strojem s pohyblivými částmi jsou vodní hodiny řeckého matematika, fyzika a vynálezce Ktesibia. Skutečný převrat ovšem přichází v prvním století našeho letopočtu s tvorbou matematika a vynálezce Herona



Obr. 1 Heronova baňka [2]

Alexandrijského, který za svého působení v Alexandrijské knihovně čerpal ze spisů Archiméda ze Syrakus. Ve svých spisech se, mimo jiné, zabývá skládáním pohybů pomocí rovnoběžníku rychlostí, výpočty polohy těžiště, rozložením zatížení v opěrných bodech konstrukce, účinností ozubených soukolí a jednoduchými stroji. Propojením jednoduchých strojů přechází ke studiu pokročilejších zařízení, jako jsou lisy a jeřáby. Ve spisu *Automata*, který je považován za vůbec první dílo o robotech, popisuje různá automatizovaná zařízení. Nejznámějším z nich jsou samočinně otvíratelné chrámové dveře. Dále jsou to pohyblivé loutky, automat podávající limonádu po vhození mince nebo olejová lampa s automatickým doplňováním oleje. Jeho dalším významným vynálezem je Heronova baňka zobrazená na obr. 1, která je prvním známým příkladem reaktivního pohonu. Heron samotný však své vynálezy neaplikoval k ulehčení lidské práce, ale sloužily mu k pobavení diváků. Po pádu helénské kultury a nástupu křesťanství byly všechny tyto poznatky zapomenuty [1][2][3].

Poznatky antických filozofů byly zapomenuty po více než jedno tisíciletí, než začaly být na přelomu dvanáctého a třináctého století našeho letopočtu znovuobjevovány arabskými učiteli. Nejvýznamnějším z nich je kurdský vědec a vynálezce Al-Džazárí, který ve svém spisu *Kniha znalostí důmyslných mechanických zařízení* z roku 1206 popisuje stovku mechanických zařízení a zanechává rovněž instrukce, jak je sestavit. Mezi tyto zařízení patří například vačková hřídel použitá ve vodních hodinách a strojích určených na zvedání vody. Vynálezce v těchto dobách nejvíce sužuje problém generování a účinného přenosu pohybu. Tyto problémy vyřešil v patnáctém století italský vynálezce Leonardo da Vinci tím, že navrhl nové koncepce generování a přenosu pohybu. Současně však poukázal na nový



Obr. 2 Písař [4]

problém, a to neznalost dlouhodobého zdroje energie. Z tohoto důvodu nejspíše nedokončil svůj návrh robotického rytíře, který byl vůbec prvním návrhem humanoidního robota. Zachovaly se rovněž návrhy bojových a létajících strojů, ponorky, padáku nebo vrtačky. Dalšími průkopníky v konstrukci humanoidních robotů byli Pierre Droz se synem Henrym se svou konstrukcí písaře, což byl automat věrně napodobující chlapce, schopný napsat několik vět. Mechanismus písaře je vidět na obr. 2. Jejich dalšími humanoidními roboty byli kreslíř a hudebnice, rovněž věrně napodobující lidské pohyby. Nepopíratelný přínos pro robotiku měl na počátku dvacátého století americký vynálezce srbského původu Nikola Tesla, který vyšel z objevu rádiových vln německého fyzika Henricha Hertze a zkonstruoval první dálkové ovládání [1][3][4].

Na počátku dvacátého století byly roboty v drtivé většině užívány jako atrakce pro návštěvníky na výstavách. S postupem času se ovšem použití robotů rozšiřuje do průmyslové výroby ve formě teleoperátorů manipulujících s radioaktivním a jinak nebezpečným materiálem. S rozvojem počítačů v padesátých letech se číslicové řízení aplikuje i v robotizaci. Stroje získávají určitou úroveň umělé inteligence a jsou schopny zvládnout předem naprogramované úkoly tak, že k jejich splnění využívají postup podle své volby. V průmyslové výrobě jsou v dnešní době mnohé operace plně robotizované. Jedná se zejména o obtížné manipulační operace a operace ohrožující zdraví pracovníků, jako je svařování nebo nanášení barev. Robotizovány jsou rovněž některé chirurgické zákroky z důvodu co nejmenšího invazivního zatížení organismu. Další větví vývoje robotů je tvorba robotických obleků, takzvaných exoskeletů, což jsou zařízení násobně zvyšující fyzickou sílu svého nositele. Tím mu umožňují zvedat a přenášet těžká břemena bez příznaků únavy. Exoskelety, původně vyvíjené pro vojenské účely, v dnešní době nachází využití v lékařství.

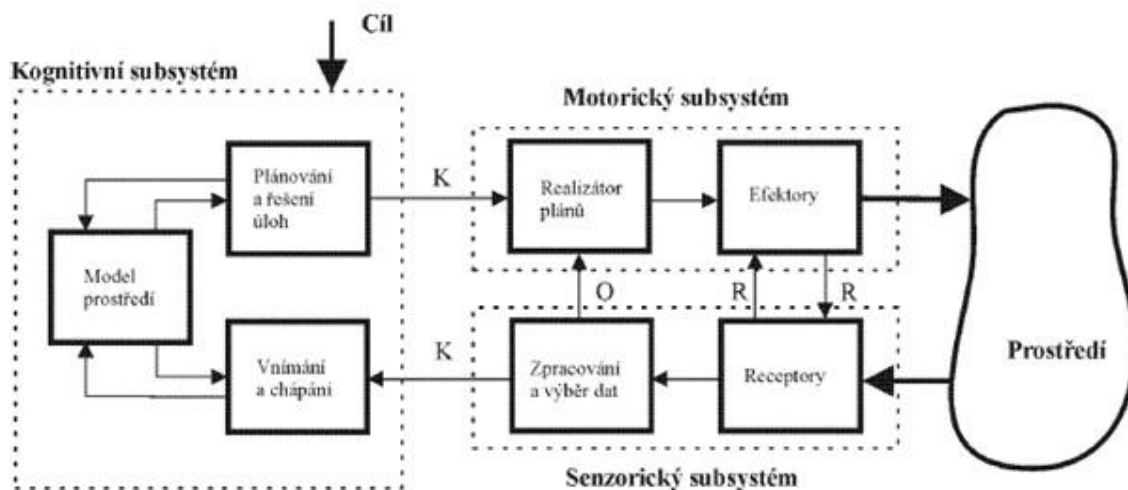


Obr. 3 ASIMO [5]

Ulehčují lékařskému personálu manipulaci s nepohyblivými pacienty a umožňují pohyb pacientům trpícím ochrnutím končetin. Dalším odvětvím vývoje robotů je konstrukce dálkově ovládaných strojů využívaných při záchranných operacích a požárech. Světovou velmocí ve vývoji, stavbě a nasazení robotů je Japonsko, jak v poslední době ukazuje společnost Honda se svým humanoidním robotem ASIMO, zobrazeném na obr 3. Zdá se, že cílem vývojářů je tvorba robota schopného zastoupit člověka v téměř jakékoli činnosti. Hlavními překážkami jsou v současné době vybavení robota adekvátním systémem pohybu, stability, orientace v prostoru, mimiky a propracované umělé inteligence se schopností abstraktního uvažování. Zvládnutím těchto výzev se otevře cesta pro vývoj robotů budoucnosti schopných skutečně plně zastoupit člověka [1][3][5].

1.2 Základní pojmy v robotice

Systém všech typů robotů, ať už průmyslových manipulátorů nebo robotů napodobujících chování člověka, je tvořen třemi subsystémy, jak je znázorněno na obr. 4. Chování robotu ovlivňuje člověk prostřednictvím cíle, který robotu ukládá. Tento cíl robot vykonává ve vnějším prostředí, které aktivně ovlivňuje a sám je tímto prostředím



Obr. 4 Blokové schéma robotu [3]

ovlivňován. Za aktivní fyzické ovlivňování okolního prostředí je zodpovědný motorický subsystém, který je tvořen akčními členy, takzvanými efekty, a realizátorem plánů, což je počítač zodpovědný za správné provedení motorických úkonů. Těmito efekty jsou například pohony, polohovací ústrojí, úchopná ústrojí a podobně. Reakci na prostředí, ve kterém robot působí, obstarává senzorický subsystém. Ten je tvořen receptory, což jsou čidla získávající informace o okolním prostoru, jako je kupříkladu poloha a tvar překážky v cestě. Data získaná receptory jsou vyhodnocována v zařízení na zpracování a výběr dat, kde se zjištěná data utřídí a rozdělí na potřebná a nepotřebná k vykonávání daného úkolu. Těmito subsystémy je nadřazen kognitivní subsystém, který do hloubky analyzuje informace přicházející ze senzorického subsystému. Kognitivní subsystém tedy zajišťuje inteligentní řízení celého systému robotu. Na základě známého cíle a předem naprogramovaného modelu prostředí naplánuje a vyřeší jednotlivé úlohy vedoucí k cíli. Předáním informace o způsobu řešení úloh do motorického systému se uzavírá hlavní zpětnovazební okruh K představující inteligentní chování robotu. Blokové schéma robotu obsahuje rovněž zpětnovazební okruh R mezi receptory a efekty, který představuje nejnižší úroveň řízení. Toto řízení obstarává reflexivní reakce při náhlé změně některé kritické veličiny. Příkladem takového chování může být okamžité zastavení pohybu robotu při nárazu do překážky. Zpětnovazební smyčka O, která se nazývá operační, zajišťuje vykonávání jednotlivých úkonů s ohledem na stav vzhledem k okolnímu prostředí. Současný vývoj v oblasti robotiky se zaměřuje zejména na oblast kognitivního řízení, které je i v případě moderních robotů velmi skromné. Průmyslové roboty se od ostatních liší v tom smyslu, že ve svém systému kognitivní řízení vůbec zařazeno nemají a jsou tvořeny pouze řídicím systémem, který tvoří realizátor plánů a zařízení na zpracování a výběr dat, a manipulátorem tvořeným receptory a efekty. V oblasti průmyslových robotů tudíž nelze hovořit o umělé inteligenci. Těmto robotům zadává cíl a jednotlivé etapy jeho plnění člověk ve formě programu [3][6].

1.3 Kinematika robotů

Moderní průmyslové robotické manipulátory jsou tvořeny spojeními jednotlivých pevných částí, nazývaných ramena, pomocí kloubů umožňujících ramenům konat volný nebo vázaný pohyb. Těmto spojení se říká kinematické dvojice. Manipulátor je k zemi pevně ukotven nepohyblivou částí nazývanou základna. Konec robotického manipulátoru je tvořen buď chapadlem, které slouží u uchopování předmětů, nebo je použit k instalaci dalších nástrojových jednotek, jako je například vrtací, svařovací nebo stříkací hlava. Celý robotický mechanismus je tedy tvořen kinematickým řetězcem tvořeným jednotlivými kinematickými dvojicemi a je jednoznačně určen počtem stupňů volnosti. Počet stupňů volnosti, v literatuře označovaný DOF, lze považovat za počet nezávislých pohybů systému. Počet stupňů volnosti systému je závislý na počtu stupňů volnosti okolního prostředí, počtu ramen kinematického řetězce a na počtu a druhu kloubních spojení. Počet stupňů volnosti systému lze vypočítat ze vztahů [1][7]:

$$F = \lambda \cdot (n - 1) - \sum_{i=1}^j c_i \quad (1.1)$$

nebo

$$F = \lambda \cdot (n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i, \quad (1.2)$$

kde λ – počet stupňů volnosti okolního systému,

n – počet ramen mechanismu,

j – počet kloubů mechanismu,

c_i – počet stupňů volnosti odebraných kloubem i ,

f_i – počet stupňů volnosti kloubu i .

Základní přehled kinematických dvojic je, spolu s příslušnými grafickými symboly, uveden na obr. 5. Na obrázku je rovněž uveden souhrn počtu stupňů volnosti, které daná kinematické dvojice má a kolik jich odebírá [7].

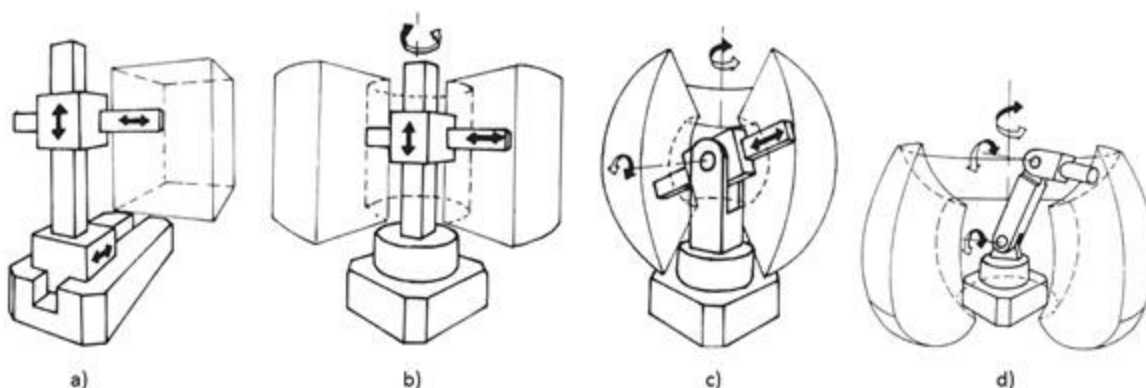
Symbol					
Název	sférická	rotační	posuvná	válcová	plochá
má/odnímá DOF	3 / 3	1 / 5	1 / 5	2 / 4	3 / 3

Obr. 5 Základní kinematické dvojice [7]

Průmyslové manipulátory jsou nejčastěji tvořeny tříkloubovým ramenem s chapadlem opatřeným dalšími třemi klouby. Robotický manipulátor tedy dosahuje šesti stupňů volnosti a je schopen obsáhnout veškeré možné polohy a rotace uchopovaného tělesa v okolním prostoru. Počet šesti kloubů je nutnou podmínkou k dosažení šesti stupňů volnosti kinematického řetězce. Avšak splnění této podmínky dosažení volné manipulace v prostoru nezaručuje. Dále je nutno těchto šest kloubů vhodně geometricky uspořádat. Menší počet kloubů by měl za následek snížení manipulačních schopností robotu, tudíž je při výběru robotického manipulátoru nutno brát na počet kloubů zvýšený ohled [1][7].

Všechny části robotického manipulátoru vymezují při svém pohybu v okolním prostoru takzvaný operační prostor. Podprostorem operačního prostoru je pracovní prostor, nebo pracovní obálka, což je množina všech bodů dosažitelných referenčním bodem chapadla

manipulátoru. Podle tvaru pracovního prostoru jsou jednotlivá kinematická uspořádání robotických manipulátorů pojmenována. Nejčastější kinematická uspořádání jsou zobrazena na obr. 6. První zobrazené uspořádání se nazývá kartézské a je typické pro portálové jeřáby. Toto uspořádání je tvořeno třemi posuvnými vazbami. Druhý kinematický řetězec je pojmenován cylindrický a je představen válcovým tvarem pracovního prostoru s válcovou dutinou uprostřed. Cylindrický pracovní prostor je tvořen dvěma posuvnými a jednou rotační vazbou a lze ho nalézt například u stavebních jeřábů. Třetí zobrazená kinematická struktura se nazývá sférická. Jak je patrné z jejího pojmenování, pracovní obálka má kulový tvar. Toto uspořádání tvoří dvě rotační a jedna translační vazba. Cylindrický pracovní prostor mají



Obr. 6 Kinematické struktury manipulátorů [3]

některé typy rypadel. Poslední zobrazené kinematické uspořádání je tvořeno třemi rotačními vazbami a nazývá se angulární. Toto uspořádání se často vyskytuje u různých druhů robotických ramen. Druh použitého kinematického uspořádání má výrazný vliv na spolehlivost robotického manipulátoru. Stejně tak je spolehlivost ovlivňována počtem ramen a množstvím kloubových spojů. Obecně platí, že se vzrůstajícím počtem kinematických dvojic v řetězci spolehlivost robotu klesá. Kinematické struktury mají rovněž vliv na manipulační rychlost robotu [1][3].

1.4 Způsoby programování robotů

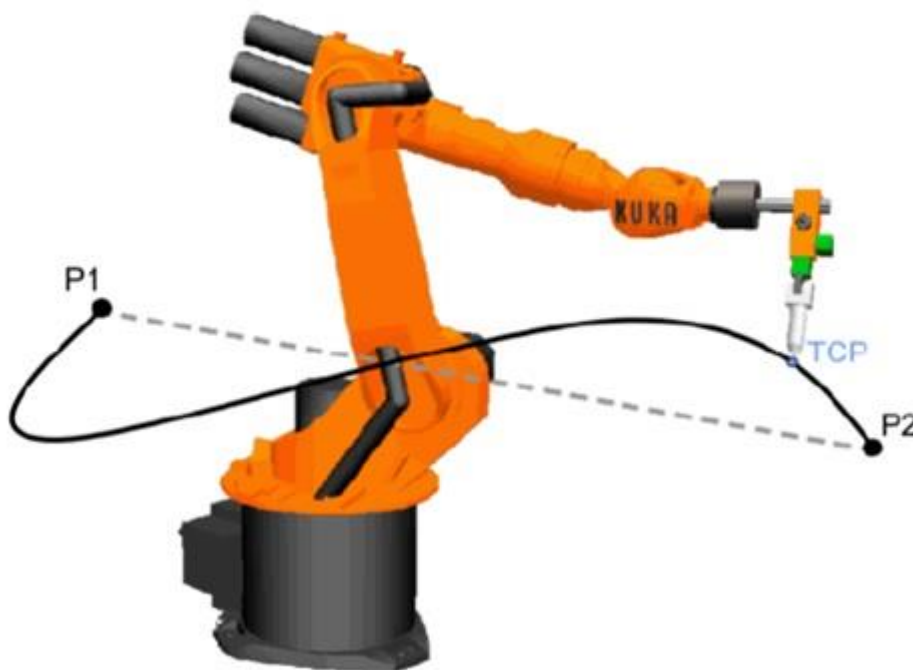
Způsob programování, nebo způsob řízení dráhy robotu, je velmi důležitou informací uváděnou o každém robotickém manipulátoru. Při programování robotických manipulátorů je potřeba určit vysunutí, či pootočení v jednotlivých kloubech kinematického řetězce tak, aby referenční bod chapadla dosáhl požadovaných souřadnic v pracovním prostoru manipulátoru. Vezmeme-li v úvahu šestikloubový manipulátor, který je v praxi nejhojněji využívaný, tak vektor kloubových souřadnic lze označit $q = [q_1; q_2; q_3; q_4; q_5; q_6]^T$. Označíme-li vektor požadované polohy referenčního bodu chapadla $P = [x; y; z; \alpha; \beta; \gamma]^T$, potom bude projekce z kloubového systému do kartézského souřadnicového prostoru popsána funkcí $P = f(q)$ [3][8].

Přímá úloha kinematiky je prvním způsobem, jak danou funkci řešit. V případě šestikloubového robotického manipulátoru v prostoru kartézského souřadnicového systému je výše popsaná funkce definována šesti rovnicemi. Nalezení těchto rovnic je při znalostech geometrie možné a tento postup je nazýván přímá úloha kinematiky. Výhodou této úlohy je to, že pro je danou polohu referenčního bodu chapadla stanovena soustava rovnic popisující vhodné rozložení kinematického řetězce [3][8].

Inverzní úlohou kinematiky je nazývána metoda, při které jsou kloubové souřadnice vypočteny zpětně ze znalosti souřadnic referenčního bodu chapadla. Tento způsob je přirozenější, protože je výrazně jednodušší představit si požadovanou dráhu chapadla přímo, než přes vektor kloubových souřadnic. Nevýhoda ovšem spočívá v tom, že pro jednu požadovanou polohu lze získat různé vektory kloubových souřadnic. Inverzní úloha kinematiky tedy může mít v některých případech větší množství řešení [3][8]

Při samotném uvažování o pohybu chapadla v pracovním prostoru je zásadní položit si otázku, zda je důležité dbát na přesnou dráhu a natočení chapadla mezi jednotlivými uzlovými body. Provádění posuvu a natočení chapadla je možné realizovat v osách základního souřadnicového systému nebo v obecné ose prostoru. Při programování pohybu chapadla je užíváno dvou metod. Jsou to metody Point-to-Point a metoda Continuous Path [6][8].

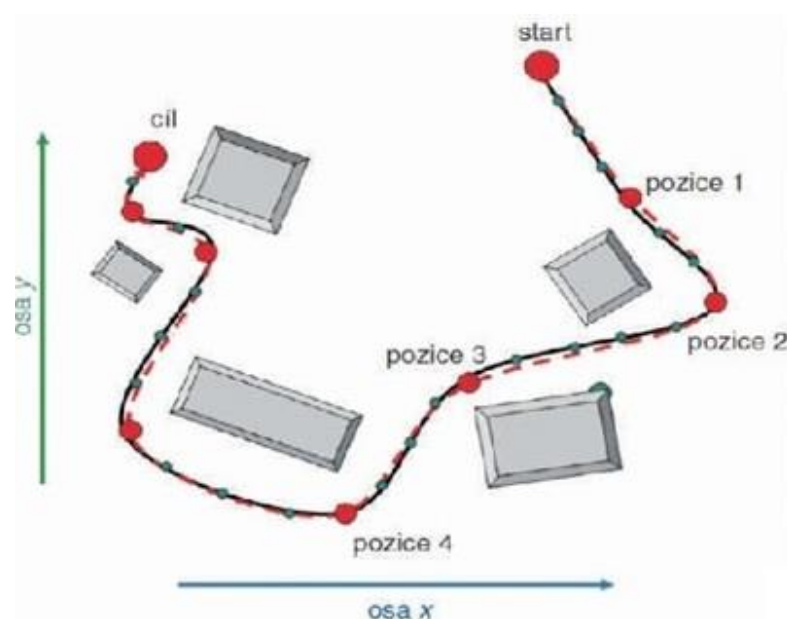
- **Point-to-Point** – v případě této metody, v literatuře označované zkratkou PTP, nezáleží při pohybu efektoru mezi jednotlivými body pracovního prostoru na jeho dráze. Záleží ovšem na orientaci efektoru v koncovém bodě dráhy. Při point-to-point metodě je požadované konečné polohy dosaženo nejkratším možným způsobem. Příklad se znázorněním dráhy referenčního bodu efektoru je na obr. 7. Při použití



Obr. 7 Point-to-Point řízení [9]

této metody není rychlost přesunu chapadla mezi jednotlivými body konstantní, ale narůstá až do své maximální hodnoty, kterou poté drží až do počátku zpomalování v blízkosti konečného bodu. U celého kinematického řetězce se může měnit natočení či posun jednotlivých vazeb současně. Z toho plynoucí rychlost přesunu je největší výhodou metody Point-to-Point. Nevýhoda metody Point-to-Point spočívá v tom, že při přesunu hrozí z důvodu neočekávaných pohybů ramene kolize robotického manipulátoru s okolními překážkami. Proto je tato metoda použitelná pouze tehdy, když žádné takovéto kolize nehrozí [6][8].

- **Continuous Path** – tato metoda, která je v literatuře označována jako CP, se od metody Point-to-Point v zásadě odlišuje tím, že na trajektorii pohybu referenčního bodu efektoru bere v úvahu hodnoty polohy, prostorové orientace, rychlosti a zrychlení, a to nejlépe pro každý bod trajektorie. Vzhledem k nekonečnému množství bodů na trajektorii je však toto nereálné, proto je výpočet daných parametrů proveden pouze v některých bodech, které se nazývají interpolační body. Počet interpolačních bodů je závislý na vzdálenosti počátečního a konečného bodu trajektorie, rychlosti přesunu, hodnotě zrychlení a na taktu regulačních smyček servopohonů robotického manipulátoru. Samotný pohyb referenčního bodu efektoru je realizován v časové posloupnosti v každém kloubovém spojení zvlášť. Příklad rozložení interpolačních bodů trajektorie v případě přesunu v rovině je znázorněn na obr. 8. Velkou výhodou metody Continuous Path oproti metodě Point-to Point je to, že v jednotlivých bodech trajektorie přesunu referenčního bodu efektoru je známá hodnota polohy a natočení každého bodu robotického manipulátoru. Tím pádem nehrozí kolize ramene manipulátoru s možnými překážkami mezi počátečním a koncovým bodem dráhy pohybu. Nevýhoda této metody spočívá v nutnosti plánování celé trasy pohybu a výpočtu jednotlivých parametrů v interpolačních bodech. Zásadní nevýhoda metody Continuous Path spočívá v nízké rychlosti přesunu referenčního bodu efektoru. Ta je způsobena tím, že se požadovaných hodnot natočení kloubových spojení dosahuje v jednotlivých kloubech zvlášť [6][8].

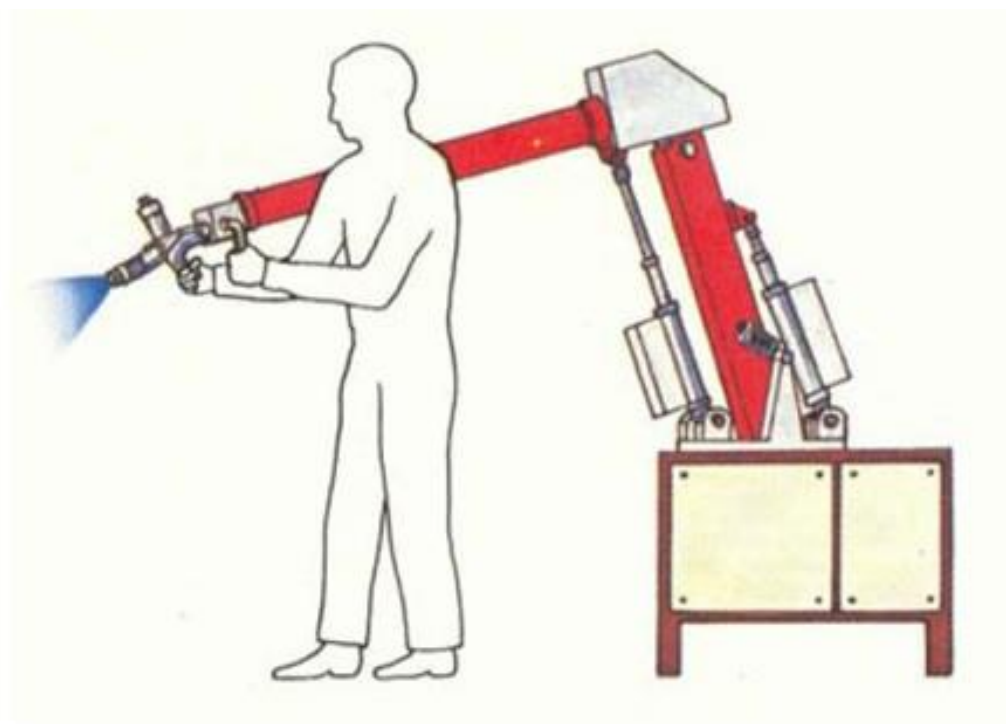


Obr. 8 Interpolace trajektorie [10]

V praxi se nejčastěji setkáváme s tím, že je dráha pohybu robotického manipulátoru programována a do robotu ukládána v kloubových souřadnicích. Do paměti robotu je tedy uložena informace o požadovaných hodnotách kloubových souřadnic spolu s časem, ve kterém se má dané hodnoty dosáhnout. Řídící program robotu se poté stará o to, aby aktuální hodnota kloubových souřadnic robotu byla shodná s hodnotou požadovanou v daném čase. Plánování a programování dráhy robotu je v praxi realizováno třemi způsoby [6].

1.4.1 Přímé programování robotu – učení

V prvním případě programování robotu touto metodou, které se také někdy říká přímé učení, je robotické rameno vedeno programátorem požadovanou rychlostí po ideální požadované dráze. Programátorem je v tomto případě zkušený pracovník obsluhující danou linku. Příklad přímého programování robotického ramene je znázorněn na obr. 9. Pohyb realizovaný programátorem je uložen do řídicího systému robotu, který jej poté při samotné práci přesně opakuje. Z principu této metody programování vyplývá, že pracuje na principu Continuous Path. Samotná jednoduchost programování touto metodou je zároveň její nevýhodou, jelikož řídicí systém robotu opakuje pohyb absolutně přesně podle programátora. Tudíž jsou při následném nasazení ve výrobě opakovány i možné chyby při pohybu, jako například nedodržení ideální vzdálenosti referenčního bodu efektoru a výrobku. Proto je při programování robotu zapotřebí, aby byl programátorem zkušený pracovník. Této metody se využívá zejména při programování robotů nanášejících nástřiky barev [3][6].



Obr. 9 Přímé programování robotu – CP [3]

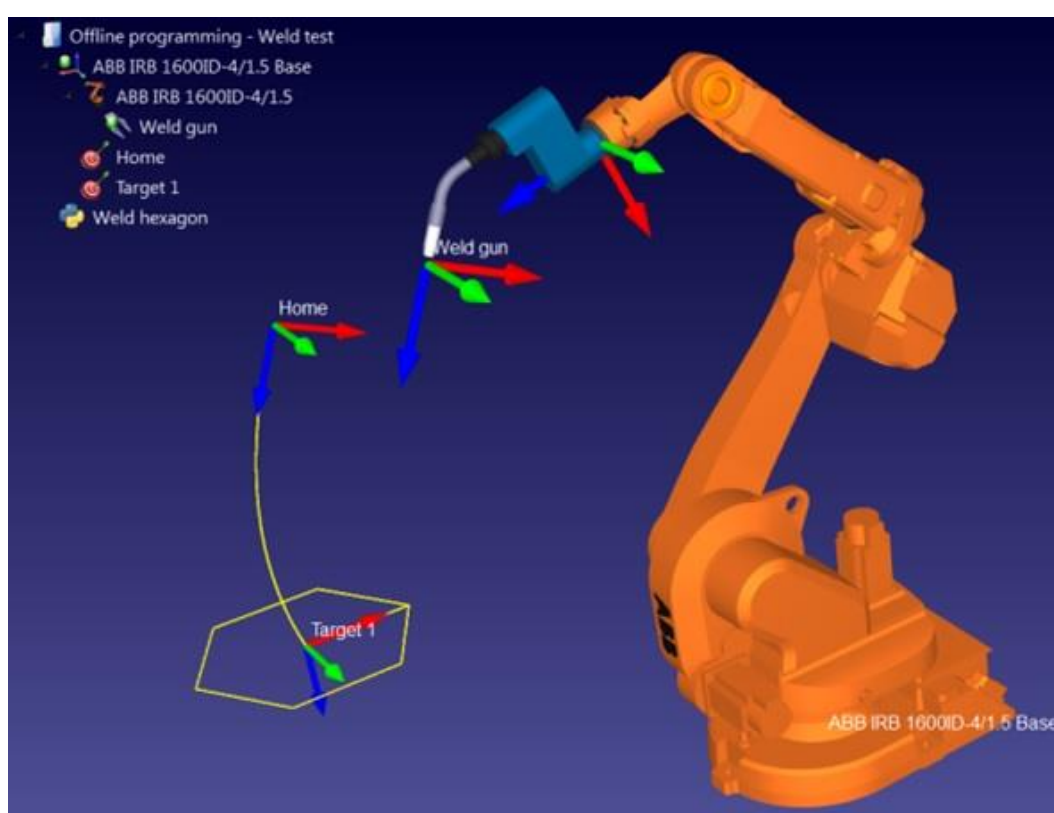
Druhý způsob programování robotu metodou přímého učení spočívá v tom, že je robotické rameno naváděno programátorem do požadovaných bodů daných technologií prováděné operace. Toto navádění je možné realizovat stejně jako v předchozím případě rukou, nebo je možné k přesnému navedení použít přenosný ovládací panel, jak je pro případ programování svářečského robotu znázorněno na obr. 10. Po navedení do požadované pozice stiskne programátor tlačítko pro její zapamatování a navádí robotické rameno do další požadované polohy. Z tohoto popisu je jasné patrné, že tato metoda funguje na principu Point-to-Point. Po uložení všech požadovaných pozic do paměti robotu se k těmto pozicím přidá časový údaj, kdy jich má být dosaženo. Tímto způsobem je možno korigovat rychlost pohybu robotu. Výhoda tohoto způsobu spočívá v možnosti velmi přesného navedení do relativně malého množství jednotlivých bodů. Nevýhoda spočívá v tom, že programátorovi nemusí být dostatečně dobře známa poloha jednotlivých bodů v závislosti na technologii, kterou bude robotické rameno provádět [3][6].



Obr. 10 Přímé programování robotu – PTP [11]

1.4.2 Nepřímé offline programování

Při použití tohoto způsobu programování robotu není robotické rameno v přímém kontaktu s programátorem. Programátor modeluje v simulačním programu křivky trajektorie pohybu referenčního bodu efektoru podle dané technologie, kterou bude robot provádět. Nepřímé offline programování tedy funguje na principu Continuous Path. Programátor získává potřebné vzdálenosti uzlových bodů křivek z výkresů. Údaje o chronologii a rychlosti jednotlivých pohybů robotického ramene získá programátor z technologického postupu. Dané údaje zanesou do programu jako časový parametr křivek. Po dokončení programu má programátor možnost shlédnout simulaci celkového postupu. Příklad offline programování robotického ramene osazeného svařovací hubicí je na obr. 11 [3][6][12].



Obr. 11 Nepřímé offline programování [12]

1.4.3 Přímé online programování

Tato metoda, pracující rovněž na principu Continuous Path, se od nepřímého offline programování liší tím, že při počítačovém modelování křivek trajektorie pohybu referenčního bodu efektoru je k počítači připojen robot. Počítač ihned řeší inverzní úlohu kinematiky a robot v reálném čase provádí v počítači namodelované pohyby. Metody přímého online programování se využívá zejména v těch případech, kdy je pohyb robotu ovlivňován informacemi přicházejícími do řídicího systému robotu ze senzorického systému. Takový robot může mít na starost například manipulaci s objekty v dynamicky se měnícím prostředí, kdy je objekt určený k manipulaci zachycován v různých polohách a orientacích [3][6].

1.5 Pohony průmyslových robotů

Účelem pohonu průmyslového robotu je přeměna vstupní energie na pohyb, která je realizována v motoru. Vstupní energie přicházející do motoru prochází ovládacím blokem, kde jsou podle potřeby upravovány její parametry. Parametry mechanického pohybu, vzniklého v motoru, je možné dále upravovat v transformačním bloku, který na motor přímo navazuje. Propojení výstupu motoru a pohybové jednotky robotu zajišťují převody. Nejčastěji používanými převody jsou mechanické. Dále se využívají elektrické a magnetické typy převodů. V případě mechanického převodu je transformace pohybu nejčastěji



Obr. 12 CYCLO převodovka [14]

prováděna systémem ozubených kol, hřebenu a vaček uspořádaným do převodovky. Často používaným druhem mechanické převodovky je typ CYCLO, zobrazený na obr. 12. Magnetické převody jsou realizovány pomocí disků s permanentními magnety tvořícími magnetickou spojku. Elektrický převod je tvořen spojením speciálních točivých elektrických strojů sloužících k souhlasnému dálkovému přenosu rotačního pohybu prostřednictvím elektrického vedení. Tyto stroje, které se nazývají selsyny, mají vzájemně propojeno vinutí svých statorů a rotorů. Převody magnetické a elektrické se využívají zejména v situacích, kdy je nutné dodržet hermetické oddělení motorové jednotky od pracovního prostoru. Taková konstrukce je nutná v prostředích s extrémními tlaky, vakuových komorách a tam, kde hrozí poškození částí motoru po kontaktu s reaktivními kapalinami a plyny [6][13][14].

1.5.1 Požadavky na pohon robotu

Při použití robotů v průmyslovém procesu jsou na jejich pohony kladeny nároky, aby byl zajištěn klidný a plynulý chod bez rázů při výkonu technologické operace. Z hlediska toho, že jsou roboty používány i v přesné výrobě, je při jejich konstrukci kladen důraz i na přesnost a opakovatelnost polohování. Těmito požadavky jsou zejména tyto [13].

- **Plynulost rozběhu a brzdění pohonu** – tento požadavek souvisí zejména s požadavkem minimalizace úchopové síly při transportu objektů. Nižší úchopová síla výrazně snižuje riziko mechanického poškození transportovaného objektu. Toto poškození může vzniknout jak v místě kontaktu chapadla s transportovaným objektem, tak pádem objektu z důvodu rázovitého pohybu. Dalším důvodem k řešení tohoto požadavku je potřeba v co největší míře zamezit kmitání efektoru robotu při

zastavení v konečné pozici. Toto kmitání, které je vybuzeáno prudkým zastavením robotu, může mít negativní vliv na přesnost provedení technologického úkonu na dané pozici. Zajištění plynulosti rozběhu a brzdění má pozitivní vliv na redukci opotřebení a životnost robotického manipulátoru, jelikož konstrukce robotu nebude namáhána cyklickým zatížením vznikajícím při rázovitém pohybu [13].

- **Polohovací přesnost** – tento požadavek je závislý zejména na konstrukci kinematického řetězce a jeho tuhosti po sestavení robotického manipulátoru. Přesnost polohování robotického manipulátoru dále závisí na přesnosti ovládání jeho pohonných jednotek a na způsobu odečítání aktuální kloubové souřadnice. Ovládání pohonu je možné realizovat pomocí dvou systémů. První systém, nazývaný otevřený, využívá řízení pohybu bez zpětné vazby. Naproti tomu uzavřený systém pracuje na principu řízení pohybu se zpětnou vazbou [13].
- **Tuhost systému při držení polohy** – tato potřeba souvisí s charakteristickou činností robotických manipulátorů, kterou je cyklické konání přetržitých vratných pohybů, kdy rameno robotu najede do požadované polohy, vykoná danou technologickou operaci a poté se vrátí do výchozího bodu. Při vykonávání technologické operace na rameno robotu, které je v dané chvíli v klidu, působí vnější síly související s charakterem dané technologické operace. Při výkonu operace je velice důležité, aby rameno robotu zajišťovalo předepsanou polohu efektoru. Nedostatečná tuhost soustavy může mít za následek vychýlení efektoru vnějšími



Obr. 13 Hydraulikou poháněný robot [15]

silami z ideální polohy. Tím pádem hrozí, že daná technologická operace nebude provedena podle předepsané jakosti. Zajištění držení předepsaných kloubových souřadnic během při provádění dané technologické operace má na starosti pohybová jednotka robotického manipulátoru. Požadované tuhosti se dosahuje konstrukcí propojení výstupu motoru s výstupem pohybové jednotky. U robotických manipulátorů s hydraulickým pohonem je tuhost soustavy zajišťována blokováním

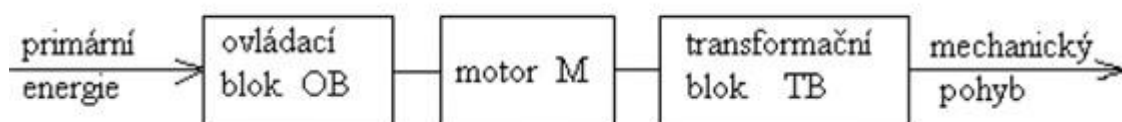
kapaliny v motoru pomocí rozvaděče. Tento systém je velmi účinný a robotické manipulátory poháněné hydraulikou dosahují vysoké tuhosti. Příklad hydraulikou poháněného robotického ramene je na obr. 13. Naproti tomu dosažení potřebné tuhosti u robotických manipulátorů s elektrickým či pneumatickým pohonem je značně problematické. Tuhost lze zajistit instalací brzdových mechanismů mezi výstup motoru a výstup pohybové jednotky, ovšem za cenu výrazného nárůstu hmotnosti a rozměrů robotického manipulátoru [13].

- **Hmotnost soustavy** – potřeba související s nutností minimalizovat hmotnost celkové soustavy. Proto je důležité, aby byla hmotnost pohonné soustavy robotického manipulátoru rovněž minimální. V případě, že budou jednotlivé pohony umístěny přímo u každé pohybové jednotky, bude hmotnost soustavy narůstat a bude mít výrazný vliv na dynamické chování celého robotického manipulátoru. S růstem hmotnosti celé konstrukce robotu se mění nejen dynamické vlastnosti, ale roste také energetická náročnost pohonů [13].
- **Rozměry soustavy** – tento požadavek na vlastnosti pohonu úzce souvisí s požadavkem na minimální hmotnost pohonu. S narůstajícími rozměry pohonu roste jeho hmotnost, což má negativní vliv na dynamické vlastnosti robotického ramene a rovněž zvyšuje energetické nároky na pohon. S narůstajícími rozměry pohonných jednotek rovněž klesají manipulační schopnosti robotu, neboť nárůst rozměrů konstrukce může zasahovat do pracovního prostoru efektoru. To hrozí například při použití hydraulického pohonu, kdy je nutné jednotlivé písty připojit na rozvod kapaliny bez rizika poškození hadic vedoucích kapalinu.
- **Prostorové uspořádání** – volbou vhodného prostorového uspořádání pohonu lze ovlivnit prostorové uspořádání celého robotického manipulátoru. Robotické manipulátory s vhodně uspořádanou strukturou mají výrazně větší pracovní možnosti v prostředích s omezeními volného pohybu [13].

1.5.2 Struktura a uspořádání pohonu

Nejdůležitějším prvkem pohonné soustavy robotu je motor, jehož účelem je přeměna vstupní energii na výstup v podobě mechanického pohybu. Pohony robotů se v první řadě rozlišují podle druhu přiváděné vstupní energie. Rozlišují se čtyři základní typy pohonů. Jsou to elektrické, tekutinové, mechanické a kombinované. Mechanický typ pohonu je rozšířen pouze sporadicky, a to u robotických manipulátorů jednoduché konstrukce. Tekutinové pohony se v zásadě dělí na pneumatické a hydraulické. Pneumatický typ pohonu je rozšířený u jednoduchých robotických manipulátorů s relativně malou nosností. Hydraulické pohony jsou rozšířené u robotů určených k manipulaci s těžkými součástmi. Nejrozšířenější typ pohonu robotů je elektrický, který k přeměně primární energie na mechanický pohyb využívá elektromotory. S vývojem lehkých převodovek malých rozměrů elektricky poháněné roboty postupně vytlačily roboty poháněné hydraulikou. V případě kombinovaného pohonu je v jednom robotu použito více typů pohonu. Příkladem může být robotický manipulátor, jehož klouby jsou poháněny elektromotory a chapadlo je ovládáno pneumaticky. Použití jednotlivých typů pohonu s sebou nese své výhody a nevýhody, které budou popsány dále [6][13].

Jak již bylo řečeno, pohon robotu slouží k přeměně vstupní energie na mechanický pohyb. Blokové schéma struktury pohonu robotického manipulátoru je znázorněno na obr. 14. Z obrázku je jasné patrné, že je primární energie, která může být ve formě elektrické energie, stlačeného vzduchu nebo kapaliny pod tlakem, vedena do ovládacího bloku, kde

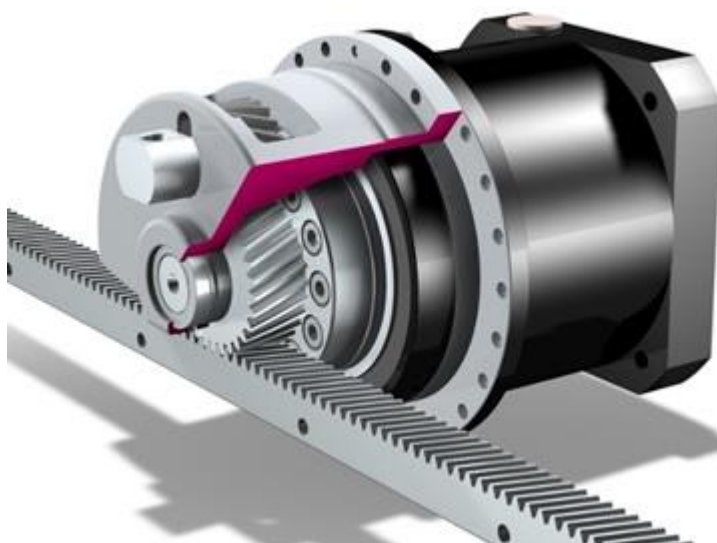


Obr. 14 Struktura pohonu manipulátoru [13]

jsou upravovány její parametry. Těmito parametry se kupříkladu rozumí tlak stlačeného vzduchu nebo napětí přivedeného elektrického napětí. Po úpravě svých parametrů je primární energie vedena do samotného motoru, kde se primární energie přemění na mechanický pohyb. Motorem se v tomto smyslu rozumí elektromotor, pneumatický válec apod. Mechanický pohyb generovaný v motoru je dále možno upravovat v transformačním bloku, kde se může měnit rychlost či směr pohybu. Z transformačního bloku je mechanický pohyb veden soustavou převodů k pohybové jednotce [13].

Už ze samé podstaty funkce transformačního bloku pohonu je patrné, že není nutnou součástí funkční struktury pohonu. Z hlediska toho, zda je transformační blok přítomen či ne, se struktury pohonu dělí na dvě základní koncepce [13].

V prvním případě je ve struktuře pohonu transformační blok zaveden. Transformační blok tedy upravuje parametry mechanického pohybu, nebo přímo mění druh pohybu. Tato změna je provedena vhodným uspořádáním, jako je například hřebenový převod, zobrazený na obr. 15. V praxi je této koncepcce využíváno tehdy, když je pohybová jednotka robotického manipulátoru vykonává translační pohyb, ale pohonem je rotační motor. V opačném případě, kdy pohybová jednotka koná rotační pohyb, ale pohon je přímočarý, je použití obdobné.



Obr. 15 Hřebenový převod [16]

Druhá koncepce s použitím transformačního bloku ve struktuře pohonu nepracuje. Z toho vyplývá, že pohon dané pohybové jednotky musí splňovat jak požadavky na charakter mechanického pohybu, tak na jeho přesné parametry. K realizaci této koncepce je nezbytné, aby byla splněna podmínka na stejný charakter mechanického pohybu vystupujícího z motoru a z pohybové jednotky robotického manipulátoru. Tedy, že to bude dvojice přímočaré pohybové jednotky s translačním motorem nebo bude rotační motor pohánět rotační pohybovou jednotku. Tato koncepce je realizována především u přímočarých kapalinových motorů pohánějících translační pohybovou jednotku. Její aplikace je rovněž vhodná pro translační i rotační elektrické krokové motory [13].

Z hlediska konstrukce robotického manipulátoru jsou možné dvě varianty uspořádání jeho pohonu. Jednotlivé varianty se liší tím, zda je u jednotlivých kloubů robotu přítomna samostatná pohonná jednotka. V prvním případě je pohonná jednotka přítomna u každé pohybové jednotky robotického manipulátoru. Tato koncepce se nazývá oddělené uspořádání pohonu a je u robotů robotických manipulátorů velmi rozšířená [13].

Druhý případ, nazývaný společné uspořádání pohonu, pracuje pouze s jedním motorem, od kterého je poté mechanický pohyb přiváděn k jednotlivým pohybovým jednotkám. Společné uspořádání pohonu se vyskytuje v několika modifikacích. První z nich je paralelní uspořádání, které je typické tím, že je mechanický pohyb rozváděn z výstupu motoru do několika pohybových jednotek současně, a to nezávisle na sobě. V případě sériového uspořádání je pohyb převáděn mezi jednotlivými pohybovými jednotkami, přičemž pohyb dané pohybové jednotky je odvozen od pohybu té předcházející. Semiparalelní uspořádání vzniká kombinací sériového a paralelního uspořádání v jedné konstrukci robotického manipulátoru [13].

1.5.3 Druhy pohonů

Druhy pohonů průmyslových robotů se dělí podle toho, jaká vstupní energie je přeměňována v pohonnou jednotku na mechanický pohyb [6][13].

a) Elektrické pohony

Principem elektrického pohonu je přeměna primární energie, která je v tomto případě elektrická, na mechanický pohyb. Elektrické pohony jsou v současné době nejpoužívanějším druhem pohonů u robotů. Konstrukce elektrického pohonu nejčastěji spočívá v kombinaci elektromotoru a harmonické či cykloidní převodovky. Díky relativně malé hmotnosti této konfigurace jsou elektrické pohony využívány při konstrukci průmyslových robotů střední nosnosti s odděleným uspořádáním pohonů jednotlivých kloubů [6][13].

Velká výhoda elektrického pohonu spočívá ve snadné dostupnosti elektrické energie, která se rovněž transportuje snadněji, než v případě použití kapalinového pohonu. Elektrické pohony se při provozu rovněž vyznačují čistotou a jsou relativně nenáročné na údržbu. Mezi další výhody elektrických pohonů patří nízká hlučnost provozu, nenáročnost na chlazení elektromotorů a potřeba malého prostoru k instalaci pohonu. Použití elektrického pohonu je finančně výhodné, a to díky nízkým pořizovacím a provozním nákladům [6][13].

Mezi nevýhody elektrických pohonů patří vysoké požadavky na kvalitu provedení všech částí systému. Další nevýhodou je závislost na přívodu elektrické energie, která je však při použití v průmyslu banální. Z použití elektrické energie rovněž plyne značné nebezpečí úrazu, které lze ovšem značně eliminovat dodržováním předepsaných bezpečnostních opatření [6][13].

V elektrických pohonech robotických manipulátorů lze uplatnit motory různých druhů. Motory elektrických pohonů lze dělit podle toho, jaký druh mechanického pohybu generují.

V případě rotačního výstupu se jedná o rotační elektromotory se spojitým pohybem, rotační krokové motory a rotační elektromagnety. Mezi elektrické motory s translačním výstupem patří lineární motory se spojitým pohybem, lineární krokové motory, hybridní pohony a přímočaré elektromagnety [13].

Elektrické motory je možné podle způsobu napájení dělit do několika kategorií. A to na střídavé, stejnosměrné a univerzální motory. Jak jednotlivé názvy napovídají, k provozu stejnosměrných a střídavých motorů je potřeba napájení adekvátním typem elektrického proudu. Univerzální elektromotor lze napájet jak střídavým, tak stejnosměrným proudem [6][13].

Použití servomotorů s sebou přináší výhodu přesného dosahování požadované polohy s dobrou opakovatelností. Rovněž je možná účinná regulace otáček při rotačním výstupu pohonu. V konstrukcích pohonů průmyslových robotů jsou k elektrickým motorům instalovány další prvky. Těmi jsou například říditelné zdroje elektrické energie určené k napájení jednotlivých vinutí či prvky automatického řízení výstupních parametrů. Použití

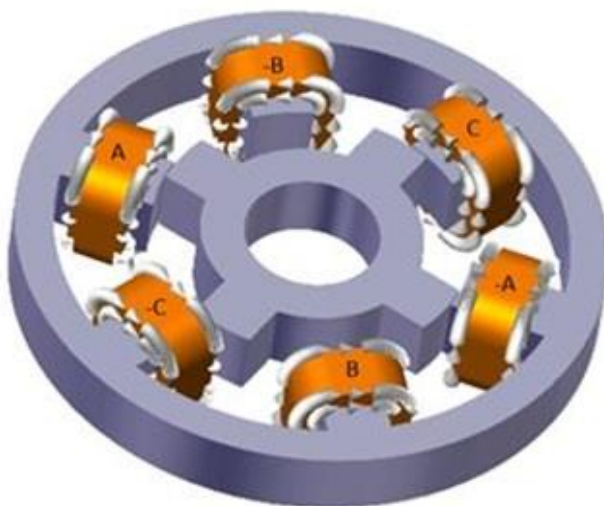


Obr. 16 Asynchronní motor [17]

jednotlivých konfigurací elektrického pohonu je různá podle toho, jaké výstupní parametry jsou od daného pohonu očekávány. Při potřebě vysokého výstupního výkonu je nejjednodušším řešením použití trojfázového asynchronního motoru s kotvou nakrátko, který je zobrazený na obr. 16. Pokud není vysoký výkon požadován, je možné použít jednofázový asynchronní motor s pomocnou fází a kondenzátorem [6][13][17].

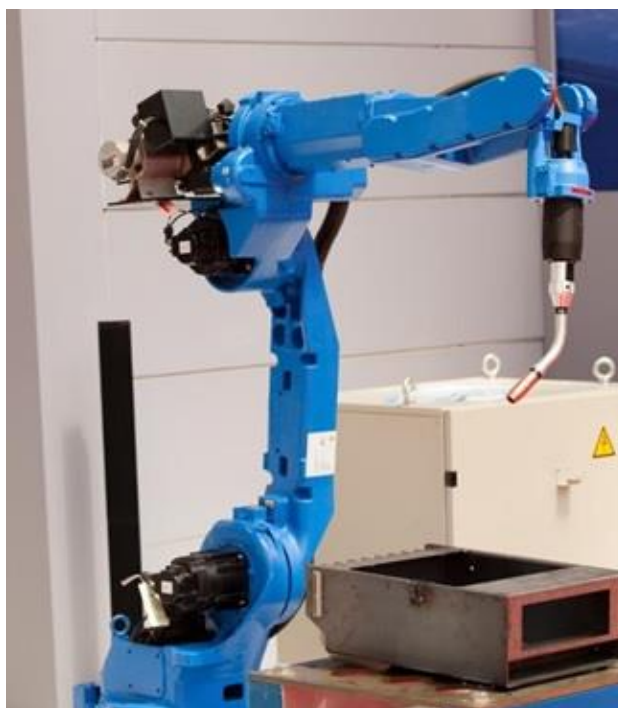
V poslední době se při stavbě průmyslových robotů rozšiřuje použití krokových motorů. Krokové motory pracují na principu nespojitě změny elektromagnetického pole, která je generována přívodem proudových impulzů do prostorově rozložených cívek. Rozložení cívek s rotorem uprostřed je znázorněno na obr. 17. Přívod elektrického pulzu na dvojici cívek, které leží v prostorovém uspořádání proti sobě, vede ke generování synchronizačního momentu, jehož působením dojde k natočení rotoru krokového motoru. Každý proudový impulz je přiváděn do jiné dvojice cívek. Z toho vyplývá, že úhel natočení rotoru je závislý na počtu přivedených proudových impulzů a že rychlost otáčení hřídele je závislá na frekvenci přiváděných impulzů [6][13][18].

Výhoda krokových motorů spočívá ve snadném dosažení požadovaného natočení výstupního hřídele. Další výhodou je snadná regulace otáček pomocí frekvence proudových impulzů [6][13][18].



Obr. 17 Princip krokového motoru [18]

Zásadní nevýhoda krovových motorů však spočívá v tom, že jsou schopny generovat pouze malý krouticí moment, který navíc s rostoucí rychlostí motoru klesá. Tato nevýhoda předurčuje použití krokových motorů v těch pohonech průmyslových robotů, které nevyžadují vysoký výkon. Zvýšení výkonu pohonu s krokovým motorem lze dosáhnout kombinací krokového motoru a hydraulického zesilovače. Průmyslový robot poháněný krokovými motory, který je vybaven svařovací hubicí je zobrazen na obr. 18 [6][13][18].



Obr. 18 Průmyslový robot s krokovými motory [19]

b) Tekutinové pohony

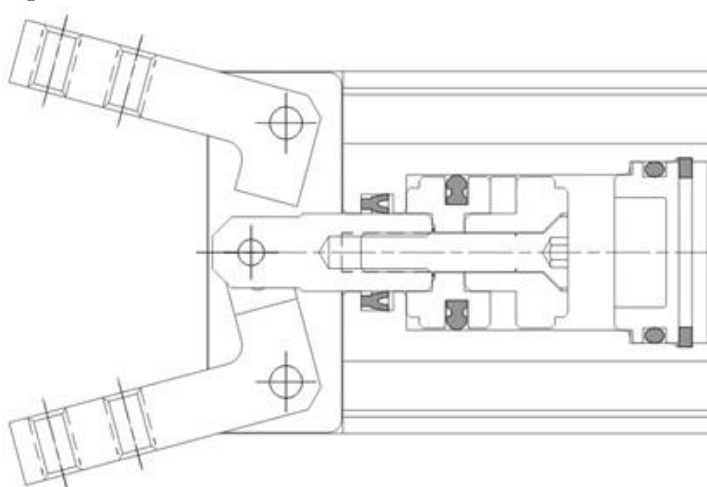
Tekutinové pohony používají jako primární energii k přeměně na mechanický pohyb stlačeného vzduchu nebo tlakové kapaliny. Z vlastností těchto tekutých médií jsou při konstrukci pohonů robotických manipulátorů nejdůležitějšími viskozita a poddajnost. Z důvodu odlišnosti těchto vlastností pro stlačený vzduch a tlakovou kapalinu se hydraulické a pneumatické pohony používají v rozdílných aplikacích. Tekutinových pohonů se využívá zejména k realizaci translačních pohybů. Řízením tlaku a proudu provozního média jsou snadno ovládány výstupní parametry daného pohonu. Značnou výhodou je možnost přetížení motoru bez rizika jeho poškození. Jelikož k realizaci pohybu o požadovaných parametrech není potřeba využívat transformační blok, jsou tekutinové pohony výhodné z hlediska své nízké hmotnosti. Použití těchto pohonů je ovšem limitováno nutností přívodu provozního média vedením, které může omezovat pracovní prostor robotu [6][13].



Obr. 19 Hydraulický píst [20]

Hydraulických pohonů je využíváno především v oblastech, kde je potřeba velkých výkonů. Základním prvkem hydraulického translačního pohonu je hydraulický píst, který je v řezu znázorněn na obr. 19. Hydraulické pohony se vyznačují vysokou tuhostí, plynulým chodem s možností snadné regulace rychlosti a velkou účinností při přijatelné velikosti pohonné jednotky. Mezi nevýhody hydraulického pohonu však patří potřeba vybudování okruhu tlakové kapaliny, což je prostorově náročné. Dále obtížnost dosažení větších provozních rychlostí. V neposlední řadě rovněž závislost viskozity minerálních olejů na teplotě, což se projeví změnou tlakových poměrů v okruhu a změnou rychlosti pohonu. Při použití hydraulických pohonů je rovněž nutný důraz na bezpečnost z důvodu hořlavosti některých pracovních kapalin [6][13].

Pneumatické pohony lze s úspěchem využívat především v těch oblastech, kde nejsou na pohon pohybové jednotky kladeny nároky na vysoký výkon. Využívá se tedy zejména u konstrukcí s malou nosností či jako pohon koncových jednotek robotu, jako je například pneumatické chapadlo, které je na obr. 20. Velká výhoda tohoto typu pohonu spočívá v možnosti napojení na centrální rozvod stlačeného vzduchu v závodě, čímž odpadá nutnost přímé výroby média, které je zdravotně nezávadné a je možné ho přímo vypouštět do okolí bez nutnosti zpětného odvodu. Pneumatické translační pohony jsou schopné dosahovat velkých rychlostí a mohou pracovat v nepříznivých podmínkách. Nevýhodami pneumatického pohonu jsou nerovnoměrná rychlost pohybu, nutnost mazání pohybových částí mechanismů a poměrně vysoké provozní náklady způsobené cenou výroby stlačeného vzduchu [6][13][21].



Obr. 20 Pneumatické chapadlo [21]

c) Kombinované pohony

V konstrukci kombinovaných pohonů se v bezprostřední blízkosti daného pohonu pracuje s několika druhy nositelů energie. Při konstrukci kombinovaných pohonů panuje snaha o kombinaci kladných vlastností jednotlivých typů pohonů. V praxi je z možných kombinací elektrického, pneumatického a hydraulického pohonu využíváno pouze dvou kombinací. Jsou to pneumohydraulické a elektrohydraulické pohony. Při konstrukci



Obr. 21 Pneumohydraulické válce [22]

průmyslových robotů se však vyskytují velmi sporadicky, jelikož z praktického hlediska je výhodnější pracovat pouze s jedním druhem pracovního média [6][13][22].

Pneumohydraulický pohon kombinuje výhody plynoucí z použití pneumatického a hydraulického pohonu. Výhodou převzatou z pneumatického pohonu je jeho rychlost. Síla přichází zapojením hydrauliky. Pracovní cyklus pneumohydraulického válce, který je zobrazen na obr. 21, je rozdělen do tří částí. V první části je proveden pneumatický rychlozdvih probíhající po dosednutí pracovního pístu na předmět. Poté je pomocí pneumohydraulického zdvihu vykonána daná operace. Do původní polohy je píst navrácen pneumatickým zpětným zdvihem. Výhodami tohoto pohonu jsou bezúdržbový provoz, nízké provozní náklady, dlouhá životnost a rychlý provoz zařízení, který je nutný pro udržení vysokého taktu výrobní linky [6][13][22].

V případě elektrohydraulických pohonů je využíváno konstrukce, kdy je na vstupu elektromotor a výstupem je hydromotor. To spojuje výhodu snadného propojení elektromotoru s řídicí jednotkou pohonu a výhodu hydromotoru spočívající v jeho síle. Spojení je provedeno tak, že hydromotor kopíruje pohyb elektromotoru v předem definované poměry, ovšem s výrazným výkonovým zesílením. Od výstupu hydromotoru je realizována zpětná vazba na vstup elektromotoru, která zajišťuje dosažení požadovaných parametrů výstupu. Při použití krokového motoru v kombinaci s hydraulickým zesilovačem je



Obr. 22 Elektrohydraulický píst [23]

eliminována zásadní nevýhoda malého krouticího momentu krokových motorů, neboť v tomto případě krokový motor ovládá pouze rozvod provozního média hydraulického pohonu. Elektrohydraulické pohony mohou mít translační i rotační výstup, přičemž elektromotor na vstupu je vždy rotační. Na obr. 22 je elektrohydraulický píst kombinující rotační výstup elektromotoru s translačním výstupem hydraulického pístu [6][13][23].

1.6 Využití průmyslových robotů při obrábění

Konstrukce průmyslových robotů a jejich pohybové možnosti jsou velmi výhodné pro použití ve strojírenství. Jedním z mnoha oborů, ve kterém se průmyslové roboty výhodně uplatňují, je obrábění. Zapojení průmyslových robotů do tohoto odvětví je značně různorodé.

Nejčastějším případem je ten, kdy průmyslový robot provádí kompletní manipulaci s obráběným materiálem, přičemž samotný obráběcí proces probíhá v počítačově řízeném obráběcím centru. Úkolem obsluhy obráběcího centra je v tomto případě pouze zajištění polotovarů, které průmyslový robot uchopí z pásového dopravníku nebo z palety a přesune je do přípravku, kde jsou uchyceny a připraveny k obrábění. Po uchycení polotovaru je automaticky spuštěn obráběcí proces, po jehož skončení a odepnutí obrobku z přípravku průmyslový robot obrobek buď přesune do jiného přípravku k obrobení jiné plochy, nebo je obrobek vyjmut z obráběcího centra a přesunut na příslušné úložiště hotové výroby. Výhoda



Obr. 23 Zakládání materiálu do obráběcího centra [24]

tohoto řešení spočívá v tom, že obsluha obráběcího centra se soustředí pouze na kontrolu obrobených kusů a případnou výměnu opotřebovaných nástrojů. Může tedy obsluhovat více takových center najednou, což je u klasických obráběcích center možné pouze v případě, když se na daných obráběcích centrech provádí složité a časově náročné operace. Z kompletní automatizace obráběcího procesu ovšem plyne možná nevýhoda. Pokud dojde ve velkosériové výrobě k události, která bude mít nepříznivý vliv na jakost obráběných kusů, tak bude chyba odhalena až při kontrole určité části produkce, což může mít za následek značné množství vyprodukovaných neshodných kusů. Příklad zakládání materiálu do CNC obráběcího centra je na obr. 23.



Obr. 24 Frézování plastového dílu pomocí robotu [25]

Dalším častým využitím průmyslových robotů je jejich přímá účast při obráběcím procesu. V tomto případě je jako efektor průmyslového robotu použit přímo řezný nástroj. Tato koncepce je použita při soustružení pomocí robotu. V případě frézování a vrtání pomocí robotu je koncepce taková, že je řezný nástroj uchycen v jednotce s vlastním pohonem, která je nainstalována na robotickém rameni. Obsluha zařízení je v tomto případě odpovědná za ukládání polotovarů do přípravku, za odebrání obrobků a za kontrolu jejich kvality, přičemž manipulační úkony mohou být rovněž automatizovány. Výhoda tohoto zapojení průmyslového robotu do obráběcího procesu spočívá v tom, že lze velice úspěšně obrábět velice složité tvary a kontury. Další výhoda spočívá v tom, že lze přesně obrábět i velmi rozměrné obrobky. Toho se využívá například při výrobě forem a jader pro velmi rozměrné odlitky, či pro rychlou výrobu designérských návrhů.

Využití průmyslových robotů jako přímých účastníků obrábění má však jednu zásadní nevýhodu. Samotný obráběcí proces totiž doprovází značné síly působící na nástroj. Tyto síly následně přechází do ramene průmyslového robotu. Z hlediska omezené tuhosti konstrukce ramene hrozí vychýlení nástroje od naprogramované stopy a produkce nejakostních výrobků. Z tohoto důvodu se průmyslovými roboty ve větší míře obrábí pouze měkké materiály, jako je například dřevo nebo plast, jak je vidět na obr. 24. V případě obrábění kovových materiálů je nutné volit průmyslové roboty masivní konstrukce s dostatečnou tuhostí, která dokáže vzniklým silám odolat. Příklad frézování kovového výrobku je na obr. 25. Na tomto obrázku je patrné, že průmyslový robot vykonává vedlejší pohyb a hlavní pohyb je zajišťován elektromotorem nainstalovaným na rameni robotu.



Obr. 25 Frézování kovového výrobku robotem [26]

1.7 Významní výrobci robotů

Na trhu s roboty působí celá řada společností, které svým dlouhodobým působením dokazují, že patří do světové špičky v oboru výroby robotů a robotizace pracovišť průmyslových závodů. Vybrané společnosti jsou blíže popsány. Vzhledem k přehlednosti jsou vybrány jen ty nejvýznamnější.

1.7.1 KUKA

Společnost KUKA byla založena v Německém Augsburgu již v roce 1889 jako výrobce acetylenu používaného k výrobě cenově dostupného domácího a veřejného osvětlení a automobilových světlometů. Název společnosti je akronymem slovního spojení „*Keller und Knappich Augsburg*“ a nese v sobě tedy jak jména zakladatelů, tak jméno města založení. Společnost pružně reagovala změnou sortimentu na měnící se na poptávku trhu a roku 1973 vyvíjí prvního vlastního robota. Roku 1996 se od společnosti KUKA odděluje divize zaměřená na robotiku a vzniká samostatný podnik KUKA Roboter GmbH. Roku 2000 je společností představena nová generace produktů. Modelová řada průmyslových robotů QUANTEC jako první dosahuje kompletního pokrytí intervalu mezní zátěže 90 až 300 kg s limitním dosahem 3100 mm. Vývoj nových řídicích systémů umožňuje plnou integraci bezpečnostního řízení. Společnost KUKA rovněž vyvinula moderní ovládací panely smartPAD a programovací software WorkVisual sloužící ke snadnému ovládání



Obr. 26 Výrobní linka s roboty KUKA [27]

a programování průmyslových robotů. Skupina KUKA zaujímá na Evropském trhu první příčku v dodávání průmyslových robotů a automatizovaných zařízení do sektoru automobilového průmyslu. Na obr. 26 je úsek výrobní linky zaměřený na bodové svařování karosérií automobilů pomocí průmyslových robotů KUKA [9][27].

1.7.2 ABB

Společnost ABB, která má sídlo ve švýcarském Curychu, vznikla roku 1988 fúzí švédské Elektriska Aktiebolaget a švýcarské BBC. Obě sloučené společnosti byly založeny na konci 19. století, tudíž se společnosti ABB opírá o více než stoletou tradici působení v oboru energetiky a automatizace. Činnost společnosti ABB se dělí do pěti celosvětových divizí [27][28].

- První divize je zaměřena na výrobky pro energetiku, které pokrývají celé běžně využívané rozpětí elektrického napětí. Příkladem produktů této divize jsou vypínače, rozvaděče či výkonové transformátory pro rozvodny elektrické energie.
- Druhá divize je zaměřena na systémy pro energetiku a zabývá se řešením optimalizačních úloh zadávaných elektrárnami, které využívají tradiční nebo obnovitelné zdroje energie.
- Třetí divize pracuje v oboru výrobků nízkého napětí a produkuje například řídicí techniku nebo se zabývá automatizací bytových domů.
- Čtvrtá divize je zaměřena na procesní automatizaci a mezi její produkty patří výrobky jako elektrické pohony lodí, těžební stroje či řídicí systémy.
- Poslední divize společnosti ABB se zabývá automatizací výroby a pohony, a je předním světovým dodavatelem průmyslových elektrických motorů a pohonů. Jedním z průmyslových robotů produkovaných touto divizí je model ABB IRB 2600, který je zobrazený na obr. 27.



Obr. 27 ABB IRB 2600 [28]

Společnost ABB nabízí širokou škálu průmyslových robotů pokrývajících rozsah maximálního zatížení a limitního dosahu robotu. Společnost ABB rovněž vyvinula vlastní software RobotStudio pro pohodlné programování průmyslových robotů. Ke snadnému řízení robotu společnost nabízí řídicí systémy. Představitelem poslední generace těchto systémů je IRC5, který obsahuje jedinečné uživatelsky přívětivé funkce pro docílení maximálního výkonu a rychlosti průmyslového robotu. Systém rovněž umožňuje snadnou integraci periferií robotu. Průmyslové roboty ABB lze nalézt v různých odvětvích, jako je například balení a paletizace, výroba elektroniky, dřevozpracující a nábytkářský průmysl, automobilový průmysl atd. V poslední době roboty ABB zefektivňují produkci solárních panelů, jak je vidět na obr. 28 [27-29].



Obr. 28 Výroba solárních panelů [29]

1.7.3 Yaskawa

Japonská společnost Yaskawa Electric Group byla založena roku 1915 a její sídlo se nachází ve městě Kitakyushu. Yaskawa má díky svým 21 pobočkám a 78 dceřiným společnostem celosvětové zastoupení a zaměstnává zhruba 8000 pracovníků. Výroba jednotlivých produktů je rozdělena do divizí. Nejvýznamnějšími produkty jednotlivých divizí jsou servomotory, zesilovače, inventory či řídicí jednotky pohonů a automatizačních



Obr. 29 Frézování pomocí průmyslového robotu MOTOMAN [31]

zařízení. Divize zaměřená na robotiku, jejíž provoz začal roku 1990, prodává své produkty pod názvem MOTOMAN. Společnost Yaskawa si zakládá na tom, že si pro své roboty vyrábí všechny důležité komponenty ve svých vlastních podnicích, tudíž má stoprocentní přehled o kvalitě všech použitých dílů. Tím pádem ručí za trvanlivost a špičkovou kvalitu dodávaných robotů. Průmyslové roboty MOTOMAN jsou uplatněny v různých oborech. Významný podíl produkce proudí do společností, které robotizují svou oblast obloukového svařování. Nicméně průmyslové roboty MOTOMAN lze nalézt i v jiných aplikacích, jako je například montáž, dělení materiálů nekonvenčními technologiemi, obsluha strojů, přemísťování materiálů a manipulace, balení, lakování, paletizace či obrábění kovových i nekovových materiálů. Příklad využití průmyslového robotu MOTOMAN při frézování ozubeného kola je zobrazen na obr. 29 [27][30].

Roční produkce průmyslových robotů MOTOMAN dosahuje 22 000 kusů, což činí společnost Yaskawa, z hlediska objemu produkce, nejvýznamnějším světovým výrobcem průmyslových robotů. Společnost se svými produkty rovněž nabízí rozsáhlé aplikační know-how, případnou servisní pomoc, dodání náhradních dílů a svůj vlastní uživatelsky přívětivý software pro naprogramování a ovládání robotu [27][30].

1.7.4 FANUC

Společnost FANUC, která má sídlo v Japonském městě Oshino-mura, vznikla roku 1956 a stala se průkopníkem v oblasti průmyslové automatizace a ve vývoji a následné produkci CNC zařízení. Produkty společnosti FANUC stály v čele výrobní revoluce, která započala automatizací jednotlivých operací na pracovišti a postupně pokročila v celkovou automatizaci produkčních linek. Společnost FANUC zaměstnává kolem 6 000 pracovníků ve svých jednotlivých celosvětově rozmístěných pobočkách. Produkce společnosti je rozdělena na tři hlavní úseky. První úsek je zaměřen na vývoj a výrobu CNC ovládacích panelů, servomotorů, řízených pohonů a CO₂ laserů. Zaměření druhého úseku je na vývoj a výrobu CNC zařízení na vstřikovací lití pod názvem Roboshot, CNC vrtací centra Robodrill a víceúčelové dálkově ovládané robotické vozítko Robocut. Třetí úsek je zaměřen na vývoj a výrobu robotických zařízení. Portfolio společnosti FANUC v oblasti průmyslových robotů je velice rozsáhlé a výřez produktů je zobrazen na obr. 30 [27][32].



Obr. 30 Průmyslové roboty FANUC [33]

Společnost spolu s průmyslovými roboty nabízí řídicí systém obsahující novou generaci hardwarového a softwarového vybavení, která umožňuje naplno využít poskytovaný výkon průmyslového robotu. Součástí řídicího systému je uživatelsky přívětivý software. Programování a řízení robotu je rovněž možné pomocí přenosného dotykového panelu. Společnost FANUC rovněž vyvinula software ROBOGUIDE speciálně pro podporu výroby a simulace procesů, které bude průmyslový robot provádět. Software umožňuje zobrazení naplánované dráhy robotu s natočením ramene, tudíž je možné predikovat kolize s okolním prostředím a tím pádem plně využít výrobní prostor závodu. Díky možnosti offline programování lze kompletní proces navrhnout v kanceláři a poté program nahrát do řídicí jednotky robotu umístěného v provozu, což významně zvyšuje pohodlí programátora. Součástí řídicího systému je rovněž software umožňující plnou podporu při práci s kamerou. [27][32]

2 POPIS STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE

2.1 Představení společnosti

Společnost Edscha Automotice Kamenice, s.r.o. je významným členem mezinárodního automobilového průmyslu. Na českém trhu působí od roku 1994. Společnost Edscha, jejíž logo je na obr. 31, je členem španělského koncernu Gestamp, který své produkty dodává všem významným výrobcům automobilů na světě. Koncern Gestamp má své pobočky ve 21 zemích světa a zaměstnává téměř 5000 pracovníků. Závod, který sídlí v Kamenici nad Lipou od roku 2000, se rozkládá na ploše přibližně 16500 m². Výrobní plocha závodu je rozdělena do dvou výrobních hal a činí zhruba 11500 m². Po výstavbě nového výzkumného centra dosáhla plocha určená přímo na výzkum a vývoj velikosti cca 3000 m². Sklad vstupního materiálu a expediční sklad se rozkládají na ploše cca 3000 m². Hlavními činnostmi



Obr. 31 Logo společnosti [34]



Obr. 32 Vyráběné produkty [34]

prováděnými v kamenickém závodu jsou obrábění kovových materiálů, bodové a švové svařování, montáže, vývoj a testování nových produktů a 3D měření. Výrobní sortiment společnosti zahrnuje širokou škálu komponent. Nejčastěji vyráběné produkty jsou závěsové systémy dveří, závěsy a aktivní závěsy kapoty, dveřní omezovače, pedálové sestavy, páky ruční brzdy, systémy pro posuvné dveře a hnací systémy víka zavazadlového prostoru. Výřez z vyráběných produktů je na obr. 32 [34].

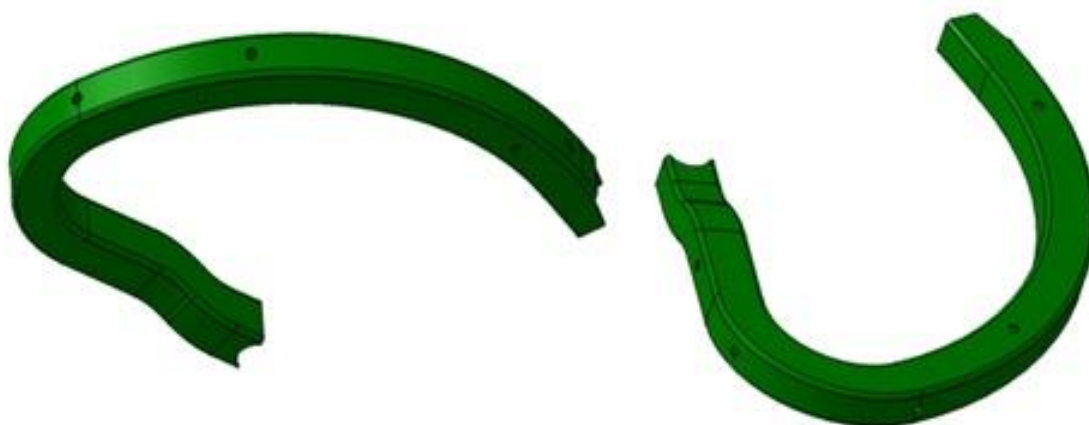
2.2 Vyráběný díl

Popisovaný díl, vyráběný ve společnosti Edscha Automotive Kamenice, s.r.o., je klíčovou součástí sestavy závěsu víka zavazadlového prostoru automobilu AUDI A4 s karoserií typu sedan, který je na obr. 33. Díl je vyráběný v pravé a levé variantě, přičemž



Obr. 33 AUDI A4 sedan [35]

3D model levé varianty hotového dílu je zobrazen na obr. 34. Pravá varianta je zrcadlovým obrazem varianty levé. Popisovaný díl je vyráběn ohýbáním a následným třískovým obráběním obdélníkového profilu, který je dodáván dle normy ČSN EN 10305-5, která popisuje technické dodací podmínky svařovaných čtvercových a obdélníkových profilů



Obr. 34 Vyráběný díl

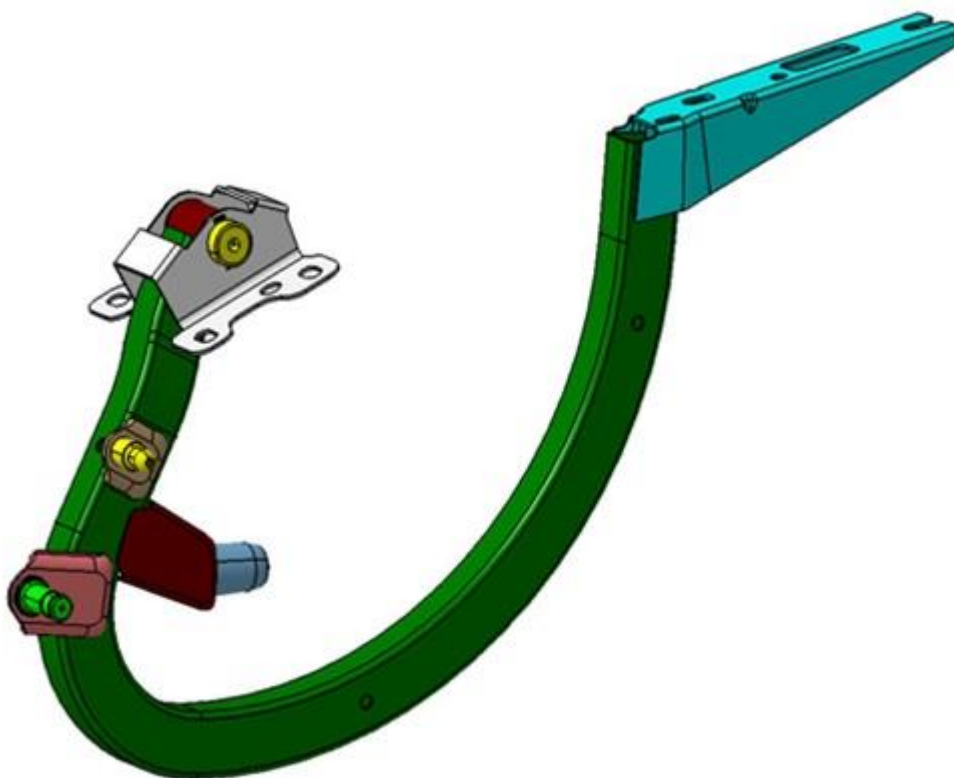
kalibrovaných za studena. Dodávaný obdélníkový profil je vyroben z oceli 1.0220, označované též jako E260. Dle chemického složení a mechanických vlastností je patrné, že se jedná o nelegovanou konstrukční ocel s nízkým obsahem uhlíku a zaručeným maximálním obsahem fosforu a síry. Těmito vlastnostmi je daná ocel blízká ocelím třídy 11. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli E260 jsou, spolu s porovnáním této oceli s obdobnými ocelmi třídy 11, vypsány v tab. 1 [36][37].

Tab. 1 Vlastnosti materiálu

Označení oceli		Hmotnostní podíl přísad [%]						Mez pevnosti v tahu	Horní mez kluzu	Tažnost
Značka	Číselné označení	C max	Si max	Mn max	P max	S max	Al min	R _m [MPa]	R _e [MPa]	A [%]
E260	1.0220	0,16	0,35	1,20	0,025	0,025	0,015	340	260	21
	11343.1	0,01	-	0,045	-	0,045	-	300	180	20
	11375.1	0,17	-	0,045	-	0,045	-	400	196	-

2.3 Postup výroby

Jak je patrné z trojrozměrného modelu levé varianty finální sestavy závěsu víka zavazadlového prostoru na obr. 35, skládá se finální sestava z mnoha komponent. Výroba levé a pravé varianty probíhá současně, jelikož na jednotlivých pracovištích jsou současně výrobní přípravky pro obě varianty.



Obr. 35 Finální sestava

Výroba sestavy závěsu víka zavazadlového prostoru probíhá dle příslušného technologického postupu. Samotná výroba je rozdělena do deseti operací, které jsou přesně popsány v technologickém postupu. Zjednodušeně zapsané operace technologického postupu jsou vypsány dále.

- 0010 Kontrola – Provedení vstupní kontroly materiálu dle kontrolního plánu pro příjem zboží.
- 0020 Nýtovat – Nýtování pružných a kulových čepů do příslušných konzolí. Vizuální kontrola jednoho kusu za hodinu dle referenčního vzorku.
- 0030 Ohýbat – Ohýbání obdélníkových profilů dle příslušné výkresové dokumentace na CNC ohýbacím stroji. Kontrola jednoho kusu za hodinu zaměřená na vybrané rozměry, která se provádí v kontrolním přípravku s kalibry.
- 0040 Obrábět – Upnutí ohnutých profilů do přípravku, obrobení konců profilů a vrtání dvou děr o $\varnothing 6,5$ mm na CNC obráběcím stroji. Kontrola jednoho kusu za hodinu zaměřená na tvar obrobeného konce a na průměr a pozici vyvrtaných děr, která je prováděna v kontrolním přípravku s kalibry. Vizuální kontrola otřepů na obrobených plochách.
- 0050 Vrtat – Upnutí profilů do přípravku a následné vrtání dvou děr ze strany a čtyř děr po obvodu profilu na pracovišti s roboty. Všechny vrtané díry jsou o $\varnothing 6,5$ mm. Kontrola jednoho kusu za hodinu zaměřená na pozice a průměry všech vyvrtaných děr, která je prováděna v kontrolním přípravku s kalibry. Pracoviště této operace je vyfocené na obr. 36.



Obr. 36 Pracoviště operace 0050 Vrtat

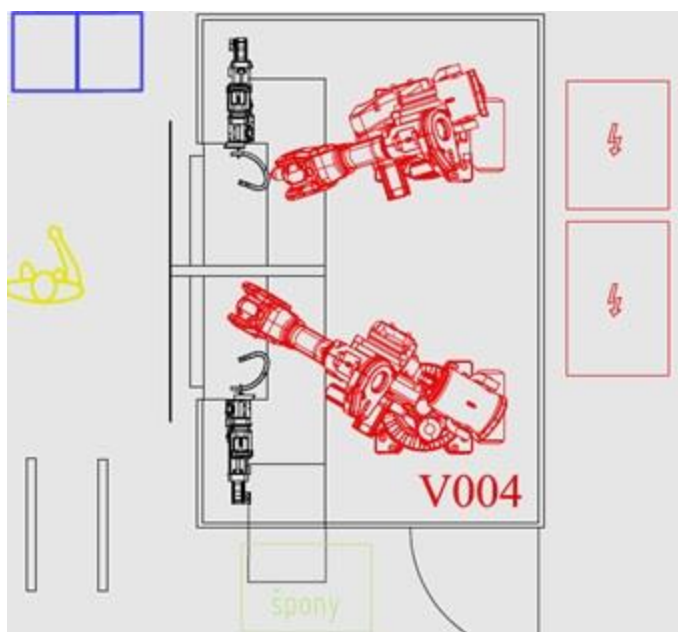
- 0060 Odjehlit – Odjehlení všech osmi otvorů vyvrtaných do profilu v předchozích operacích a případné čištění profilů v ultrazvukové čističce. Vizuální kontrola jednoho kusu za hodinu zaměřená na správnost odjehlení, která probíhá porovnáním s referenčním vzorkem.
- 0070 Svařovat – Upnutí předpřipravených komponent do přípravku a svařování na určených místech na pracovišti s roboty. Stoprocentní kontrola kvality svarů, jejich případného rozstříku a povrchových vad. Kontrola jednoho kusu za hodinu zaměřená na vybrané rozměry svarku na kontrolním přípravku s kalibry.

- 0080 Montáž – Lisování pouzder do svarku a sešroubování připravených komponent. Kontrola jednoho kusu za hodinu zvolených rozměrů posuvným měřidlem a na kontrolním přípravku s kalibry. Vizuální kontrola jednoho kusu za hodinu přítomnosti všech komponent v sestavě a případného mechanického poškození, která je prováděna porovnáním s referenčním vzorkem.
- 0090 Značení – Ruční nasazení dorazu a značení hotové sestavy příslušným kódem. Stoprocentní kontrola dle příslušného kontrolního plánu a balení dle balicího předpisu. Vizuální kontrola jednoho kusu za hodinu správné pozice a zajištění dorazu a provedení značení, která se provádí porovnáním dílu s referenčním vzorkem.
- 0100 Kontrola – Výstupní kontrola hotových výrobků dle plánu pro výstupní kontrolu.

2.4 Výrobní linka

Kompletní výroba sestavy závěsu víka zavazadlového prostoru probíhá dle technologického postupu na jednotlivých pracovištích pro každou výrobní operaci. Aby byla výroba co nejplynulejší, jsou jednotlivá pracoviště uspořádána do linky. Operace vstupní a výstupní kontroly probíhají na příslušném místě mimo linku. Layout části výrobní haly, kde je linka umístěna, je v příloze 1. Jak je z layoutu patrné, svařování probíhá na dvou identických pracovištích zároveň, neboť je tato operace časově nejnáročnější a při projektování linky s jedním pracovištěm pro tuto operaci tvořilo toto pracoviště úzké místo.

Ukázka části layoutu je na obr. 37, kde je možno vidět kompletní pracoviště vrtání. Jak je z tohoto obrázku patrné, je pracoviště vybaveno dvojicí průmyslových robotů a dvojicí vrtaček vybavených lineárním pohonem. Celé pracoviště je z důvodu bezpečnosti oploceno a v přední části, kde se pohybuje obsluha zařízení, je chráněno vícepraskovou světelnou závorou. V levé dolní části obrázku jsou rovněž znázorněny dva skluzy, na které obsluhující pracovník odkládá hotovou produkci. Dle současného uspořádání je výrobní linka obsazena osmi pracovníky.



Obr. 37 Výřez z layoutu linky

2.5 Vybavení pracoviště vrtání

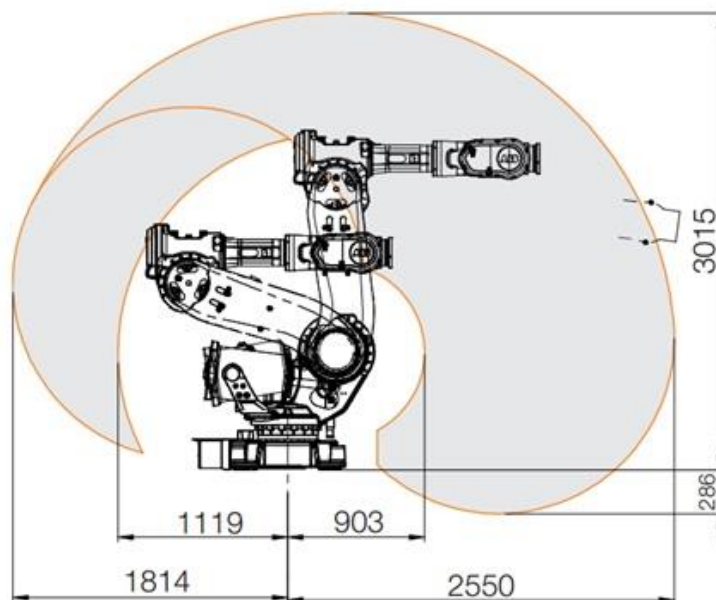
Pro pátou operaci technologického postupu, kterou je vrtání, je výrobní linka vybavena dvojicí průmyslových robotů ABB model IRB 6640-180/2.55. Tento elektricky poháněný průmyslový robot, který je zobrazen na obr. 38, byl švýcarskou společností ABB představen roku 2007. Díky svým parametrům je tento model ideálním řešením pro různé aplikace. Nejčastěji se tento model používá při manipulaci s materiálem, obsluze strojů a při robotizaci bodového a švového svařování [28].



Obr. 38 Průmyslový robot
ABB IRB 6640-180/2.55 [38]

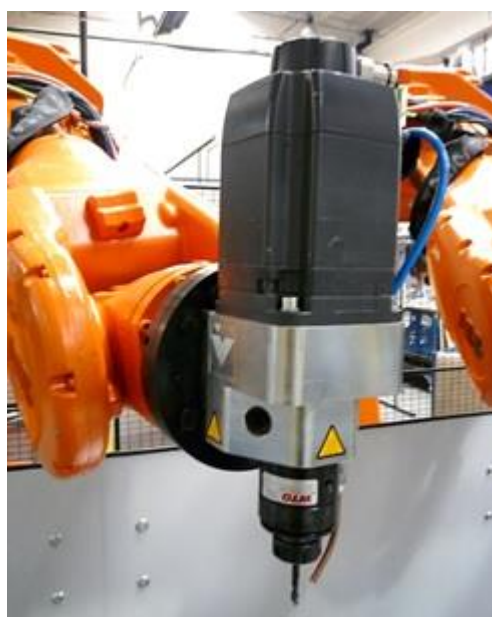
Tento model má šest stupňů volnosti, což umožňuje provádění manipulační a jiné pracovní činnosti v plném rozsahu. Užitečné zatížení tohoto modelu je 180 kg, což je hodnota dostatečná i pro manipulaci s těžkými břemeny. Robot pracuje s druhou generací funkcí TrueMove a QuickMove, které umožňují jeho přesnější vedení, což se rovněž promítne ve snížení programovacího času a zpřesnění prováděných operací. Se svou vahou 1310 kg a rozměry základny 1107 x 720 mm je nutné, aby byl robot pevně usazen v podlaze.

Jak je patrné z konstrukce robotického ramene, které obsahuje tři rotační vazby, je pracovní prostor robotu angulární. Rozměry pracovního prostoru robotu jsou zakresleny na obr. 39. Opakovatelnost vedení po dráze je u tohoto modelu 0,7 mm. Opakovatelnost najetí na jednotlivé pozice je 0,07 mm [28].



Obr. 39 Pracovní prostor robotu ABB IRB 6640-180/2.55 [38]

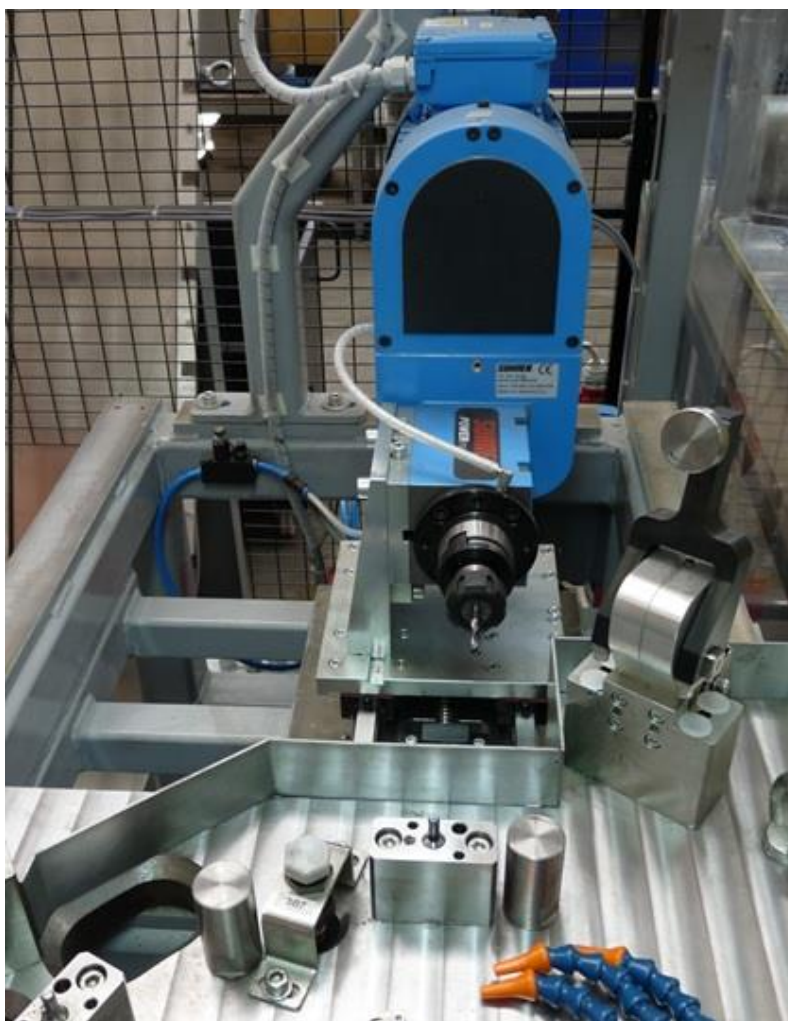
Konce ramen robotů jsou osazeny vrtacími jednotkami. Vrtací jednotku je možno vidět na obr. 40. Rotační pohyb nástroje je u této jednotky zajišťován synchronním elektromotorem SIEMENS 1FK7063-2AH71-1QA0-Z, který má při otáčkách 4500 min^{-1} nominální výkon 1,4 kW. Hmotnost tohoto elektromotoru je 11,1 kg. Napájení elektromotoru zajišťuje vedení elektrické energie, které je vedeno po konstrukci robotického



Obr. 40 Vrtací jednotka

ramena. Točivý moment elektromotoru je z jeho výstupní hřídele přenášen přes převodovku do vrtací hlavy, ve které je upevněn nástroj. Pomocí této vrtací jednotky je do upnutého dílu vyvrtáno pět děr o průmětu 6,5 mm. K nástroji je rovněž přivedena hadička pro možné chlazení během vrtacího procesu. V současné době se při vrtání chladí stlačeným vzduchem [39].

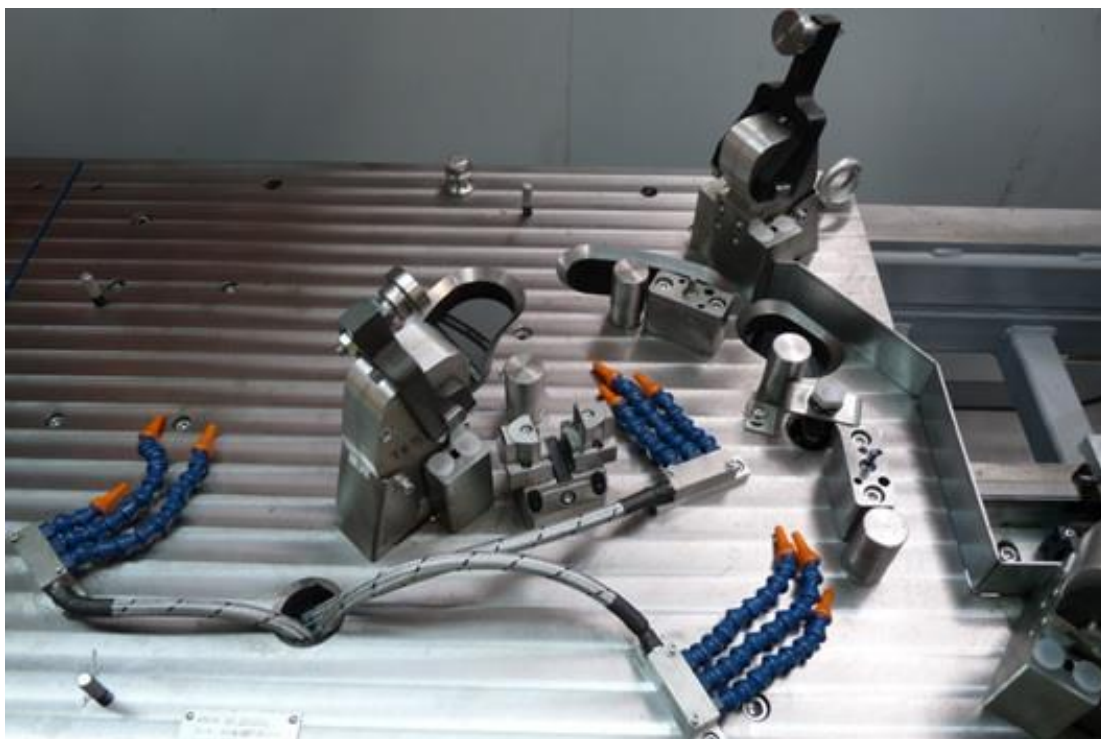
Pracoviště vrtání je rovněž vybaveno vrtacími jednotkami SUHNER POWERmaster s translačním pohonem, které zajišťují vyvrtání jedné díry do obou upnutých kusů. Vrtání těchto děr je touto metodou řešeno z důvodu nedostatku prostoru na lince. Způsob realizace tohoto způsobu vrtání je na obr. 41.



Obr. 41 Boční vrtací jednotka

Před spuštěním programu robotů jsou díly vloženy do přípravků. Součástí upínacího přípravku je rovněž soustava sloužící k ofukování přípravku od třísek stlačeným vzduchem. Vložení do přípravku probíhá tím způsobem, že se díl ustaví na dva kolíky, které zajedou do děr vyvrtaných v předchozí operaci na CNC obráběcím stroji. Při spuštění programu je díl zajištěn pomocí malého svěráku a pomocí trojice pneumaticky ovládaných upínek. Ty zajistí, že bude vrtaný díl po celou dobu běhu programu v požadované pozici. Po ukončení vrtacího procesu se díl v přípravku automaticky odepne a je možné jej vyjmout a nahradit

novým dílem. Přípravek pro pravou variantu vrtaného dílu je zobrazen na obr. 42, přičemž přípravek pro levou variantu je jeho zrcadlovým obrazem.



Obr. 42 Přípravek na upnutí dílu

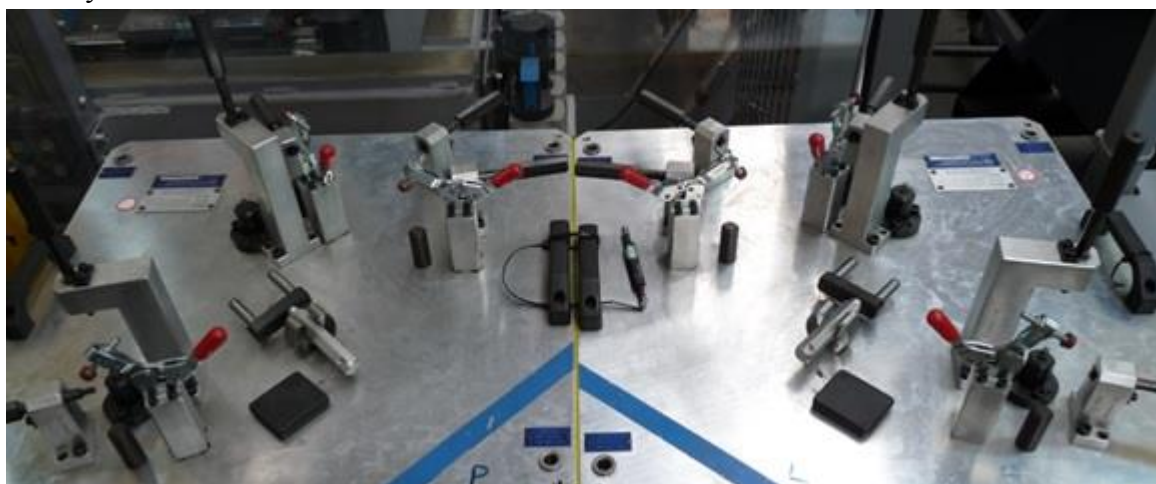
Vrtání všech otvorů je na tomto pracovišti prováděno stejným nástrojem, kterým je vrták GP UNI Ø 6,60 mm od společnosti PRECITOOL. Větší průměr vrtáku je použit z důvodu možnosti vrtat díry s průměrem o požadované toleranci i při mírném opotřebované nástroje. Materiál nástroje je jemný slinutý karbid s obsahem 10% kobaltu. Nástroj je potažen leštěným povlakem na bázi TiAlN, který je charakteristický svou černo-fialovou barvou. Ten je jedním z nejpoužívanějších materiálových povlaků a zajišťuje vysokou odolnost nástroje i při obrábění při vysoké teplotě, neboť je stabilní až do teploty 800°C. Díky tomu je možné obrábět i za sucha. Tvrdost povlaku se pohybuje v řádu 3000 HV. Volbou tohoto povlaku lze dosáhnout zhruba 25% nárůst produktivity oproti použití povlaku na bázi TiN. Na obr. 43 je zobrazen vrták GP UNI Ø 6,60 mm bez povlaku [40].



Obr. 43 Vrták GP UNI Ø 6,60 mm [40]

Délka šroubovice nástroje je rovna trojnásobku jeho průměru. Vrták má standardní geometrii s vrcholovým úhlem 140° a úhlem stoupání šroubovice 30-35°. K upnutí nástroje do vrtací hlavy je vrták zbroušen výbrusem FORM C. Dle doporučení výrobce je tento nástroj vhodný pro vrtání do oceli a litin [40].

Součástí operace vrtání je dle technologického postupu kontrola jednoho kusu za hodinu, která je prováděna na kontrolních přípravcích s kalibry, které jsou zobrazeny na obr. 44. Z obrázku je jasně patrné, že přípravky pro levý a pravý kus jsou zrcadlové obrazy. Kontrola probíhá tím způsobem, že se kontrolovaný kus uloží do přípravku, zajistí se mechanickými upínkami v požadované poloze a následně jsou pomocí kalibrů kontrolovány jednotlivé rozměry.



Obr. 44 Kontrolní přípravky s kalibry

3 POPIS VÝSLEDKŮ PŘI POUŽITÍ STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE

3.1 Analýza přesnosti vyvrtaných otvorů

Dosavadní používaná technologie pracuje s výše popsáním robotizovaným pracovištěm, kde je operace vrtání prováděna. Pracuje se s řeznými podmínkami doporučenými dodavatelem pracoviště, kterým je společnost KUSAG. Otáčky vřetene vrtací hlavy jsou 5500 min^{-1} s posuvem $240 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Již při vizuální kontrole vyvrtaných otvorů po ukončení vrtacího procesu panovalo podezření, že při použití stávající technologie



Obr. 45 Vyvrtaná díra

neodpovídají vyvrtané otvory požadované jakosti. Příklad vyvrtané díry na obvodu ohnutého dílu je na obr. 45. Výkres součásti, na kterém je možné vidět požadované tolerance otvorů je v příloze 2. Následná kontrola vyvrtaných dílů na přípravcích s kalibry podezření potvrdila, jelikož po upnutí dílu do přípravku nebylo možné kalibry vsunout do vyvrtaných otvorů.

První analýza jakosti vyvrtaných otvorů byla zaměřena na to, zda je mimo předepsanou toleranci pouze kruhovitost vyvrtaných otvorů, nebo zda je problém nejen v kruhovitosti, ale i v pozici středů. Tato kontrola byla provedena na 3D měřicím centru Carl Zeiss Eclipse, kterým je vybavena metrologická laboratoř společnosti. Ovládání měřicího centra je prováděno pomocí originálního softwaru Carl Zeiss Calypso. Samotné měření na tomto zařízení probíhá tak, že se v softwaru otevře model měřeného dílu a vyberou se požadované rozměry, které je na daném dílu potřeba proměřit. Měřicí centrum poté provede měření dílu položeného na pracovním stole a zobrazí výstup měření. V tomto případě byl výstup uložen ve formě protokolu, který je možné vidět v příloze 3. Měření bylo provedeno pro dané řezné podmínky na pěti kusech od každé stranové varianty. Pro zajímavost bylo měření provedeno i pro jiné řezné podmínky doporučené vedoucím technologického oddělení společnosti, které eliminovaly zvýšené riziko rychlého opotřebení nástroje z důvodu použití řezných podmínek s velmi malým posuvem na otáčku. Otáčky vřetene vrtací jednotky pro tyto podmínky byly 4500 s^{-1} s posuvem $650 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. S těmito podmínkami bylo vyvrtáno dalších pět kusů od každé stranové varianty. Výsledek měření levých dílů je možné vidět v tab. 2. Výsledky měření pravých variant jsou v tab. 3.

Tab. 2 Výsledek měření levých dílů

Levý díl			Naměřené odchylky v ose x										
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
1	15	0,2/0,2	0,18	0,17	0,21	0,25	0,19	0,02	-0,01	0,01	0,04	0,02	0,108
2	225,3	0,2/0,2	0,14	0,07	0,17	0,26	0,20	-0,02	-0,04	0,03	0,02	0,06	0,089
3	258	0,5/0,5	0,20	0,17	0,17	0,11	0,51	0,24	0,32	0,20	0,23	0,18	0,233
4	259,7	0,5/0,5	1,41	1,49	1,24	1,25	1,44	1,44	1,50	1,28	1,35	1,36	1,376
5	213,5	0,5/0,5	0,80	0,74	0,59	0,70	0,61	0,50	0,61	0,36	0,53	0,58	0,602
Levý díl			Naměřené odchylky v ose z										
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
3	12,5	0,4/0,4	0,50	0,55	0,49	0,59	0,54	0,73	0,82	0,82	0,75	0,71	0,650
4	12,5	0,4/0,4	0,36	0,45	0,38	0,49	0,42	0,44	0,43	0,47	0,43	0,47	0,434
5	12,5	0,4/0,4	0,11	0,18	0,15	0,19	0,16	0,08	0,09	0,10	0,09	0,13	0,128
Levý díl			Kruhovitost										
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
1	0	0,2/0	0,12	0,09	0,10	0,07	0,15	0,10	0,09	0,09	0,09	0,11	0,101
2	0	0,2/0	0,05	0,05	0,04	0,07	0,10	0,07	0,05	0,05	0,05	0,07	0,060
3	0	0,2/0	0,10	0,08	0,08	0,07	0,07	0,09	0,13	0,13	0,12	0,07	0,094
4	0	0,2/0	0,14	0,18	0,21	0,21	0,17	0,21	0,50	0,19	0,20	0,16	0,217
5	0	0,2/0	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,051

Tab. 3 Výsledek měření pravých dílů

Pravý díl			Naměřené odchylky v ose x										
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
1	213,5	0,5/0,5	0,85	0,31	0,66	0,84	0,84	0,65	0,81	0,63	-0,12	0,05	0,552
2	259,7	0,5/0,5	1,01	0,71	0,92	1,01	1,00	0,93	1,05	0,80	0,26	0,56	0,825
3	258	0,5/0,5	0,05	0,28	0,11	0,04	0,02	0,07	0,27	0,13	0,21	0,44	0,162
4	225,3	0,2/0,2	-0,19	-0,04	-0,20	-0,16	-0,16	-0,17	-0,10	-0,10	0,08	0,00	-0,104
5	15	0,2/0,2	-0,11	-0,01	-0,13	-0,09	-0,12	-0,19	-0,16	-0,17	-0,12	-0,12	-0,122
Pravý díl			Naměřené odchylky v ose z										
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
1	12,5	0,4/0,4	-0,23	-0,17	-0,20	-0,22	-0,33	-0,23	-0,25	-0,28	-0,22	-0,23	-0,236
2	12,5	0,4/0,4	0,10	-0,01	-0,06	-0,10	-0,10	-0,07	-0,06	-0,03	-0,01	-0,01	-0,035
3	12,5	0,4/0,4	-0,02	0,07	0,01	-0,01	0,04	0,21	0,21	0,18	0,25	0,27	0,121
Pravý díl			Kruhovitost										
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
1	0	0,2/0	0,12	0,08	0,08	0,07	0,08	0,07	0,06	0,05	0,06	0,04	0,071
2	0	0,2/0	0,18	0,18	0,17	0,19	0,18	0,26	0,21	0,35	0,26	0,20	0,218
3	0	0,2/0	0,17	0,15	0,22	0,21	0,20	0,31	0,14	0,14	0,09	0,08	0,171
4	0	0,2/0	0,06	0,08	0,06	0,05	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,03	0,065
5	0	0,2/0	0,05	0,05	0,04	0,07	0,10	0,07	0,05	0,05	0,05	0,07	0,060

Výsledek tohoto pokusu zcela nepotvrdil prvotní domněnku o nevyhovující kruhovitosti vyvrtaných otvorů. Naproti tomu se projevila značná nepřesnost pozic středů vyvrtaných otvorů. Jak je patrné z tabulek naměřených úchylek rozměrů, nepřesnosti se vyskytují zejména u některých otvorů nacházejících se po obvodu obrobku. Z naměřených hodnot lze rovněž vyčíst, že nepřesnosti převažují v jedné ose. Tento výsledek může nastat z několika důvodů.

- Jednou z možných příčin může být ta, kdy se při působení řezných sil při vrtání vymezí vůle v jednotlivých kinematických dvojicích ramene průmyslového robotu a při provrtání dílu dojde k uvolnění odporu a následnému trhavému pohybu ramene, který vede ke zhoršení jakosti vyvrtaného otvoru.
- Další možná příčina je ta, že rameno průmyslového robotu najede do požadované pozice pro vrtání daného otvoru, ale při samotném vrtacím procesu se pohybuje po trajektorii, která není přesně kolmá k povrchu obrobku.
- Další možnou příčinou nejakosti vyvrtaných otvorů je možnost, že ramena průmyslových robotů nenajedou přesně do předepsané pozice, což má za následek vyvrtání otvoru na jiné pozici, než je předepsaná na příslušném technickém výkresu.

3.2 Zkoušky přesnosti najetí robotu na pozici

Z důvodu několika možných příčin nejakosti vyvrtaných otvorů, které jsou popsány výše, bylo nutné navrhnout a zrealizovat zkoušky, které by bezpečně odhalily, jak průběh vrtacího procesu souvisí s jakostí vyvrtaných děr.

První zkouška byla zaměřena na přesnost samotného vrtacího procesu, respektive zda pozice vyvrtaného otvoru souhlasí s pozicí najetí robotu. Návrh zkoušky počítal s výrobou zkušebního trnu, kterým by se po vyvrtání otvorů do dílu kontrolovala pozice těchto děr. Kontrola by poté probíhala tím způsobem, že by se po vyvrtání vyměnil nástroj ve vrtací hlavě za zkušební trn, který by měl stejný průměr jako vyvrtané otvory, a pomocí možnosti spuštění programu robotu krok po kroku by postupně docházelo k najíždění na výchozí pozice pro vrtání jednotlivých otvorů. Po najetí na pozici dojde k zastavení robotu, povolení zkušebního trnu ve vrtací hlavě a následnému vysunutí trnu z vrtací hlavy až do té míry, než ke kontaktu s obrobkem. Následně dojde k utažení zkušebního trnu ve vrtací hlavě, aby se zamezilo nepřesnosti zkoušky z důvodu nevymezení vůlí mezi povoleným trnem a upínacím mechanismem nástroje ve vrtací hlavě robotu. Po utažení upínacího mechanismu probíhala samotná kontrola přesnosti pozice vyvrtaného otvoru, a to tím způsobem, že se kontrolovalo, zda zkušební trn přesně lícuje s vyvrtaným otvorem. Realizace této zkoušky začala výrobou zkušebního trnu, který je zobrazen na obr. 46. Ta proběhla na oddělení údržby společnosti



Obr. 46 Zkušební trn

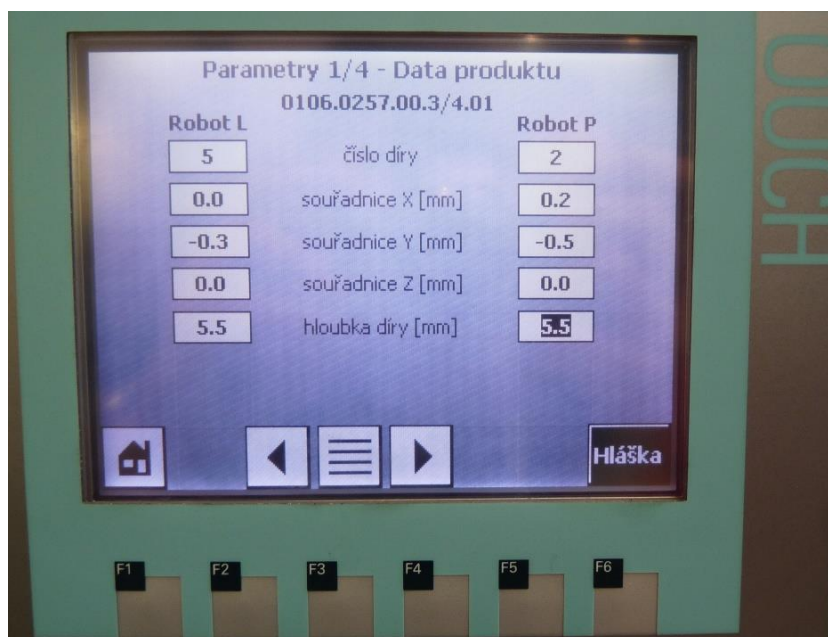
na univerzálním hrotovém soustruhu. Při výrobě bylo důležité zejména to, aby byly dodrženy požadavky na malý průměr konce trnu a ostrou hranu čela. Poté následovalo upnutí zkušebního obrobku do přípravku a jeho vyvrtání. Po vyvrtání proběhla výměna standartního nástroje za zkušební trn a spuštění programu robotu krok po kroku.

Výsledek této zkoušky potvrdil domněnku, že během samotného vrtacího procesu dojde k vychýlení ramene průmyslového robotu z ideální požadované dráhy. Toto má za následek nepřesnost pozice vyvrtaného otvoru, což se při provedení zkoušky prokázalo tím, že zkušební trn s vyvrtanými otvory přesně nelícoval. Příklad takového stavu pro jeden z vyvrtaných otvorů na levé variantě obrobku je na obr. 47. Vzhledem k nedostatku prostoru



Obr. 47 Výsledek pokusu s trnem

v zadní části pracovní plochy nebylo možné tuto zkoušku provést pro všechny vyvrtané otvory na obou stranových variantách obrobků, ovšem je možné vznést předpoklad, že výsledek by byl u neozkoušených otvorů obdobný. Z důvodu nedostatku prostoru rovněž nebylo možné přesně změřit odchylku osy vyvrtaného otvoru s osou zkušebního trnu. Tato odchylka byla odhadem stanovena na několik desetin milimetru.

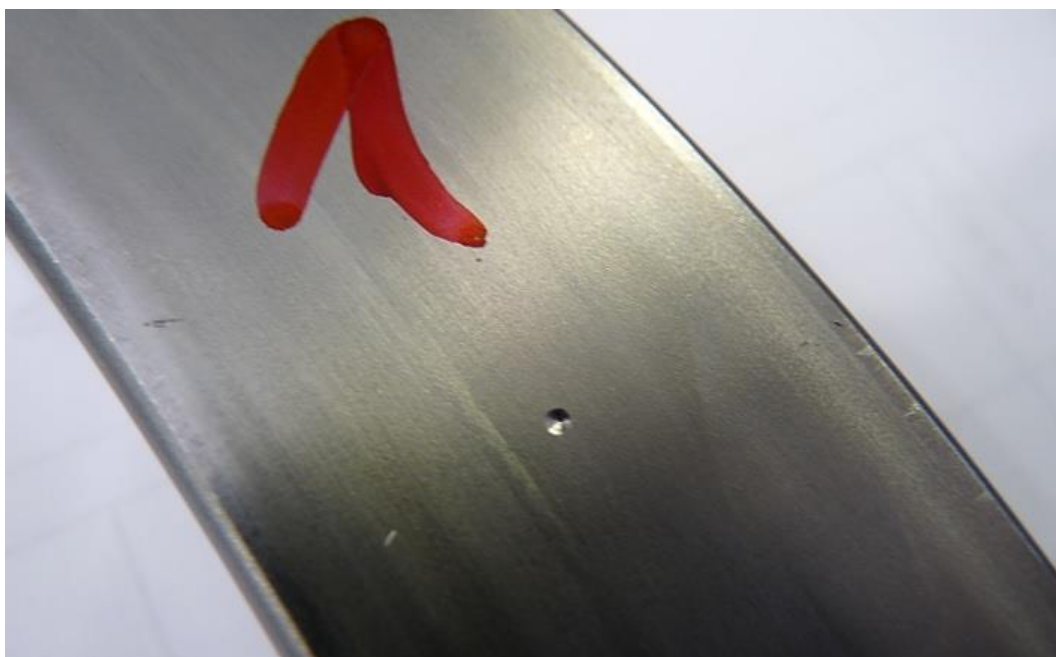


Obr. 48 Ovládací panel robotů

Druhá navržená zkouška měla za cíl ukázat, s jakou přesností robotické rameno najíždí na požadovanou pozici k vrtání daného otvoru. V tomto případě byl návrh takový, že se pomocí úpravy vrtacího programu docílí toho, že při samotném vrtacím procesu nedojde k vyvrtání průchozí díry, ale pouze k označení místa jejího středu navrtáním co nejmenšího důlku. Po 3D skenování takto navrtaných obrobků by bylo možné s dostatečnou přesností stanovit pozici těchto důlků a porovnat ji s pozicí vyvrtaných děr u dříve vrtaných kusů. Samotná realizace tohoto pokusu byla provedena tak, že se na ovládacím panelu obou robotů



Obr. 49 Průběh navrtávání

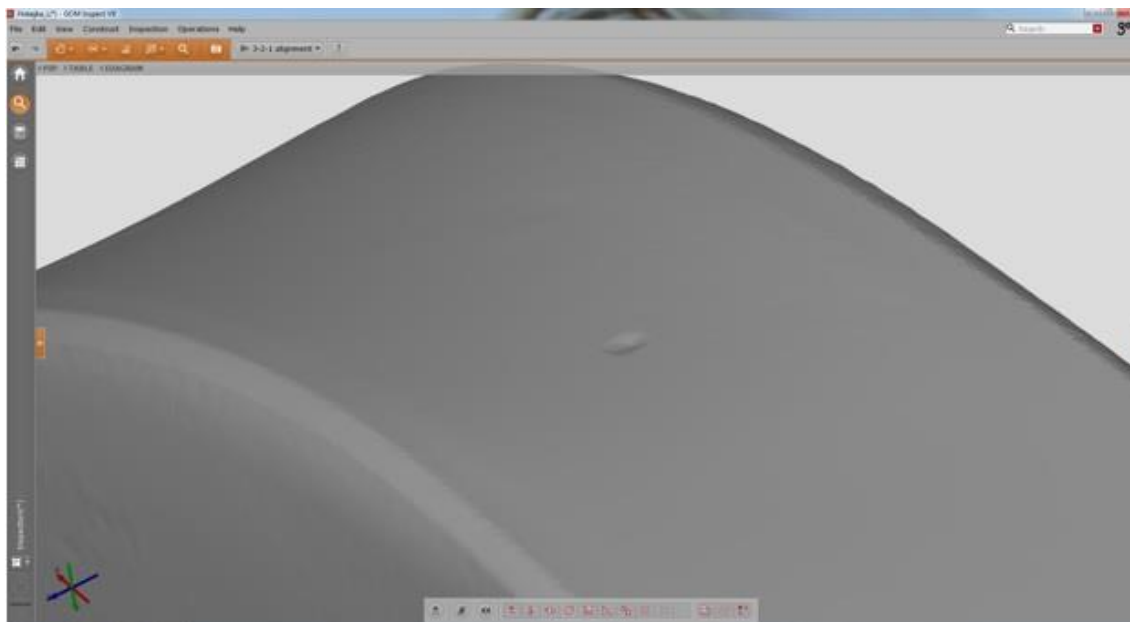


Obr. 50 Navrtaný důlek

měnilo do jaké hloubky je potřeba vrtat. Toto probíhalo pro každou díru zvlášť a příklad nastavování hodnoty hloubky díry je na obr. 48.

Výsledkem části pokusu realizované ve společnosti byly dva navrtné obrobky, a to jeden od každé stranové varianty. Ukázka samotného průběhu navrtávání je na obr. 49. Navrtávání probíhalo klasickým nástrojem, jelikož středící vrták nebylo možné do vrtací hlavy upnout. Navrtný střed jedné z děr je možné vidět na obr. 50. Pro přehlednost byly všechny navrtné otvory označeny pořadovým číslem příslušné díry.

Následující část tohoto pokusu byla provedena v prostorách Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Navrtné vzorky bylo v první řadě potřeba připravit na 3D skenování. Nejprve byly vhodně polepeny kontrastními body. Při lepení bodů na díly bylo třeba dbát na to, aby byly rovnoměrně rozloženy po celé ploše, kterou bylo zamýšleno skenovat. Následně byly již polepené zkušební vzorky nastříkány práškem určeným k maximální redukci světelného odrazu. Po nástřiku prášku na vzorky bylo potřeba od něj očistit kontrastní body. Toto očištění proběhlo pomocí vatové tyčinky. V průběhu přípravy vzorků probíhala kalibrace 3D skeneru ATOS. Ten byl nakonec kalibrován na přesnost skenování 0,023 mm. Po kalibraci skeneru byl první zkušební vzorek upnut do svěráku a bylo zahájeno skenování, které probíhalo ručním nastavováním úhlů pohledu skeneru a následného potvrzování jednotlivých snímků. Po kompletním oskenování obou zkušebních vzorků byla získaná data zpracovávána pomocí programu GOM Inspect. Samotné skenování se zdařilo, neboť již při zběžném prohlédnutí naměřených dat byly jasně patrné navrtné důlky na jednotlivých vzorcích. Zobrazení naskenovaného důlku v programu GOM Inspect je na obr. 51.



Obr. 51 Naskenovaný důlek

Zpracování naměřených dat zaměřené na získání požadovaných hodnot bylo zahájeno ustavením naskenovaného dílu do vhodného souřadnicového systému, který byl reprezentován ideální rovinou, přímkou a nulovým bodem. Ideální rovina byla zkonstruována proložením jedné roviny na naskenovaném dílu rovinou tak, aby výsledná rovina měla od naskenovaného dílu co nejmenší odchylku. Souřadnicový systém bylo nutné

nastavit tím způsobem, aby byl shodný se souřadnicovým systémem obrobní, který je zaveden při jeho měření ve společnosti. Samotné proměření naskenovaného dílu probíhalo



Obr. 52 Porovnání skenu s CAD modelem

tím způsobem, že se jednotlivými důlky proložily kužely, které nejlépe zachycovaly tvar důlků a přesnou pozici jejich středů. Po této operaci následovalo proměření středů důlků v těch souřadnicích, ve kterých je měření prováděno v praxi. Další část zpracování dat měla ukázat vizuální rozdílnost polohy vyvrtaných otvorů a navrtaných důlků. Toho bylo dosaženo tak, že se naskenovaný model porovnal s 3D modelem vyvrtaného dílu. Toto porovnání je, pro jednu z děr na pravé stranové variantě dílu, zobrazené na obr. 52. Je zde na první pohled patrné, že poloha středu díry na CAD modelu není shodná s polohou středu navrtaného důlku na oskenovaném zkušebním vzorku. To potvrzuje domněnku, že rameno průmyslového robotu při provádění programu nenajede na požadovanou pozici, ale že vrtací proces začíná na pozici, která není předepsána na technickém výkresu daného dílu.

Naměřené hodnoty získané z naskenovaných dat a jejich porovnání s hodnotami předepsanými na výkresu vypsány jsou níže. V tab. 4 jsou hodnoty pro levou stranovou variantu. Hodnoty pro pravou stranovou variantu jsou v tab. 5. Jak je z daných hodnot patrné, hodnoty naměřené na naskenovaných vzorcích se od požadovaných hodnot značně odlišují. Odchylka je významná i při porovnání zde naměřených hodnot s hodnotami získanými první analýzou přesnosti vrtání provedenou ve společnosti za použití 3D měřicí sondy.

Tab. 4 Hodnoty získané skenováním levého kusu

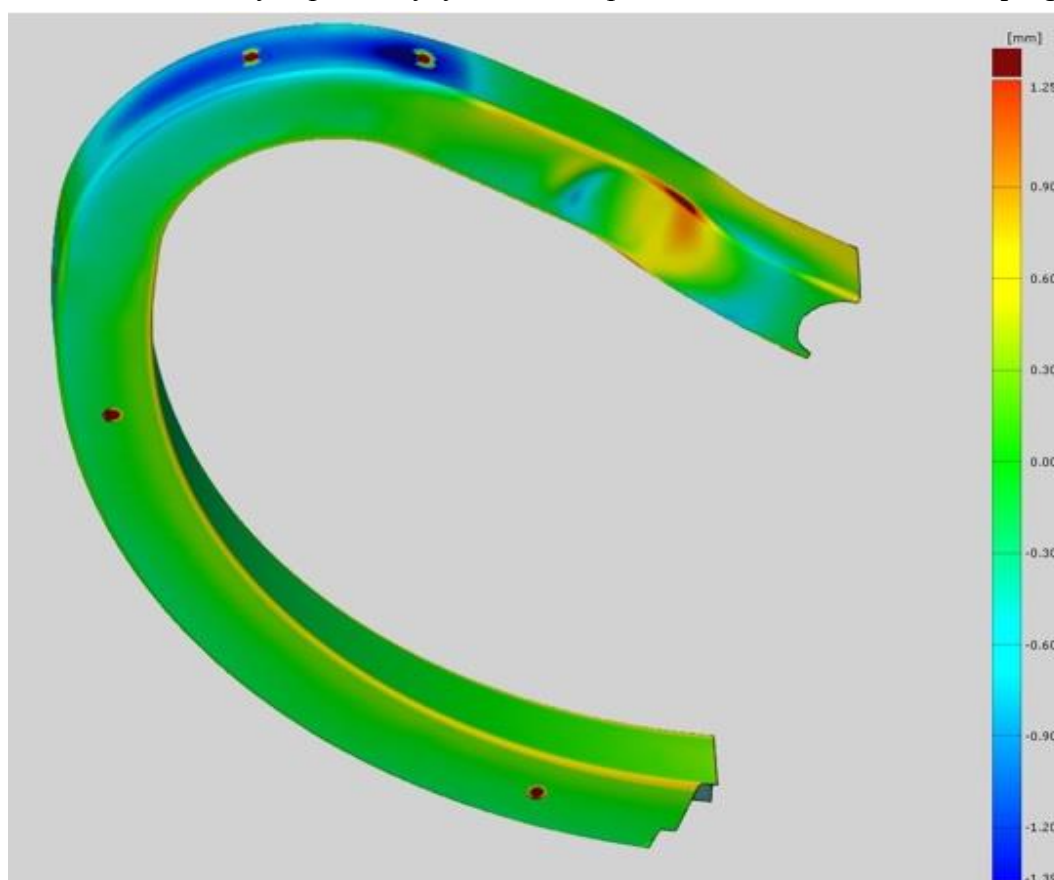
číslo díry	nominální hodnota	naskenovaná hodnota	odchylka	tolerance
1	15	15,19	0,19	0,2
2	225,3	225,55	0,25	0,2
3	-258	-257,95	0,05	0,5
4	-259,7	-258,69	1,01	0,5
5	-213,5	-212,84	0,66	0,5

Tab. 5 Hodnoty získané skenováním pravého kusu

číslo díry	nominální hodnota	naskenovaná hodnota	odchylka	tolerance
1	-213,5	-211,55	1,95	0,5
2	-259,7	-257,29	2,41	0,5
3	-258	-257,03	0,97	0,5
4	225,3	225,43	0,13	0,2
5	15	15,07	0,07	0,2

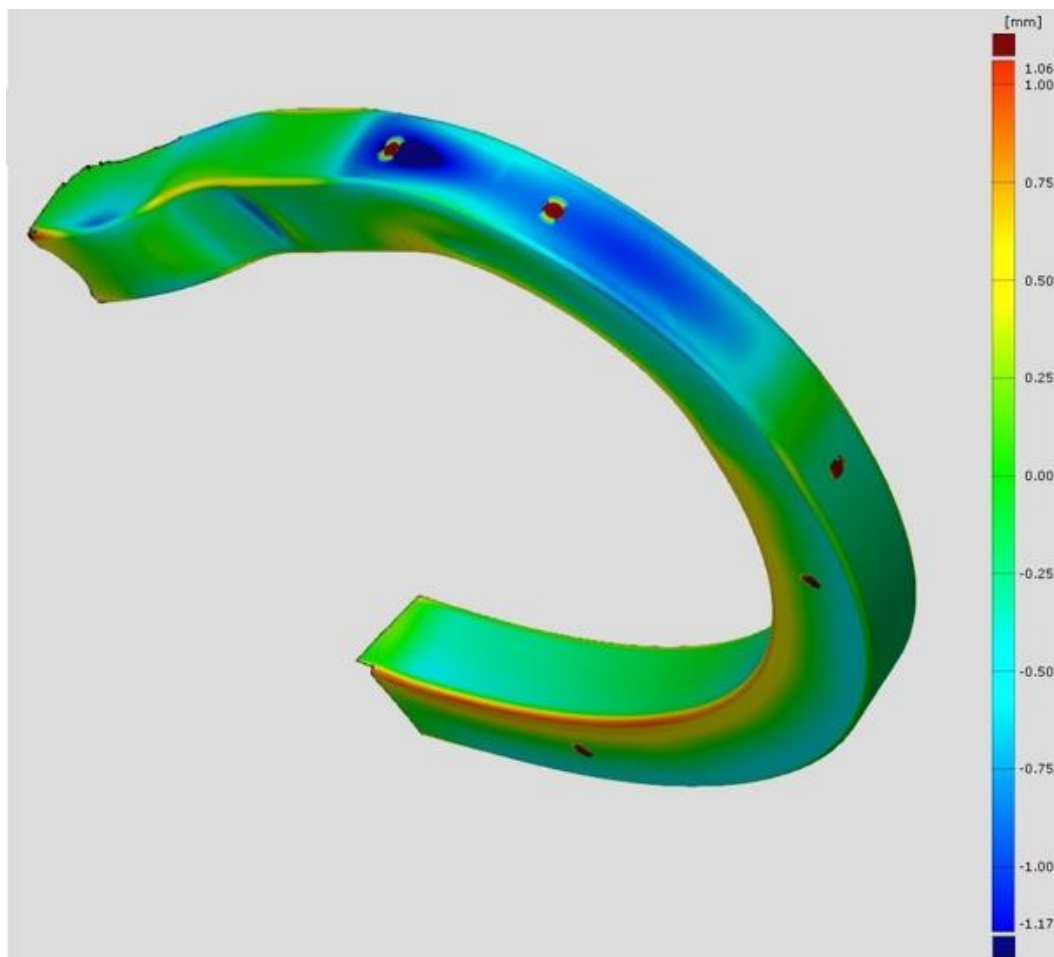
3.3 Porovnání vzorků s CAD modely

Dále bylo provedeno porovnání tvaru naskenovaných vzorků s jejich CAD modely. Při této analýze byly zvoleny takové uzlové body, které odpovídají uložení dílů v přípravku při vrtací operaci. Vazba mezi CAD modelem a naskenovaným vzorkem tedy proběhla přes středy předvrtaných děr, za které se díly usazují do přípravků, a pomocí roviny, ve které jsou tyto díry vyvrtány a na níž díly ve vrtacím přípravku dosedají. Při použití vazby, která zkušební vzorek porovnávala s příslušným CAD modelem tak, aby vznikaly co nejmenší odchylky, byl výsledek odlišný. Byla však použita varianta předchozí, neboť více odpovídala skutečnému způsobu použití dílu při ukládání do přípravku. Tato analýza ukázala, že díly přicházející na vrtací operaci jsou svým tvarem výrazně odlišné od požadovaného stavu. Výstup z analýzy deformací pravého zkušebního vzorku v programu



Obr. 53 Deformace pravého dílu

GOM Inspect je možné vidět na obr. 53. Je zde zobrazen v barevném spektru, které je určeno velikostí odchylky zkušebního vzorku od příslušného CAD modelu. Jak je možné vidět, v oblasti největších deformací na vnějším obvodu se nachází dva z otvorů vrtaných robotem. Výstup z analýzy pravého zkušebního vzorku je možná vidět na obr. 54.



Obr. 54 Deformace levého dílu

Vzhledem k charakteru deformací zjištěných pomocí 3D skenování zkušebních vzorků a následnému porovnání s CAD modely lze dojít k závěru, že jsou tyto deformace způsobeny při jedné z předešlých výrobních operací, kterou je ohýbání. Charakter deformací těchto odpovídá vadám, které při ohýbacím procesu hrozí. Je zde možné pozorovat odchylku od požadovaného úhlu ohnutí, která je s největší pravděpodobností způsobena odpružením po ohnutí. Dále je možné pozorovat výraznou deformaci na vnějším obvodu ohýbaného profilu, která je způsobena rovněž při ohýbání, a to z toho důvodu, že profil není dostatečným způsobem podporován výplní a dochází k jeho částečnému zborcení. Nedostatečná výplň profilu při ohýbání je způsobena tím, že při ohýbání těchto profilů s výplní ve formě článkového trnu docházelo, kvůli přílišnému ztenčení materiálu, ke vzniku trhlin na vnějším obvodu profilu. Z tohoto důvodu se nyní používá pouze částečné výplně ve formě zkráceného článkového trnu. Zborcení profilu směrem dovnitř je způsobeno absencí výplně při ohýbacím procesu a tím, že deformace profilu směrem ven je blokována použitým nástrojem při ohýbání, který pevně obepíná tvar profilu a tudíž zabraňuje jakékoli deformaci v tomto směru.

4 NÁVRH NOVÉ TECHNOLOGIE

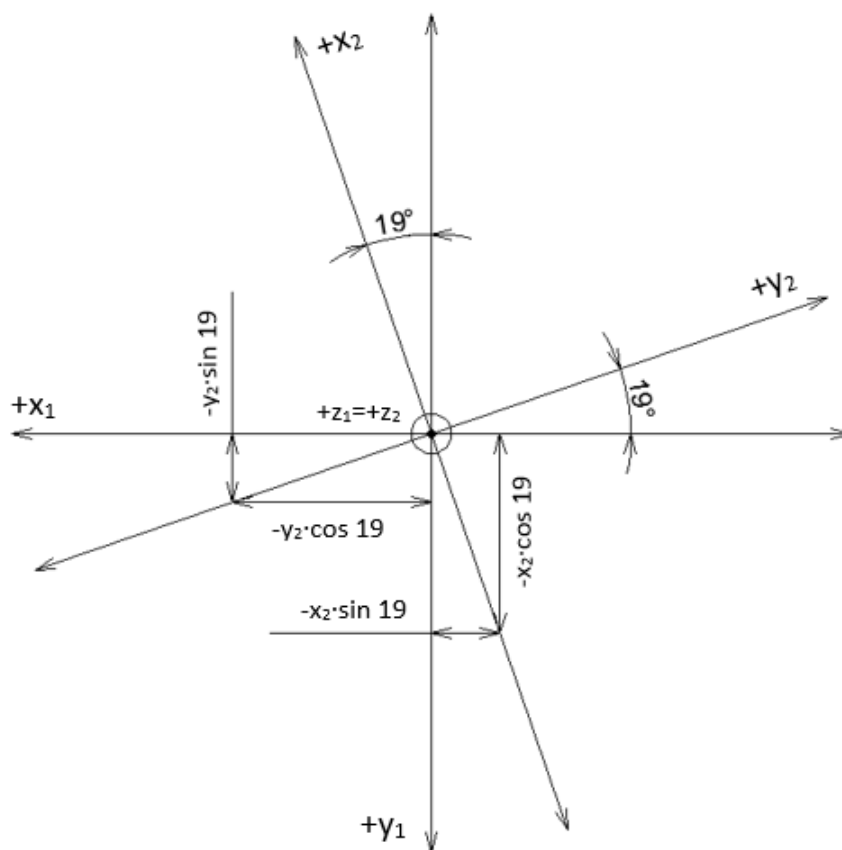
Z hlediska toho, že při použití stávající technologie není výsledná jakost produkce v souladu s požadavky předepsanými na technickém výkresu součásti, bylo potřeba navrhnout její úpravu. Jelikož jsou odchylky od požadovaných rozměrů systematické, jeví se jako nejjednodušší řešení úprava programu robotu.

4.1 Výpočet korekcí programu

Při výpočtu korekcí je v první řadě potřeba identifikovat souřadnicové systémy průmyslových robotů a porovnat je se souřadnicovými systémy obráběných dílů upnutých v příslušných přípravcích. Souřadnicový systém robotů byl zjištěn tím způsobem, že se pomocí ovládacích panelů postupně pojíždělo v kladných směrech jednotlivých os. Po identifikaci směrů pohybů byly zakresleny dané souřadnicové systémy. Souřadnicový systém obrobků byl identifikován z příslušných přípravků, kde byl zakreslen jejich konstruktérem. Z důvodu rozdílnosti souřadnicových systémů robotů a obrobků uchycených v přípravcích bylo nutné provést transformaci. Souřadnicový systém se navíc u obou robotů liší, tudíž byla nutná transformace souřadnicových systémů obou obrobků.

4.1.1 Korekce pro levý díl

Na obr. 55 jsou zakresleny souřadnicové systémy levého dílu a příslušného průmyslového robotu. Souřadnicový systém robotu je na obrázku označen dolním indexem 1, a souřadnicový systém obrobku dolním indexem 2.



Obr. 55 Souřadnicové systémy pro levý díl

Výpočet přepočítaných hodnot v jednotlivých osách poté probíhal pomocí vzorců uvedených níže, které byly získány tak, že se vzdálenosti udané v souřadnicovém systému obrobku převedly do souřadnicového systému průmyslového robotu aplikováním goniometrických funkcí.

$$x_{1l} = x_{2l} \cdot \sin 19 - y_{2l} \cdot \cos 19 \quad (4.1)$$

$$y_{1l} = -x_{2l} \cdot \cos 19 - y_{2l} \cdot \sin 19 \quad (4.2)$$

$$z_{1l} = z_{2l} \quad (4.3)$$

Aplikací těchto vzorců na odchylky pozic jednotlivých děr byly získány souřadnice přepočítané do souřadnicového systému robotu.

- Přepočet pro díru číslo 5

$$x_{1l} = x_{2l} \cdot \sin 19 - y_{2l} \cdot \cos 19 = 0,6 \cdot \sin 19 - 0 \cdot \cos 19 = 0,195 \text{ mm} \quad (4.4)$$

$$y_{1l} = -x_{2l} \cdot \cos 19 - y_{2l} \cdot \sin 19 = -0,6 \cdot \cos 19 - 0 \cdot \sin 19 = -0,567 \text{ mm} \quad (4.5)$$

$$z_{1l} = z_{2l} = 0,13 \text{ mm} \quad (4.6)$$

- Přepočet pro díru číslo 4

$$x_{1l} = x_{2l} \cdot \sin 19 - y_{2l} \cdot \cos 19 = 1,38 \cdot \sin 19 - 0 \cdot \cos 19 = 0,449 \text{ mm} \quad (4.7)$$

$$y_{1l} = -x_{2l} \cdot \cos 19 - y_{2l} \cdot \sin 19 = -1,38 \cdot \cos 19 - 0 \cdot \sin 19 = -1,305 \text{ mm} \quad (4.8)$$

$$z_{1l} = z_{2l} = 0,43 \text{ mm} \quad (4.9)$$

- Přepočet pro díru číslo 3

$$x_{1l} = x_{2l} \cdot \sin 19 - y_{2l} \cdot \cos 19 = 0,23 \cdot \sin 19 - 0 \cdot \cos 19 = 0,075 \text{ mm} \quad (4.10)$$

$$y_{1l} = -x_{2l} \cdot \cos 19 - y_{2l} \cdot \sin 19 = -0,23 \cdot \cos 19 - 0 \cdot \sin 19 = -0,217 \text{ mm} \quad (4.11)$$

$$z_{1l} = z_{2l} = 0,65 \text{ mm} \quad (4.12)$$

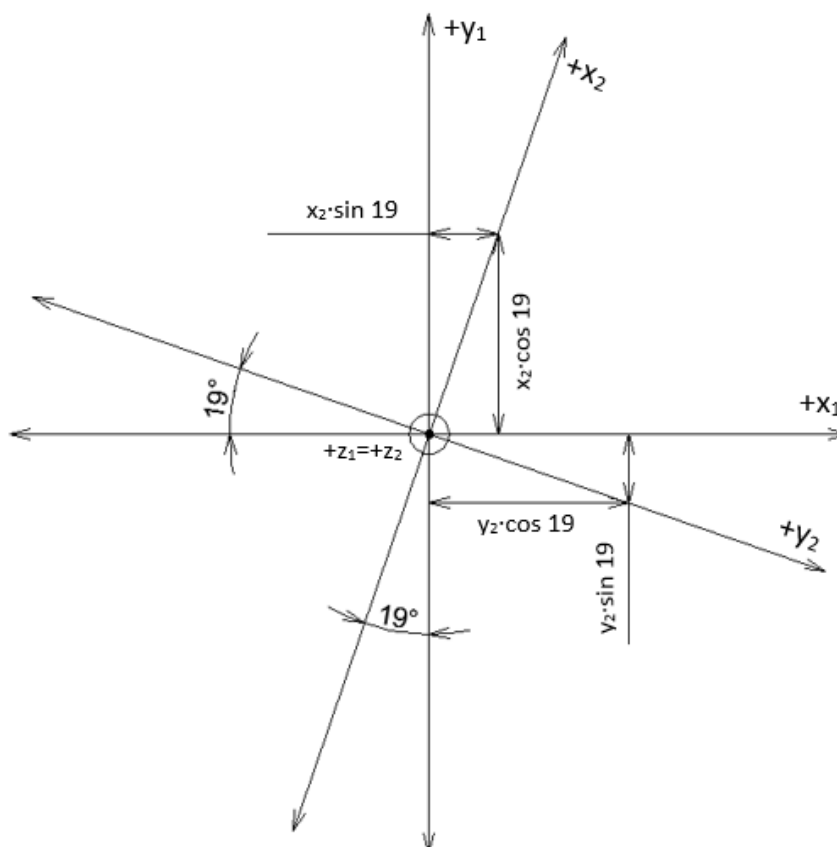
Z těchto přepočítaných souřadnic se potřebné korekce programu stanoví tím způsobem, že se u jednotlivých hodnot změní znaménko. Z toho důvodu, že na ovládací panel lze zapisovat hodnoty pouze s jedním desetinným místem, byly i hodnoty korekcí zaokrouhleny. Korekce programu pro levý díl, navržené tímto způsobem, jsou v tab. 6.

Tab. 6 Korekce pro levý díl

	Korekce v jednotlivých osách		
Číslo díry	x	y	z
5	-0,2	0,6	-0,1
4	-0,5	1,3	-0,4
3	-0,1	0,2	-0,7

4.1.2 Korekce pro pravý díl

Korekce programu pro pravý díl byly stanoveny obdobným způsobem jako v případě levého dílu. Nejprve byly identifikovány souřadnicové systémy příslušného průmyslového robotu a pravého dílu. Tyto souřadnicové systémy jsou zakresleny na obr. 56, přičemž osy souřadnicového systému robotu jsou označeny dolním indexem 1, a souřadnicový systém obrobku dolním indexem 2.



Obr. 56 Souřadnicové systémy pro pravý díl

Po porovnání jednotlivých souřadnicových systémů následovalo sestavení vzorců pro výpočet přepočítaných hodnot v jednotlivých osách. Vzorce, kterých bylo použito, jsou vypsány níže.

$$x_{1p} = y_{2p} \cdot \cos 19 + x_{2p} \cdot \sin 19 \quad (4.13)$$

$$y_{1p} = x_{2p} \cdot \cos 19 - y_{2p} \cdot \sin 19 \quad (4.14)$$

$$z_{1p} = z_{2p} \quad (4.15)$$

Po aplikování těchto vzorců na příslušné odchylky zjištěné měřením na 3D měřicím centru byly tyto odchylky transformovány do souřadnicového systému daného robotu.

- Přepočet pro díru číslo 1

$$x_{1p} = x_{2p} \cdot \sin 19 + y_{2p} \cdot \cos 19 = 0,55 \cdot \sin 19 + 0 \cdot \cos 19 = 0,179 \text{ mm} \quad (4.16)$$

$$y_{1p} = x_{2p} \cdot \cos 19 - y_{2p} \cdot \sin 19 = 0,55 \cdot \cos 19 - 0 \cdot \sin 19 = 0,52 \text{ mm} \quad (4.17)$$

$$z_{1p} = z_{2p} = -0,24 \text{ mm} \quad (4.18)$$

- Přepočet pro díru číslo 2

$$x_{1p} = x_{2p} \cdot \sin 19 + y_{2p} \cdot \cos 19 = 0,83 \cdot \sin 19 + 0 \cdot \cos 19 = 0,27 \text{ mm} \quad (4.19)$$

$$y_{1p} = x_{2p} \cdot \cos 19 - y_{2p} \cdot \sin 19 = 0,83 \cdot \cos 19 - 0 \cdot \sin 19 = 0,785 \text{ mm} \quad (4.20)$$

$$z_{1p} = z_{2p} = -0,04 \text{ mm} \quad (4.21)$$

- Přepočet pro díru číslo 3

$$x_{1p} = x_{2p} \cdot \sin 19 + y_{2p} \cdot \cos 19 = 0,16 \cdot \sin 19 + 0 \cdot \cos 19 = 0,052 \text{ mm} \quad (4.22)$$

$$y_{1p} = x_{2p} \cdot \cos 19 - y_{2p} \cdot \sin 19 = 0,16 \cdot \cos 19 - 0 \cdot \sin 19 = 0,151 \text{ mm} \quad (4.23)$$

$$z_{1p} = z_{2p} = 0,12 \text{ mm} \quad (4.24)$$

Změnou znaménka těchto vypočítaných hodnot byly stanoveny hodnoty korekcí programu pro pravou stranovou variantu obráběného dílu. Rovněž byly korekce zaokrouhleny na jedno desetinné místo, aby je bylo možné vložit do programu přes ovládací panel robotu. Hodnoty korekcí jsou v tab. 7.

Tab. 7 Korekce pro pravý díl

Číslo díry	Korekce v jednotlivých osách		
	x	y	z
1	-0,2	-0,5	0,2
2	-0,3	-0,8	0
3	0,1	-0,2	-0,1

4.2 Výsledek měření po aplikaci korekcí

Po aplikaci výše navržených korekcí programu bylo obrobena 7 kusů od každé stranové varianty součásti. Takto obrobené díly byly následně předány na oddělení kvality, kde proběhlo změření požadovaných rozměrů. K měření bylo znovu využito 3D měřicí centrum Carl Zeiss Eclipse. Přehled odchylek v jednotlivých osách obrobku změřených po aplikaci korekcí je pro levý díl v tab. 8. Stejně parametry pro pravé varianty jsou v tab. 9.

Tab. 8 Naměřené odchylky levých dílů

Levý díl			Naměřené odchylky v ose x							
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	Průměr
1	15	0,2/0,2	-0,742	-0,656	-0,705	-0,654	-0,688	-0,674	-0,713	-0,690
2	225,3	0,2/0,2	-1,158	-1,006	-1,185	-1,133	-1,115	-1,143	-1,153	-1,128
3	258	0,5/0,5	0,146	0,176	0,256	0,228	0,307	0,192	0,226	0,219
4	259,7	0,5/0,5	0,981	0,197	0,982	0,894	0,953	0,937	0,876	0,831
5	213,5	0,5/0,5	0,766	0,248	0,635	0,533	0,503	0,663	0,527	0,554
Levý díl			Naměřené odchylky v ose z							
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	Průměr
3	0	0,4/0,4	-0,104	-0,023	-0,054	-0,096	-0,038	-0,021	-0,013	-0,050
4	0	0,4/0,4	0,073	0,110	0,015	0,069	0,041	0,032	0,028	0,052
5	0	0,4/0,4	0,012	0,034	0,025	0,028	0,017	0,023	-0,019	0,014

Tab. 9 Naměřené odchylky pravých dílů

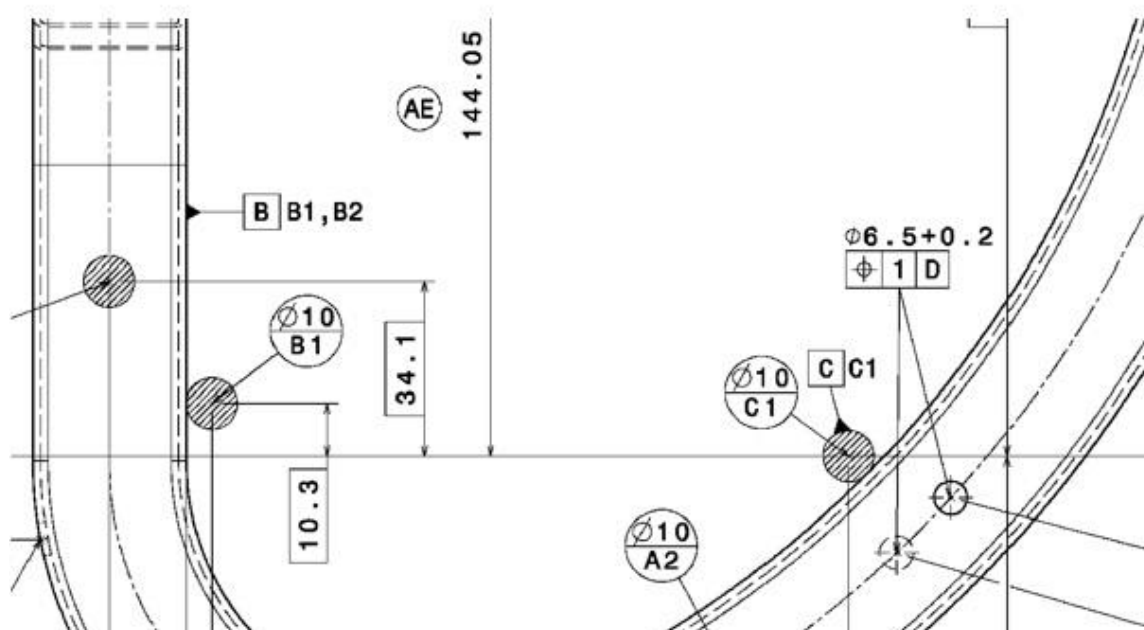
Pravý díl			Naměřené odchylky v ose x							
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	Průměr
1	213,5	0,5/0,5	0,597	0,321	0,424	0,256	0,349	0,478	0,589	0,431
2	259,7	0,5/0,5	1,344	0,943	1,134	0,649	0,955	1,199	1,146	1,053
3	258	0,5/0,5	0,367	0,325	0,244	0,243	0,311	0,165	0,085	0,249
4	225,3	0,2/0,2	0,977	1,078	1,046	1,080	1,076	1,053	1,078	1,055
5	15	0,2/0,2	0,395	0,487	0,482	0,500	0,516	0,405	0,408	0,456
Pravý díl			Naměřené odchylky v ose z							
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	Průměr
1	0	0,4/0,4	-0,115	-0,036	-0,012	-0,081	-0,053	-0,027	-0,012	-0,048
2	0	0,4/0,4	0,059	-0,112	-0,059	0,004	-0,064	-0,021	-0,086	-0,040
3	0	0,4/0,4	-0,016	0,038	0,103	0,044	0,026	-0,054	0,042	0,026

Jak je patrné z naměřených hodnot odchylek středů děr v ose z, úprava programu robotů zavedením korekcí se v tomto případě zdařila. Z tohoto důvodu už v dalších částech nebudou odchylky v ose z měřeny. Naproti tomu změna odchylek pozic středů děr měřená v ose x neodpovídá změnám, které byly očekávány při navrhování korekcí.

4.3 Systém měření na 3D měřicím centru

Jak je patrné z dat získaných měření na 3D měřicí sondě, aplikace výše vypočítaných korekcí nepřinesla požadované výsledky. Proto bylo nutné provést analýzu možných příčin, proč tento stav nastal. Při kontrole měřicího postupu na 3D měřicím centru byla zjištěna možná příčina těchto nesrovnalostí.

Měření na 3D centru probíhalo tím způsobem, že se nejprve měřený vzorek umístil do pracovního prostoru sondy tak, že se volně položil na magnetickou desku stolu. Při tomto uložení leží díl na magnetické desce rovinou, ve které jsou vyvrtané díry, za které se díl usazuje do přípravku při vrtací operaci. Následně je pomocí sondy identifikována základna B. Její pozici na zkušební vzorku je možné vidět na výřezu z technického výkresu dílu na obr. 57. Poslední stupeň volnosti je zkušebnímu vzorku odebrán tím způsobem, že dojde k najetí na pozici kolíku přípravku C, který je na obrázku rovněž zobrazen. Právě v této části nastává problém, jelikož při operaci obrábění, která přímo předchází vrtací operaci, je pomocí tohoto kolíku obráběný díl ustaven. Ovšem při měření je pozice tohoto kolíku zaznamenána pouze virtuálně pomocí vzdáleností předepsaných na výkresu. Z hlediska toho, že jsou jednotlivé díly deformované, jak bylo zjištěno pomocí porovnání naskenovaného vzorku s příslušným CAD modelem, zde vzniká nesrovnalost. Na technickém výkresu jsou jednotlivé díry vrtané robotem zakótované od jedné z děr, za kterou se daný díl ustavuje do přípravku na vrtací operaci. Pozice této díry se však při stávajícím měřicím postupu nezaměřuje, ale je dopočítávána pomocí rozměrů předepsaných na výkresu. Pozice ostatních děr se zaměřují a příslušné kóty jsou poté dopočítávány. Tento systém měření ovšem nedokáže pracovat s deformací měřených dílů, jelikož poloha referenčního otvoru je vypočítána pro případ ideálního tvaru součásti. Vzhledem k tomu jsou takto naměřené rozměry zkreslené a nedokáží zachytit případnou změnu programu, jako bylo například nasazení navržených korekcí. Tento způsob měření je však v souladu s technickým výkresem součásti.

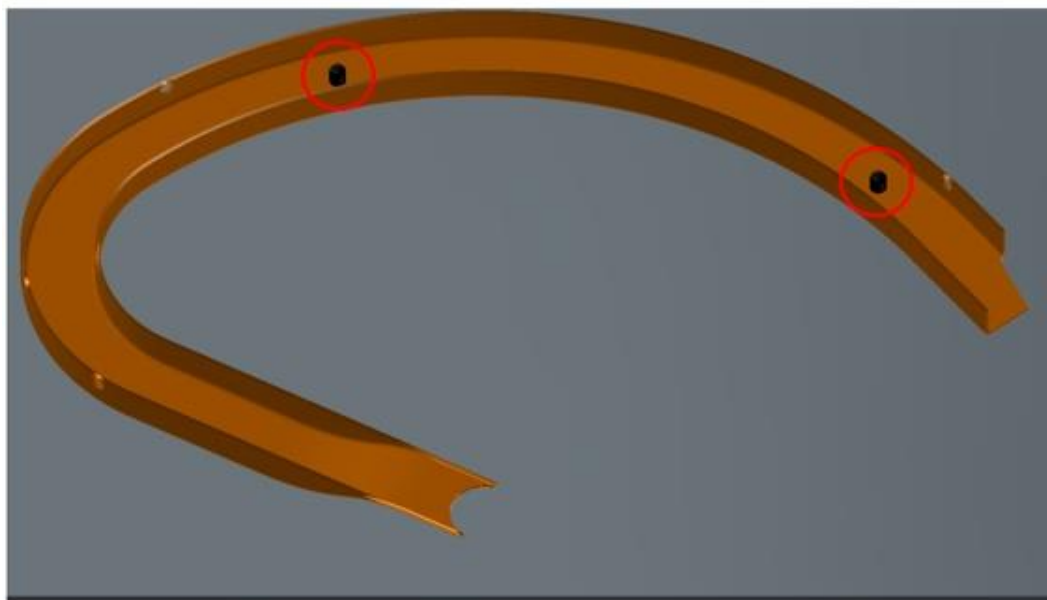


Obr. 57 Výřez technického výkresu dílu

4.4 Návrh nového měřicího postupu

Vzhledem k tomu, že měřicí postup předepsaný na technickém výkresu součásti nedokáže zcela zachytit přesnou pozici vyvrtaných otvorů, bylo nutné navrhnout nový měřicí postup, který by přesnou polohu těchto otvorů zachytil. Tento měřicí postup pracuje s novým přípravkem, na kterém budou měřené díly uloženy.

Nový měřicí postup pracuje tím způsobem, že se v prvním kroku zjistí přesná pozice otvoru, který je vrtán při operaci obrábění, a ke kterému jsou kótovány všechny díry vrtané v operaci vrtání. Toho se dosáhne tím způsobem, že sonda zaměří pozici jednoho kolíku na měřicím přípravku, na kterém bude měřený díl po celou dobu měření uložen. Po zaměření pozice tohoto kolíku se do přípravku usadí měřený díl. Díl je v přípravku uložen stejným způsobem, jako při operaci vrtání, tedy nasazen na dva kolíky, které zabraňují jakémukoli pohybu dílu při operaci. Při usazení na kolíky je celá plocha dílu podpírána základnou přípravku. Po usazení přípravku pokračuje nový měřicí postup tím, že se na měřeném dílu



Obr. 58 Uložení dílu v měřicím přípravku

identifikuje základna B předepsaná na jeho technickém výkresu. Následuje samotné měření pozic jednotlivých děr, jejichž kóty jsou poté sestaveny pomocí předem zjištěné pozice kolíku přípravku, který je zasazen v otvoru, ke kterému jsou ostatní díry kótovány. Tímto způsobem se účinně eliminuje nepřesnost měření způsobená deformací dílu způsobenou při ohýbání, kterou původní měřicí postup nezachytil. Trojrozměrný model měřicího přípravku, na kterém je na kolících uložena levá stranová varianta měřeného dílu, je na obr. 58. Na tomto obrázku je model měřeného dílu v řezu, aby byla zřetelná poloha kolíků, na kterých bude měřený díl uložen. Tyto kolíky jsou na obrázku zvýrazněny červeně. Přípravek je navržen tak, aby byl použitelný na obě stranové varianty dílu. Při uložení obou variant budou díly vždy plně podporované základnou přípravku.

4.4.1 Výsledek měření

Na základě výše uvedeného návrhu měřicího přípravku, na kterém bude probíhat měření dle nového měřicího postupu, byla navrtána a proměřena skupina dílů, které byly vrtány s programem upraveným navrženými korekcemi. Naměřené hodnoty odchylek jednotlivých otvorů spolu s příslušnými kruhovitostmi pro levé díly jsou v tab. 10. Hodnoty pro pravé díly jsou v tab. 11.

Tab. 10 Naměřené hodnoty pro levé díly

Levý díl			Naměřené odchylky v ose x							
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	Průměr
1	15	0,2/0,2	-0,228	-0,193	-0,260	-0,169	-0,160	-0,220	-0,286	-0,217
2	225,3	0,2/0,2	0,972	0,877	1,001	0,882	0,867	0,904	0,993	0,928
3	258	0,5/0,5	-0,444	-0,432	-0,445	-0,421	-0,430	-0,411	-0,434	-0,431
4	259,7	0,5/0,5	0,287	0,255	0,242	0,235	0,283	0,236	0,224	0,252
5	213,5	0,5/0,5	0,266	0,192	0,173	0,150	0,222	0,166	0,177	0,192
Levý díl			Kruhovitost							
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	Průměr
1	0	0,2/0	0,070	0,101	0,095	0,106	0,071	0,151	0,070	0,095
2	0	0,2/0	0,061	0,413	0,137	0,117	0,115	0,170	0,154	0,167
3	0	0,2/0	0,077	0,041	0,099	0,103	0,150	0,076	0,097	0,092
4	0	0,2/0	0,085	0,063	0,096	0,080	0,082	0,094	0,088	0,084
5	0	0,2/0	0,065	0,082	0,081	0,053	0,080	0,076	0,084	0,074

Tab. 11 Naměřené hodnoty pro pravé díly

Pravý díl			Naměřené odchylky v ose x							
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	Průměr
1	213,5	0,5/0,5	0,181	0,277	0,113	0,245	0,262	0,134	0,235	0,207
2	259,7	0,5/0,5	-0,007	0,021	-0,043	0,040	0,008	0,147	0,006	0,025
3	258	0,5/0,5	-0,189	-0,195	-0,148	-0,164	-0,140	-0,202	-0,179	-0,174
4	225,3	0,2/0,2	-1,230	-1,229	-1,224	-1,230	-1,273	-1,187	-1,259	-1,233
5	15	0,2/0,2	0,959	0,909	0,969	0,922	0,959	0,945	0,979	0,949
Pravý díl			Kruhovitost							
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	Průměr
1	0	0,2/0	0,074	0,083	0,177	0,088	0,060	0,089	0,072	0,092
2	0	0,2/0	0,062	0,087	0,098	0,115	0,070	0,259	0,047	0,105
3	0	0,2/0	0,147	0,134	0,196	0,152	0,123	0,151	0,139	0,149
4	0	0,2/0	0,084	0,089	0,105	0,109	0,084	0,093	0,087	0,093
5	0	0,2/0	0,084	0,081	0,081	0,068	0,069	0,079	0,105	0,081

Z naměřených hodnot je patrné, že aplikace nového měřicího postupu, který zahrnuje použití přípravku při měření, měla za následek výraznou změnu naměřených hodnot v porovnání s předchozími měřeními. Rovněž prokazuje, že použitím navržených korekcí došlo k posunu středů děr ležících po obvodu dílů směrem k poloze, jakou vyžaduje odběratel dílů na technickém výkrese.

Nepřesnosti u děr, které neleží na obvodu dílů, jsou způsobeny tím, že program robotu byl laděn za použití původního měřicího postupu právě na pozici těchto děr. Úprava jejich pozice se provede navržením odpovídajících korekcí programu robotu.

4.5 Návrh nové vrtací hlavy

Při experimentu, prováděném za účelem zjistit, zda při vrtacím procesu dochází k vychýlení průmyslového robotu z ideálního směru, který byl prováděn najížděním vrtací hlavy osazené zkušebním trnem, bylo zjištěno, že pozice vyvrtaného otvoru neodpovídá pozici, na kterou průmyslový robot při vrtání najede. Z tohoto důvodu bylo navrženo možné řešení spočívající v návrhu nové vrtací hlavy, která by měla vlastní translační pohon. Při použití této vrtací hlavy by průmyslový robot najel na požadovanou pozici, na které by se zastavil, a došlo by k zabrzdění jeho pohonů. Po zabrzdění jednotlivých pohonů robotu by došlo ke spuštění vrtací hlavy. Samotný vrtací proces by tedy probíhal tak, že by došlo ke spuštění rotačního pohonu vřetena a pomocí translačního pohybu by došlo k vyvrtání daného otvoru. Po dokončení vrtání by translační pohon vrátil vřeteno do výchozí pozice, došlo by k odbrzdění ramena průmyslového robotu, a ten by následně najel na pozici, ze které by se vrtal další otvor.

4.5.1 Výpočet potřebného výkonu vřetene

Při návrhu vrtací hlavy s lineárním pohonem je potřeba stanovit požadovaný výkon vřetena, které bude poskytovat rotační pohon. Nejčastěji se potřebný výkon stroje stanovuje z vypočítané řezné síly. Při výpočtu řezné síly jsou ovšem potřeba materiálové konstanty, které v materiálovém listu, který je v příloze 4, nebyly dodavatelem materiálu uvedeny. Pro výpočet potřebného výkonu stroje byl tedy použit jiný vztah, který s těmito konstantami nepracuje. Nejprve je potřeba stanovit řeznou rychlost, která se určí dle vztahu:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 6,6 \cdot 5500}{1000} = 114,04 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \quad (4.25)$$

Z takto určené řezné rychlosti lze poté stanovit potřebný výkon stroje. Ten se určí ze vztahu [41]:

$$P'_c = \frac{D \cdot f \cdot v_c}{X} = \frac{6,6 \cdot 0,044 \cdot 114,04}{48} = 0,69 \text{ kW} \quad (4.26)$$

Vzhledem k tomu, že tento vztah nepracuje s materiálovými charakteristikami použité oceli, je takto vypočítaný potřebný výkon pouze orientační. Z tohoto důvodu bude takto vypočítaný výkon ošetřen vyšším koeficientem bezpečnosti. Potřebný výkon stroje se tedy stanoví dle:

$$P_c = P'_c \cdot k_p = 0,69 \cdot 2,5 = 1,725 \text{ kW} \quad (4.27)$$

Započítání vyššího koeficientu bezpečnosti a fakt, že tento druh oceli disponuje relativně malou mezí pevnosti v tahu, vede k tomu, že takto vypočítaný potřebný výkon stroje je akceptovatelný. Výkon vřetena generujícího rotační pohyb tedy musí být alespoň 1,725 kW.

4.5.2 Volba vřetene a translačního pohonu

Na základě výše stanoveného potřebného výkonu bylo vybráno odpovídající vřeteno od společnosti Teknomotor. Jedná se o model Teknomotor 41/47-C-2DB s výkonem 2 kW. Hmotnost tohoto modelu je 6,6 kg. Vřeteno společnosti série DB je na obr. 59 [42]



Obr. 59 Vřeteno Teknomotor série DB [42]

Ideální volbou pro translační pohon vřetene je systém založený na kombinaci servomotoru a kuličkového šroubu s vozíkem. Zvolen byl lineární modul KK 50 společnosti HIWIN, který je zobrazen na obr. 60. Lineární modul se zvolenou délkou dráhy 200 mm má hmotnost 1,4 kg. Pro pohon kuličkového šroubu slouží servomotor FRAC 2022 o výkonu 200 W a hmotnosti 1,04 kg, jehož příruba je kompatibilní s možnostmi uchycení na

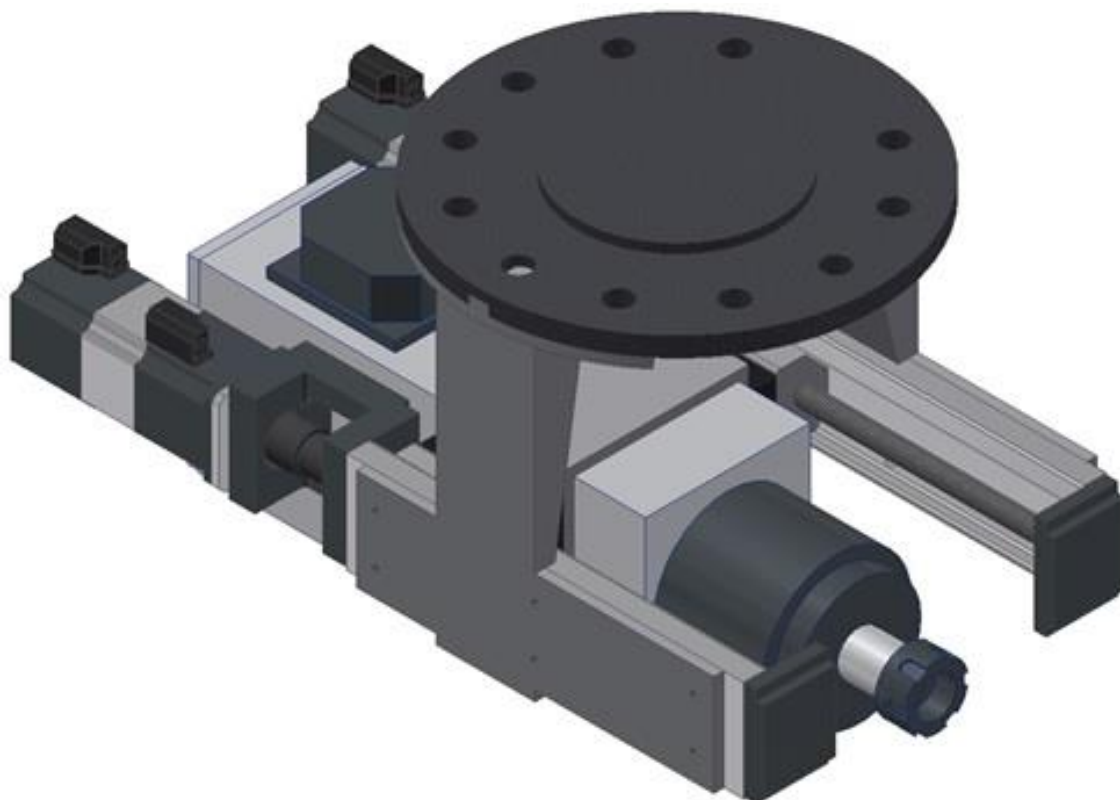


Obr. 60 Lineární modul KK 50 [43]

lineárním modulu. Tento typ lineárního vedení dosahuje značné dynamické tuhosti, což zaručuje stabilitu pozice vřetena při provádění vrtacích operací [43].

4.5.3 Model vrtací hlavy

Při návrhu vrtací hlavy s lineárním pohonem byl kladen důraz na zajištění dostatečné tuhosti, aby bylo zajištěno vrtání bez poškození vyvrtaných děr na konci vrtacího procesu. Rozměry vrtací hlavy jsou navrženy tak, aby byla možné instalace na současně používanou nástrojovou platformu průmyslových robotů. Translační pohon vřetena je zajišťován dvojicí lineárních modulů vybavených servomotory. Sestava vřetena a lineárních modulů je od nástrojové platformy odstavena. Toto odstavení umožňuje bezpečné vedení napájecích kabelů a zamezuje možné kolizi vrtací hlavy s posledními články robotického ramena. Trojrozměrný model vrtací hlavy byl vytvořen ve studentské verzi programu Autodesk Inventor 2015. Vrtací hlava s vřetenem v zadní pozici, kdy je připravena k přesunu na pozici díry, je na obr. 61. Sestava vrtací hlavy s jednotlivými pozicemi je v příloze 5.



Obr. 61 Model vrtací hlavy

Jak je z obrázku patrné, model se skládá z platformy, pomocí které se vrtací hlava připojí na závěrečný článek ramena průmyslového robotu. Na tuto platformu navazují články zajišťující stabilní upevnění lineárních modulů. Tyto moduly jsou poté spojeny článkem, který zajišťuje dostatečnou tuhost celého systému a zároveň je k němu upevněno vřeteno. Orientace vřetena a servomotorů je koncipována tak, aby vedení přívádějící do vrtací hlavy potřebnou energii bylo možné seskupit a nehrozilo by odírání jednotlivých kabelů o robotické rameno při provádění vrtacích operací.

Model upevněný na nástrojové platformě průmyslového robotu ABB IRB 6640 je na obr. 62.



Obr. 62 Vrtací jednotka na průmyslovém robotu

4.5.4 Hmotnostní kalkulace návrhu

Vzhledem k omezené nosnosti ramena je nutné stanovit celkovou hmotnost navržené vrtací hlavy. V tab. 12 jsou uvedeny jednotlivé komponenty tvořící navrženou vrtací hlavu spolu s příslušnými hodnotami hmotnosti [42][43].

Tab. 12 Hmotnostní kalkulace návrhu

	Množství	Hmotnost [kg]	Cena [€]
Vřeteno	1	6,6	350
Lineární modul	2	2 x 1,4	2 x 400
Servomotor	2	2 x 1,04	2 x 180
Platforma	1	2,63	80
Spojka platformy s lineárním modulem	2	2 x 1,25	2 x 220
Člen upevňující vřeteno	1	0,53	130
Distanční podložka	2	2 x 0,2	2 x 20
Spojovací materiál	/	≈ 3	15
Celkem		20,54	2215

Z hodnot uvedených v předchozí tabulce je patrné, že nejvýznamnějšími komponentami sestavy z hlediska své hmotnosti jsou vřeteno a platforma, pomocí které se celá sestava upevňuje na rameno robotu. Lze tedy říci, že vzhledem k hmotnosti původní vrtací jednotky vzroste hmotnost o méně než 10 kg. Což je při nosnosti posledního článku robotu 180 kg zanedbatelná hodnota [28].

4.6 Rozšíření tolerančních mezí

Velká odchylka tvaru jednotlivých dílů od jejich příslušných CAD modelů vede k riziku produkce dílů, jejichž jakost nebude v souladu s požadavky předepsanými na technickém výkresu. Toto riziko by hrozilo i po úpravě stávající technologie vrtání těchto otvorů. Odchylky od požadované polohy otvorů jsou totiž v rozhodující míře způsobeny zdeformováním profilu při ohýbání. Po úpravě technologie, která povede k zpřesnění vrtání těchto otvorů, budou po změření některé otvory stále mimo toleranci předepsanou na výkrese. A to z toho důvodu, že jejich poloha bude, kvůli deformaci na obvodu profilu, ležet na normále vnějšího obvodu profilu.

Stávající systém kótování na technickém výkresu součásti předepisuje polohu jednotlivých otvorů pouze v osách x a z. Z hlediska velkého zakřivení součásti v místech, kde leží otvory, u kterých byly největší odchylky od požadované polohy, je tento systém kótování značně zavádějící. Navržením korekcí, které by zapříčinily vrtání otvorů v jakosti předepsané na technickém výkresu, dojde u některých otvorů k tomu, že poloha vyvrtané díry bude odpovídat požadované poloze v ose x, ovšem dojde k značnému posunutí v ose y. Jakost obrobku bude tedy z hlediska tolerancí předepsaných na výkresu v pořádku, ovšem při dalším zpracování dílu, které probíhá u odběratele, mohou nastat problémy. Zejména takového charakteru, že takto obrobené díly nebudou vyhovovat při následujících montážních operacích, kdy na otvory nebudou sedět s jejich protikusy.

Z tohoto důvodu je vhodné navrhnout takové tolerance přesnosti vyvrtaných otvorů, aby takové riziko nehrozilo. Zvýšení tolerancí by se týkalo zejména otvorů, které se nachází na obvodu obrobku, a to z důvodu deformace profilu vzniklé jeho částečným propadnutím vniklým při ohýbání. Rozšíření tolerancí vrtaných na horní rovině dílu je navrženo z toho důvodu, že stávající systém kótování je založen na sestavení kóty od otvoru, který je vrtaný v předchozí výrobní operaci v rámci své vlastní tolerance. Na tyto otvory má deformace dílu vzniklá při ohýbání zanedbatelný vliv, proto nejsou navržené tolerance výrazně širší než tolerance původní.

Návrh tolerancí, které by umožnily efektivní výrobu součástí při zachování jejich použitelnosti v dalších procesech výroby, je v tab. 13.

Tab. 13 Návrh nových tolerancí

Pravý díl	Levý díl	Jmenovitá hodnota [mm]		Původní tolerance v ose x [mm]		Nové tolerance v ose x [mm]	
Číslo díry	Číslo díry	x	z	+	-	+	-
1	5	213,5	12,5	0,5	0,5	0,8	0,8
2	4	259,7	12,5	0,5	0,5	0,8	0,8
3	3	258	12,5	0,5	0,5	0,8	0,8
4	2	225,3	25	0,2	0,2	0,3	0,3
5	1	15	25	0,2	0,2	0,3	0,3

Rozšíření tolerančních polí vrtaných otvorů povede k tomu, že otvory vrtané na normále směřující od ideální pozice budou dle technického výkresu v pořádku a odběratel součástí nebude mít problémy s jejich dalším zpracováním, jelikož poloha otvorů bude odpovídat požadavkům na upevnění protikusu na díl.

Aplikací tohoto návrhu by došlo ke značné změně ve vyhodnocování naměřených odchylek pozic středů vyvrtaných otvorů. To je možné vidět, pro případ levých kusů, v tab. 14, kde jsou zeleně zvýrazněny hodnoty, které byly při původním vyhodnocení označeny jako nevyhovující. Obdobná situace je v tab. 15, kde se jedná o vyhodnocení pravých dílů.

Tab. 14 Rozdíl pro levé díly

Levý díl			Naměřené odchylky v ose x										
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
1	15	0,3/0,3	0,18	0,17	0,21	0,25	0,19	0,02	-0,01	0,01	0,04	0,02	0,108
2	225,3	0,3/0,3	0,14	0,07	0,17	0,26	0,20	-0,02	-0,04	0,03	0,02	0,06	0,089
3	258	0,8/0,8	0,20	0,17	0,17	0,11	0,51	0,24	0,32	0,20	0,23	0,18	0,233
4	259,7	0,8/0,8	1,41	1,49	1,24	1,25	1,44	1,44	1,50	1,28	1,35	1,36	1,376
5	213,5	0,8/0,8	0,80	0,74	0,59	0,70	0,61	0,50	0,61	0,36	0,53	0,58	0,602

Tab. 15 Rozdíl pro pravé díly

Pravý díl			Naměřené odchylky v ose x										
Díra číslo	Jmenovitá hodnota	Tolerance +/-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
1	213,5	0,8/0,8	0,85	0,31	0,66	0,84	0,84	0,65	0,81	0,63	-0,12	0,05	0,552
2	259,7	0,8/0,8	1,01	0,71	0,92	1,01	1,00	0,93	1,05	0,80	0,26	0,56	0,825
3	258	0,8/0,8	0,05	0,28	0,11	0,04	0,02	0,07	0,27	0,13	0,21	0,44	0,162
4	225,3	0,3/0,3	-0,19	-0,04	-0,20	-0,16	-0,16	-0,17	-0,10	-0,10	0,08	0,00	-0,104
5	15	0,3/0,3	-0,11	-0,01	-0,13	-0,09	-0,12	-0,19	-0,16	-0,17	-0,12	-0,12	-0,122

Již na první pohled je zřejmé, že při rozšíření tolerančního pole došlo při vyhodnocování výsledků měření k výrazné změně. Pro případ levých dílů došlo ke snížení počtu nejakostních děr o 55 % a odchylky přesahující toleranci se vyskytují pouze u jednoho vrtaného otvoru. V případě pravých stranových variant činí toto snížení přibližně 40 %.

5 EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

5.1 Cenová kalkulace navržené vrtací hlavy

V případě návrhu vrtací hlavy vybavené translačním pohonem je nutné provést cenovou kalkulaci. Ta je důležitá z hlediska vyhodnocení dopadu aplikace návrhu do stávající technologie. V případě, že cena navrženého zařízení výrazně navýší současné náklady na produkci, nebude možné tento návrh realizovat. Ovšem pokud náklady na realizaci návrhu výslednou cenu produkce výrazně neovlivní, je tento návrh vhodný k realizaci, neboť nabízí řešení problému překračování maximální povolené hodnoty kruhovitosti. Seznam komponent tvořících model vrtací hlavy, spolu s příslušným cenovým ohodnocením, je v tab. 16 [42][43].

Tab. 16 Cenová kalkulace návrhu

	Množství	Cena [€]
Vřeteno	1	350
Lineární modul	2	2 x 400
Servomotor	2	2 x 180
Platforma	1	80
Spojka platformy s lineárním modulem	2	2 x 220
Člen upevňující vřeteno	1	130
Distanční podložka	2	2 x 20
Spojovací materiál	/	15
Celkem		2215

V tab. 17 je porovnání dvou technologií, přičemž první technologie, označená jako A, je ta stávající. Technologie B se od předchozí liší aplikací lineární vrtací jednotky.

Tab. 17 Porovnání nákladů na technologie

	Technologie A	Technologie B
	Průmyslový robot ABB IRB 6640-180/2.55	Průmyslový robot ABB IRB 6640-180/2.55 vybavený navrženou vrtací hlavou
Pořizovací náklady [€]	162 000	162 000 + 2 215
Náklady na přípravky [€]	stejně	
Náklady na nástroje [€/dávka]	stejně	
Náklady na provoz [€/dávka]	24,47	33,52
Náklady na obsluhu [€/rok]	stejně	
Náklady na seřízení a údržbu [€/rok]	stejně	
Zmetkovitost [%]	Z_A	$Z_B < Z_A$
Zastavěná plocha [m ²]	stejně	
Náklady na kus [€/ks]	0,155	0,191

- Z hodnot vypsanych v předchozí tabulce je patrné, že pořizovací náklady na navrženou vrtací hlavu jsou v porovnání s celkovými pořizovacími náklady minimální. Představují z celkové částky zhruba 1,5 %.
- Růst provozních nákladů je způsoben růstem celkové spotřeby energie, jelikož celkový výkon zařízení byl navýšen o 1 kW.
- Instalací vrtací hlavy dojde k výraznému snížení zmetkovitosti produkce. Jak bylo zjištěno v předchozích měřeních, dosahovala zmetkovitost způsobená překročením tolerance kruhovitosti pro levé díly 8 %. Pro pravé díly to bylo 14 % z celkové produkce. Tyto hodnoty budou po aplikaci vrtací hlavy sníženy na minimum.
- Růst celkových nákladů je způsoben zejména růstem provozních nákladů. Celkové náklady na jednotku produkce byly navýšeny o 23 %.

V předchozí části je pracováno s náklady na jeden kus produkce. Je tedy nutné uvést, jak jich bylo dosaženo. Tyto náklady byly stanoveny pomocí následujícího kalkulačního vzorce jako vlastní náklady výroby [44]:

$$VNV = PM + PMZ + OPN + VR \quad (5.1)$$

- Přímým materiálem se rozumí spotřeba materiálu při produkci hotového výrobku. V tomto případě budou náklady spojené s přímým materiálem stejné, neboť se výroba realizuje obráběním stejného polotovaru
- Přímé mzdy zahrnují náklady na pracovníky zapojené do výrobního procesu. Pro tento případ budou stejné, neboť navržená změna technologie nezahrnuje přidání dalšího pracovníka nebo potřebu pracovníka s vyšší kvalifikací.
- Položka ostatních přímých nákladů zahrnuje další technologické náklady související s výrobním procesem. Mezi tyto náklady patří technologické palivo, technologická energie a odpisy použitých strojů a zařízení. V této položce nastává pro tento případ změna, jelikož se mění náklady na provoz stroje, které rostou zhruba o 37 %. Rovněž dochází ke změně nákladů spojených s odpisy výrobního zařízení. Tato změna je velmi malá, jelikož cena zařízení vzroste o zhruba 1,5 %.
- Položka výrobní režie, která obsahuje zejména náklady spojené s technickým zabezpečením výroby, se nemění.

5.2 Zhodnocení výhodnosti technologie

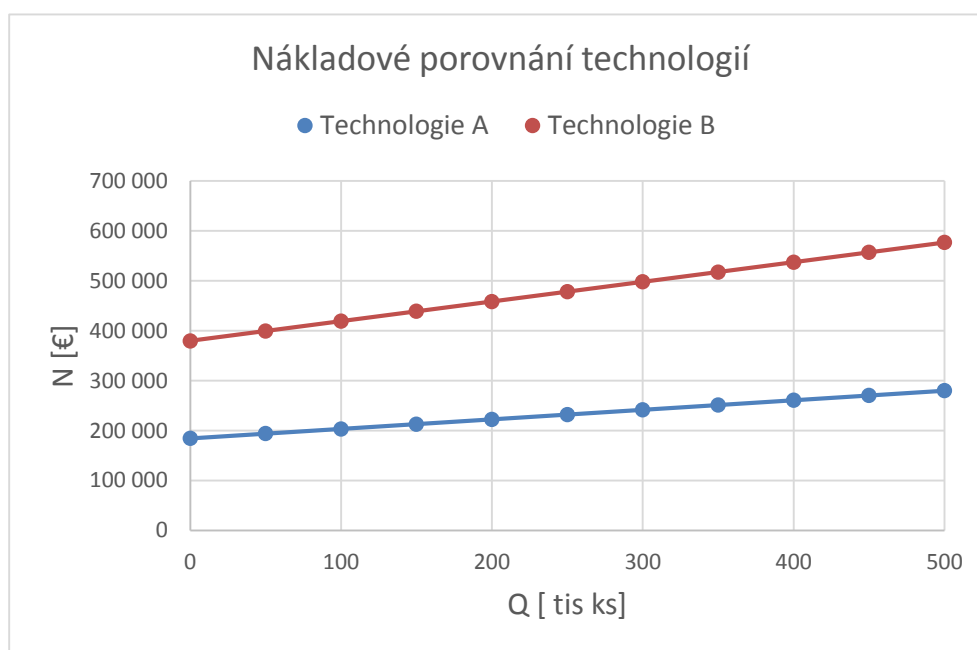
Při nastávajícím ekonomickém vyhodnocení bude porovnáno stávající robotizované pracoviště upravené o změny, které byly navrženy v kapitole 4, s konvenčním pracovištěm skládajícím se z CNC obráběcího centra a sloupové vrtačky. Jako CNC obráběcí centrum byl navržen model SW BA 400, který je v současné době ve společnosti EDSCHA Automotive Kamenice standardně využíván při obrábění některých produktů. To se týká i návrhu typu sloupové vrtačky, kterým je AB 35 od společnosti Alzmetall. Na CNC obráběcím centru by bylo prováděno vrtání otvorů nacházejících se po obvodu dílů. Zbývající dva otvory ležící na horní rovině dílu by byly vrtány na sloupové vrtačce. V tab. 18 jsou stanoveny náklady na pořízení a provoz jednotlivých pracovišť. Pokud jsou náklady na určitou položku nezměněné, nejsou v této tabulce uvedeny.

Tab. 18 Nákladové porovnání technologií

	Technologie B	Technologie C	
	Průmyslový robot ABB IRB 6640-180/2.55 vybavený navrženou vrtací hlavou	CNC obráběcí centrum SW BA 400	Sloupová vrtačka AB 35
Pořizovací náklady [€]	162 000 + 2 215	320 000	35 000
Náklady na přípravky [€]	20 200	21 821	2 857
Náklady na nástroje [€/dávka]	stejně		
Náklady na provoz [€/dávka]	33,52	53,87	18
Náklady na obsluhu [€/rok]	15 000	15 000	15 000
Náklady na seřízení a údržbu [€/rok]	stejně		
Zmetkovitost [%]	Z_B	$Z_C > Z_B$	
Zastavěná plocha [m ²]	22,94	33,75	6
Náklady na kus [€/ks]	0,191	0,279	0,115

- Jak je z tabulky patrné, mezi jednotlivými technologiemi je zásadní rozdíl v jejich pořizovacích nákladech. Náklady na pořízení alternativní technologie jsou, v porovnání s pořizovacími náklady robotizovaného pracoviště, více než dvojnásobné.
- Náklady na přípravky jsou u technologie B vyšší o cca 22%. Další výrazný rozdíl je v provozních nákladech jednotlivých technologií. V porovnání s robotizovaným pracovištěm jsou náklady na konvenční pracoviště více než dvojnásobné. To je způsobeno zejména energetickou náročností CNC obráběcího centra.
- Náklady na obsluhu jsou stejné pro každé pracoviště, jelikož se tyto pracoviště neliší potřebnou specializací obsluhujícího pracovníka. Jelikož se produktivita konvenčního pracoviště nemůže rovnat produktivitě robotizovaného pracoviště, je potřeba zapojit do výrobního procesu podle technologie B dalšího pracovníka, čímž dojde ke zdvojnásobení nákladů na obsluhu.
- Náklady na nástroje jsou u obou technologií stejné, protože se vrtá stejný počet otvorů stejnými nástroji.
- Stroje využitě při realizaci technologie B, zejména CNC obráběcí centrum, vyžadují větší plochu potřebnou k instalaci a provoz, což je při stávajícím nedostatku pracovní plochy na výrobní hale výraznou překážkou.
- Předpokládaná zmetkovitost produkce je pro technologii B větší, neboť se pro tuto technologii výroba realizuje na dvou pracovištích, z čehož plyne větší riziko produkce dílu, jehož jakost nebude splňovat požadavky předepsané na příslušném technickém výkresu.
- Náklady na údržbu a seřízení jednotlivých pracovišť jsou pro obě technologie stejné.
- Náklady na obrobení jednoho kusu pomocí technologie B jsou tedy navýšeny o více než 100 % oproti nákladům na jeden kus obrobený s využitím stávající technologie využívající průmyslové roboty.

Grafické porovnání nákladů na jednotlivé technologie je na obr. 63. Je zde vynesena závislost nákladů na počtu vyrobených kusů. Jak je z tohoto grafu patrné, náklady na technologii B vzrůstají s rostoucí velikostí produkce rychleji než náklady na technologii pracující s robotizovaným pracovištěm. Technologie využívající robotizované pracoviště je tedy z nákladového hlediska výhodnější při jakékoli plánované velikosti produkce.



Obr. 63 Závislost nákladů na množství produkce

ZÁVĚR

Předmětem práce byla analýza současného stavu technologie na robotizovaném pracovišti ve společnosti Edscha Automotive Kamenice s.r.o. zaměřená na možné nedostatky způsobující produkci dílů, které se neshodují s jakostí předepsanou odběratelem v příslušné technické dokumentaci. Pomocí vyhotovené analýzy měla být navržena taková změna technologie, která by zaručila jakostní produkci.

Při analýze obrobených dílů provedené na CNC měřicím centru byly zjištěny značné odchylky pozic středů vyvrtaných otvorů. Tyto odchylky ve většině případů překračovaly toleranci předepsanou na příslušném technickém výkresu. Dále byla zjištěna nedostatečná kvalita vyvrtaných otvorů, spočívající v překračování tolerance kruhovitosti. Z důvodu nutnosti zjištění příčin těchto odchylek byly provedeny dva experimenty.

- První byl zaměřen na zjištění, zda pozice vyvrtaných otvorů odpovídá pozici, na kterou najíždí robotické rameno. Výsledek tohoto pokusu prokázal, že během vrtacího procesu dochází k vychýlení průmyslového robotu z ideální dráhy.
- Druhý experiment byl zaměřený na zjištění, s jakou přesností robot najíždí k obrobnu během vrtacího procesu. Během analýzy výsledků tohoto pokusu, která probíhala, mimo jiné porovnáváním oskenovaného dílu s příslušným CAD modelem bylo zjištěno, že polotovar přicházející na operaci je silně zdeformován. Charakter této deformace odpovídá deformacím, které provázejí proces ohýbání.

Reakcí na výsledky těchto analýz byl návrh změn stávající technologie, které po své aplikaci zajistí produkci dílů o jakosti předepsané na technickém výkresu. Níže jsou stručně popsány změny, které již byly aplikovány.

- Návrh korekcí programu jednotlivých robotů. Jejich aplikací došlo k výraznému snížení velikostí odchylek pozic středů vyvrtaných otvorů od jejich nominální polohy. Při jejich aplikaci došlo k identifikaci nesprávného měřicího postupu.
- Navržení a realizace nového měřicího postupu, jehož součástí je nový přípravek, na kterém se měření provádí.

Dále byly navrženy další úpravy stávající technologie, které byly společnosti představeny, a jejichž realizace závisí na rozhodnutí příslušných osob.

- Návrh nové vrtací hlavy robotu, která je vybavena translačním pohonem. Její aplikací dojde ke snížení zmetkovitosti produkce způsobené překročením tolerance kruhovitosti o 10 %.
- Návrh na rozšíření tolerančních mezí z důvodu potřeby zachování použitelnosti produkce v dalším zpracování prováděném odběratelem. Pozice děr zůstane zachována na místě, kde je vyžadována při další produkci.

Provedení ekonomického vyhodnocení prokázalo výhodnost nasazení robotizovaného pracoviště v porovnání s použitím konvenčních technologií. Aplikací navržené vrtací hlavy dojde k mírnému nárůstu nákladu na jednotku produkce, ovšem za výrazného snížení zmetkovitosti. I při tomto nárůstu jsou náklady na kus o 50 % nižší než při realizaci stejné práce na konvenčních strojích, kde by navíc byla zvýšená zmetkovitost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PIRES, J. *Industrial robots programming: building applications for the factories of the future*. New York: Springer, 2007, xiv, 282 s. ISBN 03-872-3325-3.
- [2] Heron Alexandrijský. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1433-heron-alexandrijsky>
- [3] ŠOLC, František a Kuděk ŽALUD. *ROBOTIKA* [online]. Brno, 2002 [cit. 2015-01-25].
- [4] Robotika od historie po současnost. *ElektroPrůmysl* [online]. 2012 [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/automatizace-rizeni-a-regulace/robotika-od-historie-po-soucasnost-3>
- [5] Robotika. *Nauka.rs* [online]. 2012 [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: <http://nauka.rs/tag/asimo>
- [6] KOLÍBAL, Zdeněk. *Průmyslové roboty I. Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů. PRaM*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1993, 189 s. ISBN 80-214-0526-0.
- [7] SMUTNÝ, Vladimír. *Kinematika robotů* [online]. [cit. 2015-01-28]. Dostupné také z: <https://cw.fel.cvut.cz/wiki/media/courses/a3b99ro/robotismutnycz.pdf>
- [8] ŠVEJDA, Martin. *Kinematika manipulátorů*. Plzeň, 2011. Dostupné také z: http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2011/1_kinematikaManipulatoru.pdf
Technická zpráva.
- [9] *KUKA průmyslové roboty* [online]. 2015 [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/
- [10] Maxon stejnosměrné motory řízení pohybu interpolací. *TechPark* [online]. 2008 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/technika-42010/maxon-stejnosmerne-motory-rizeni-pohybu-interpolaci-.html>
- [11] Welding robot teaching. *ROBOTIQ* [online]. 2015 [cit. 2015-2-12]. Dostupné z: <http://robotiq.com/applications/robot-teaching/>
- [12] *RoboDK* [online]. 2014 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <https://www.robodk.com/index.php>
- [13] RUMÍŠEK, Pavel. *AUTOMATIZACE: roboty a manipulátory* [online]. In: . 2003 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/mechanizace_a_automatizace__roboty__rumisek.pdf
- [14] Sumitomo's Cyclo Drive. *Sumitomo Drive Technologies* [online]. 2015 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/SumitomoMachineryofAmerica/Sumitomos_Cyclo_Drive_Video_Demonstration/115727/0
- [15] *Dreamstime* [online]. 2015 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.dreamstime.com/>
- [16] Power systems. *EUREKA* [online]. 2014 [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: <http://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-products/power-systems/673450/1/>

- [17] Novinky na veletrhu Amper 2013. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/novinky-na-veletrhu-amper-2013.html>
- [18] Stepper Motor – Types, Advantages and Applications. *ELPROCUS* [online]. 2013 [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/stepper-motor-types-advantages-applications/>
- [19] What Are the Different Types of Electric Motors? *WiseGEEK* [online]. 2015 [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: <http://www.wisegeek.com/what-are-the-different-types-of-electric-motors.htm>
- [20] Hydraulic actuation cylinders. *Cowan dynamics* [online]. 2015 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: http://cowandynamics.com/hydraulic_actuation_hydraulic_cylinders/
- [21] Pneumatická úhlová chapadla. *Stránský a Petržník* [online]. 2015 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.stranskyapetrzik.cz/pneu/pneumaticke-valce/valce-upinaci-menu/valce-mcha/>
- [22] Pneumohydraulické pohony. *OK Strojservis* [online]. 2015 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.ok-strojservis.cz/produkty/cestina-tox-pressotechnik-4/produkty-tox-pressotechnik/produkt-6/cestina-pneumohydraulicke-pohony/>
- [23] Electro-Hydraulic Actuator. *KMI* [online]. 2012 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://kmiactuators.com/Features/bidirectional.htm>
- [24] *WOW Technology: engineering your ideas* [online]. 2015 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://www.wowtechnology.com/>
- [25] Carat robotik innovation. *Wirtschaftsförderer* [online]. 2015 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://business.metropoleruhr.de/en/location/hidden-champions/carat-robotik-innovation.html>
- [26] Strong Arm with Machining Units. *Manufacturing Engineering* [online]. 2015 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://www.sme.org/MEMagazine/Article.aspx?id=83826&taxid=3013>
- [27] *Wikipedia* [online]. 2015 [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: <https://www.wikipedia.org/>
- [28] *ABB* [online]. 2015 [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: <http://new.abb.com/cz>
- [29] Optics and Vision in Solar Manufacturing. *Solar novus today* [online]. 2012 [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: <http://www.solarnovus.com/optics-and-vision-in-solar-manufacturing- N4197.html>
- [30] *Yaskawa Motoman robotisc* [online]. 2015 [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: <http://www.motoman.com/>
- [31] Industrial Robot Manufacturers. *Precision Electric, Inc.* [online]. 2013 [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: <http://www.precision-elec.com/industrial-robot-manufacturers/>
- [32] *FANUC* [online]. 2015 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: <http://www.fanuc.eu/cz/cs>
- [33] *FANUC Robotics. Robotic Business Review* [online]. 2015 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: http://www.roboticsbusinessreview.com/company/fanuc_robotics
- [34] *Edscha* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://edscha.com/>

- [35] Audi A4 2.0 TDI. *Better Parts* [online]. 2014 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://betterparts.org/audi/audi-a4/audi-a4-2.0-tdi.html>
- [36] Rozbor tavby. *CZ FERRO Steel* [online]. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/profily1-E260.pdf>
- [37] Mechanické vlastnosti ocelí. *T-PROM* [online]. 2006 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://www.tprom.cz/tabulky/tabulka4.html>
- [38] ABB delivers 200,000th robot. *ProcessOnline* [online]. 2012 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.processonline.com.au/content/factory-automation/news/abb-delivers-2-th-robot-273616669>
- [39] Produktdetails. *Industry Mall - Siemens WW* [online]. 2015 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/de/WW/Catalog/Product/1FK7063-2AH71-1QA0>
- [40] Vrták tvrdokov 3xD TiAlN HB, GP UNI. *Verko* [online]. 2013 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.verko.cz/vrtak-tvrdokov-3xd-tialn-hb-gp-uni-15374/>
- [41] *Pramet: příručka obrábění* [online]. 2004, 101 s. [cit. 2015-04-25]. Dostupné také z: http://www.isstechn.cz/objekty/prirucka_obrazeni.pdf
- [42] Teknomotor série DB. *CNCshop* [online]. 2010 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://cncshop.cz/teknomotor-serie-db>
- [43] KK 50. *HIWIN* [online]. 2015 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: http://www.hiwin.cz/cz/produkty/polohovaci-systemy/linearni-moduly-kk/125_kk-50
- [44] Kalkulační vzorec. *Business center* [online]. 2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://business.center.cz/business/pojmy/p1974-kalkulacni-vzorec.aspx>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	[-]	trojdimenzionální
CAD	[-]	computer aided design
CNC	[-]	computer numerical control
CP	[-]	continuous path
DOF	[-]	degree of freedom
PTP	[-]	point-to-point

A	[%]	tažnost materiálu
c_i	[-]	počet stupňů volnosti odebraných kloubem i
D	[mm]	průměr obrobku
F	[-]	počet stupňů volnosti
f	[mm]	posuv
f_i	[-]	počet stupňů volnosti kloubu i
j	[-]	počet klubů mechanismu
K_p	[-]	koeficient bezpečnosti
n	[-]	počet ramen mechanismu
n	[min ⁻¹]	otáčky vřetena
N	[€]	náklady
OPN	[Kč]	ostatní přímé náklady
P	[-]	vektor požadované polohy referenčního bodu chapadla
P_c	[kW]	přepočítaný výkon stroje
P_c'	[kW]	výkon stroje
PM	[Kč]	přímý materiál
PMZ	[Kč]	přímé mzdy
q	[-]	vektor kloubových souřadnic
Q	[ks]	velikost produkce

q_i	[rad]	souřadnice kloubu i
Re	[MPa]	mez kluzu materiálu v tahu
Rm	[MPa]	mez pevnosti materiálu v tahu
v_c	[m·min ⁻¹]	řezná rychlost
VNV	[Kč]	vlastní náklady výroby
VR	[Kč]	výrobní režie
x	[m]	poloha referenčního bodu v ose x
X	[-]	konstanta
x₁	[mm]	osa x nástroje
x_{1l}	[mm]	posunutí nástroje v ose x pro levý díl
x_{1p}	[mm]	posunutí nástroje v ose x pro pravý díl
x₂	[mm]	osa x obrobku
x_{2l}	[mm]	odchylka v ose x pro levý díl
x_{2p}	[mm]	odchylka v ose x pro pravý díl
y	[m]	poloha referenčního bodu v ose y
y₁	[mm]	osa y nástroje
y_{1l}	[mm]	posunutí nástroje v ose y pro levý díl
y_{1p}	[mm]	posunutí nástroje v ose y pro pravý díl
y₂	[mm]	osa y obrobku
y_{2l}	[mm]	odchylka v ose y pro levý díl
y_{2p}	[mm]	odchylka v ose y pro pravý díl
z	[m]	poloha referenčního bodu v ose z
z₁	[mm]	osa z nástroje
z_{1l}	[mm]	posunutí nástroje v ose z pro levý díl
z_{1p}	[mm]	posunutí nástroje v ose z pro pravý díl
z₂	[mm]	osa z obrobku
z_{2l}	[mm]	odchylka v ose z pro levý díl
z_{2p}	[mm]	odchylka v ose z pro pravý díl
α	[rad]	první rotace referenčního bodu

β	[rad]	druhá rotace referenčního bodu
γ	[rad]	třetí rotace referenčního bodu
λ	[-]	počet stupňů volnosti okolního systému

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Layout výrobní linky

Příloha 2 Výkres součásti

Příloha 3 Protokol o měření

Příloha 4 Materiálový list

Příloha 5 Výkres sestavy vrtací hlavy