

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

NÁVRH AUTOMATIZACE PROCESU KONTROLY KVALITY

QUALITY CONTROL PROCESS AUTOMATION DESIGN

**Autor:** Bc. Martin Nečas

**Studijní program:** Strojní inženýrství

**Studijní obor:** Výrobní a materiálové inženýrství

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Kellner

**Praha 2019**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nečas** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **438628**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh automatizace procesu kontroly kvality**

Název diplomové práce anglicky:

**Quality Control Process Automation Design**

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše problematiky automatizace procesů
2. Analýza předmětu kontroly
3. Návrh variant řešení
4. Simulace vybrané varianty
5. Technicko-ekonomické zhodnocení
6. Realizace pracoviště

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Tomáš Kellner, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

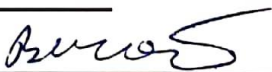
Datum zadání diplomové práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_



Ing. Tomáš Kellner  
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

24.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci s názvem „Návrh automatizace procesu kontroly kvality“ vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury.

Souhlasím, že výsledky této práce mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora a s případnou publikací výsledků, pokud budu uveden jako spoluautor.

**Praha** .....

.....

**podpis**

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Tomáši Kellnerovi za jeho odbornou pomoc, ochotu a cenné rady, které mi poskytl při tvorbě této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval společnostem ABB s.r.o. a Carl Zeiss spol. s.r.o. za poskytnutí potřebného technického vybavení a čas věnovaný konzultacím při řešení problémů.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá automatizací rozměrové kontroly na souřadnicovém měřícím stroji (CMM) s využitím kolaborativního robota. Díky automatizaci rozměrové kontroly je možné ušetřit kapacitu zaměstnanců a také zvýšit opakovatelnost a produktivitu měření součástí v sériové výrobě. V rámci návrhu pracoviště byl zvolen předmět kontroly. Pro kontrolovanou součást byly navrženy příslušné přípravky, potřebné vybavení pracoviště a varianty uspořádání pracoviště. Vybraná varianta pracoviště byla ověřena s využitím softwaru určeného k simulaci a programování robotů. Součástí realizace pracoviště bylo vytvoření programu robota za účelem plné automatizace procesu, včetně zakládání výrobku a jeho umístění po kontrole součásti v závislosti na výsledku měření. Výsledkem práce bylo kompletní automatizované pracoviště kontroly součástí.

## **Klíčová slova**

Automatizace kontroly kvality, Kolaborativní robot, Souřadnicové měřící stroje, Programování robota, Návrh pracoviště

## **Abstract**

The thesis deals with automation of dimensional control on a CMM using a collaborative robot. Thanks to the dimensional control automation, it is possible to save staff capacity as well as to increase the repeatability and productivity of component measurement in series production. Within the design of the workplace, the subject of the inspection was chosen. Necessary equipment of workplace and variants of workplace layout were designed for the inspected part. The selected workplace variant was verified using software designed for simulation and programming. The part of workplace realization was also to create a robot program to fully automate the process, including product placement and placement after component inspection, depending on the measurement result. The result of the project was an automated components inspection.

## **Key words**

Quality Control Automation, Collaborative Robot, Coordinate Measuring Machines, Robot Programming, Workplace Design

## Obsah

1	Úvod.....	7
2	Automatizace a robotizace .....	8
2.1	Důvody a přínosy automatizace.....	8
2.2	Automatizované výrobní systémy.....	9
2.3	Robotizace .....	11
3	Průmyslové roboty a manipulátory .....	12
3.1	Rozdělení průmyslových robotů a manipulátorů .....	13
3.1.1	Počet stupňů volnosti .....	17
3.1.2	Kinematická struktura.....	19
3.1.3	Geometrie pracovního prostoru .....	20
4	Problematika kolaborativních pracovišť.....	24
4.1	Bezpečnost kolaborativních pracovišť .....	24
4.1.1	Technická specifikace ISO/TS 15066.....	25
4.1.2	Posouzení rizik .....	27
4.1.3	Typy bezpečných kolaborativních operací.....	30
4.2	Přehled kolaborativních robotů s omezenou silou .....	33
4.2.1	ABB s.r.o. – YuMi (IRB 14000).....	34
4.2.2	Comau Czech s.r.o.– AURA .....	35
4.2.3	FANUC Czech s.r.o.– CR 35iA .....	36
4.2.4	KAWADA INDUSTRIES Inc.– NEXTAGE .....	37
4.2.5	KUKA Automation ČR s.r.o.– LBR iiwa .....	37
4.2.6	Rethink robotics GmbH – Sawyer .....	38
4.2.7	Universal Robots A/S – UR3.....	39
4.2.8	Parametry výběru kolaborativního robota .....	40
5	Návrh pracoviště automatické kontroly .....	42
5.1	Cíle zadání a motivace řešení.....	42
5.2	Vstupní parametry .....	42
5.2.1	Kolaborativní robot (YuMi) .....	43
5.2.2	Souřadnicový měřicí stroj (DuraMax) .....	43
5.3	Předmět kontroly kvality.....	45
5.4	Návrh vybavení pracoviště .....	46
5.4.1	Přepravky pro předmět kontroly kvality.....	46

5.4.2	Přípravky pro předmět kontroly .....	47
5.4.3	Paralelní prsty pro robota .....	48
5.4.4	Stoly pro robota YuMi a CMM DuraMax .....	50
5.5	Návrh variant pracoviště .....	51
5.5.1	Varianta 1 .....	52
5.5.2	Varianta 2 .....	52
5.5.3	Varianta 3 .....	53
5.5.4	Varianta 4 .....	54
5.5.5	Varianta 5 .....	54
5.6	Rozhodnutí o finální variantě pracoviště .....	55
6	Simulace a verifikace zvolené varianty pracoviště .....	56
6.1	Založení projektu a sestavení pracoviště v RobotStudios .....	56
6.2	Vytvoření targetů .....	58
6.3	Tvorba programové rutiny .....	59
6.4	Virtuální signál pro manipulaci s předměty kontroly kvality .....	64
7	Programování a realizace pracoviště .....	69
7.1	Vytvoření základních programových rutin .....	70
7.2	Synchronizace a tvorba hlavních programových rutin .....	75
7.3	Digitální vstupy a výstupy pro komunikaci .....	78
7.4	Odladění programu robota .....	80
7.5	Další vylepšení programu .....	83
7.5.1	Zajištění bezpečnosti .....	83
7.5.2	Automatická kalibrace nástroje robota .....	85
7.5.3	Dotlačení předmětu kontroly do přípravku .....	86
7.5.4	Použití integrované kamery .....	86
7.5.5	Doplnění činnosti robota během cyklu měření .....	88
8	Technicko-ekonomické zhodnocení .....	90
8.1	Zhodnocení technických dopadů navržené varianty .....	90
8.2	Zhodnocení ekonomických dopadů navržené varianty .....	93
9	Realizace pracoviště .....	97
10	Závěr .....	101
11	Seznam použité literatury .....	103
12	Seznam obrázků .....	108
13	Seznam tabulek .....	111
14	Seznam použitých zkratk a pojmů .....	112

# 1 Úvod

Cílem diplomové práce je navrhnout a zrealizovat automatizaci procesu kontroly kvality. V úvodní části práce je vypracována rešerše problematiky automatizace a robotizace se zaměřením na důvody a přínosy automatizace. Druhá část rešerše se zabývá kolaborativními roboty a bezpečností na pracovištích s využitím těchto robotů.

V praktické části diplomové práce je podrobně popsán kompletní návrh pracoviště kontroly, který je zpracován na základě získaných poznatků z rešerše. Při návrhu bude nejprve zvolen předmět kontroly, pro který budou následně vybrány vhodné a dostupné stroje (Kolaborativní robot a Souřadnicový měřicí stroj). Další vybavení a rozmístění pracoviště bude navrženo na základě určeného předmětu kontroly a příslušných strojů. Ze stanovených omezujících podmínek bude určen nejvhodnější model finálního pracoviště, který bude výsledkem návrhu automatizace kontroly kvality.

Pro finální variantu návrhu pracoviště bude následně provedena simulace a verifikace činnosti robota. K simulaci bude využit software RobotStudio od ABB s.r.o., protože obsahuje modely průmyslových robotů ABB s.r.o. společně s virtuální řídicí jednotkou. Ověřené pracoviště bude poté sestaveno v laboratořích na základě 3D modelu.

Teprve po sestavení bude vytvořen celý program robota. Robot bude pomocí signálů řídit automatický cyklus souřadnicového měřicího stroje a zakládat předměty kontroly k měření. Vyhodnocením měření bude rozhodnuto o kvalitě předmětu kontroly, který bude robotem odložen do příslušné přepravky.

V závěrečné části práce bude popsána realizace pracoviště a kapitola s technicko-ekonomickým zhodnocením pracoviště. Technicko-ekonomické zhodnocení by mělo pomoci při rozhodnutí, jestli je automatizace vhodná a vyplatí se nahradit člověka v procesu kontroly kolaborativním robotem.



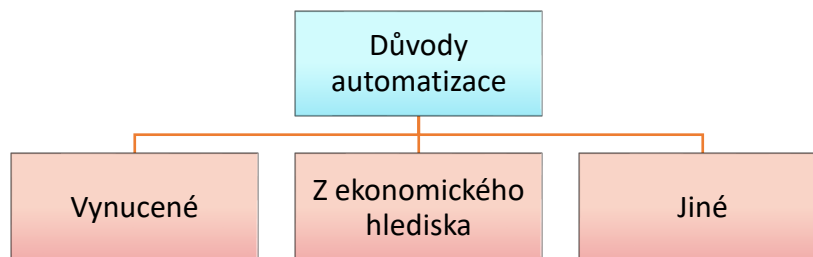
## 2 Automatizace a robotizace

Pojem automatizace vychází z řeckého slova *automatos*, které v překladu znamená samohybný neboli sám o sobě jednající. Jedná se o proces, kde je pracující člověk nahrazen pomocí technického zařízení, které zvládne pracovat samočinně (automaticky). Na rozdíl od mechanizace, která eliminuje pouze fyzicky namáhavé práce, automatizace nahrazuje nejen fyzické, ale především duševní řídicí činnosti. Tím odpadá určitá potřeba logického usuzování, výpočtů, rozhodování, nebo pamatování si informací, které bylo dříve závislé pouze na člověku. [1], [2], [3]

Automatizace představuje nedílnou součást technického vývoje a v současnosti se jedná o nejvyšší možný stupeň zvyšování efektivity výrobních procesů. Během vývoje dochází k zásadním změnám v charakteru i způsobu lidské práce. Zanikají, ale také vznikají nové pracovní pozice. Podstatný je také vliv na výkon ekonomiky, možnosti hromadné a sériové výroby, lidskou společnost a jiné nevýrobní oblasti. [1], [2], [3]

### 2.1 Důvody a přínosy automatizace

Důvodů pro automatizaci je značné množství, ale hlavním účelem je vždy plné nebo částečné nahrazení člověka v automatizovaném procesu. Obecně lze tyto důvody klasifikovat do třech základních skupin (viz Obr. 1). [1]



Obr. 1: Důvody automatizace [1]

Vynucená automatizace představuje situace, kde je nejčastěji potřeba úplného vyřazení člověka z určitého procesu. Tím může být například příliš velké hrozící nebezpečí (často smrtelné), nepříjemné pracovní prostředí s možnými zdravotními dopady, nízká výkonnost člověka (rychlost, přesnost), nepřístupnost prostředí (vesmír, mořské dno),

nedostatečná kvalita vykonané práce (jakost) a další procesy, které nemohou být prováděny člověkem. [1], [2]

Druhou skupinou jsou důvody založené na ekonomických hlediscích tržního hospodářství. Automatizace by měla přinést snížení výrobních (mzdové a materiálové úspory), nebo režijních nákladů (skladování, spotřeba energie, opotřebenění strojů). Mohla by také snížit výrobní čas a umožnit tím vyšší produktivitu a objem výroby. Zabezpečit mimořádnou jakost, zajistit konkurenční výhodu nebo dodat výrobkům funkční vlastnosti zvyšující jejich hodnotu. [1], [2]

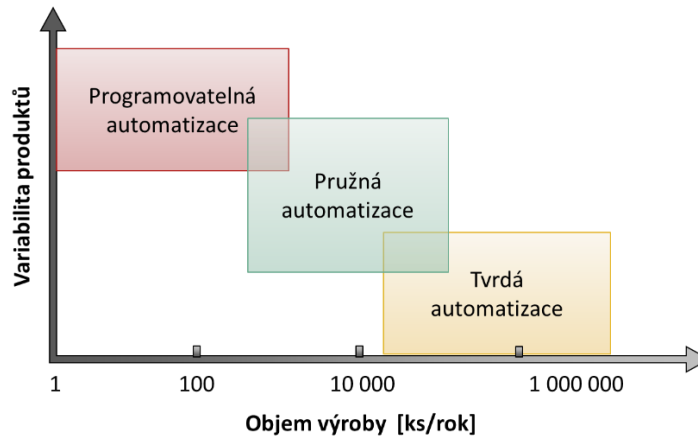
Poslední skupinou jsou všechny ostatní důvody, které není možné zařadit do prvních dvou skupin. Typickým příkladem může být prestiž podniku, kdy společnosti touto formou často prezentují své možnosti a schopnosti. Případným důvodem může být i zvýšení komfortu člověka, minimalizace nebo eliminace ekologických dopadů, bezprostřední dodávka informací člověku, nedostačující kapacita zaměstnanců (především kvalifikovaných), ale i zábava. [1], [2]

Ve většině případů je hlavním přínosem automatizace cílené snížení výrobních nákladů, díky kterému lze dosáhnout vyššího zisku. Nižších výrobních nákladů může být dosaženo pomocí eliminace drahé lidské práce, úsporou energií a materiálu, lepším vytížením výrobního zařízení, podstatným zvýšením jakosti, nebo také vhodnější organizací výrobních procesů. Zisk ovšem nemusí být vždy rozhodujícím faktorem. Přínosem automatizace může být možnost rychlejší reakce na požadavky zákazníků, zvýšení produkce, udržení konkurenceschopnosti, dosažení stability procesu, nebo také snadné získávání dat o průběhu celého výrobního procesu. [1], [2]

## **2.2 Automatizované výrobní systémy**

Pomocí automatizovaných výrobních systémů jsou automaticky prováděny různé činnosti od manipulace s materiálem, postupného zpracování, montáže až po kontrolu kvality. Člověk je z těchto činností částečně nebo úplně odstraněn a přebírá řídicí a kontrolní funkci nad těmito systémy. Typickým příkladem mohou být automatizované obráběcí stroje, dopravní linky, systémy automatizované montáže, automatická kontrola kvality, výrobní systémy využívající průmyslové roboty nebo systémy

manipulace a skladování. Automatizované výrobní systémy lze rozdělit do tří skupin na tvrdou, programovatelnou a pružnou automatizaci na základě objemu výroby a variability produktů. [1], [2], [3], [4]



Obr. 2: Tři typy automatizace rozdělené na základě objemu výroby a variability produktů [2]

Pro velký objem výroby s nízkou variabilitou produktů je vhodná tvrdá automatizace. Kvůli velkému množství vyráběných jednotek jednoho druhu je umožněna vysoká investice do specializovaného zařízení, které svou konfigurací stanoví posloupnost operací. Jednotlivé operace díky tomuto zařízení zahrnují obvykle snadné nebo méně komplikované pohyby a vyznačují se vysokou výrobní rychlostí, která je typická pro pevnou automatizaci. Nevýhodou je nízká flexibilita při výrobě různých produktů. [1], [2], [3], [4]

Naopak pro větší variabilitu výrobků vyráběných v menším množství jsou nejčastěji využívány programovatelné automatizované systémy. V tomto případě jsou výrobky vyráběny obvykle v dávkách a je nutné výrobní systém po každé dávce přeprogramovat pro nový odpovídající výrobek. Výrobní zařízení je tedy navrženo tak, aby bylo možné pořadí operací rychle měnit a přizpůsobovat různým produktům. Programovatelná automatizace se vyznačuje nižší výrobní rychlostí než pevná automatizace, vysokými investicemi do zařízení pro všeobecné použití a vysokou flexibilitou. [1], [2], [3], [4]

Pružná automatizace je rozšířením programovatelné automatizace. Jedná se o systémy, které jsou schopné se přeprogramovat tak rychle, že prakticky nedochází ke ztrátě výrobního času. Mezi charakteristiky pružné automatizace patří podmínka minimálních rozdílů mezi výrobky, kontinuální výroba variabilních součástí, střední výrobní rychlost

a flexibilita. Příkladem mohou být flexibilní výrobní systémy provádějící obráběcí procesy. [1], [2], [3], [4]

## 2.3 Robotizace

Významné postavení v oblasti zavádění automatizace výroby mají průmyslové roboty a manipulátory (PRaM). Především roboty se postupně staly hlavním symbolem automatizace 21. století, díky svým inovacím a technickým zlepšením, které jim dovolují provádět téměř jakékoli činnosti. Aktuální přesné množství instalovaných robotů nelze přesně určit, protože řada výrobců tyto informace nezpřístupňuje. Jisté ovšem je, že pouze tři největší výrobci robotů (FANUC, ABB, Yaskawa) mají dohromady na světě nainstalovaných více než 1 milion (rok 2017) průmyslových robotů a toto číslo každým rokem rychle stoupá. Současným tématem v oblasti robotizace je pokračující rozvoj kolaborativní robotiky, kamerových systémů a prvků umělé inteligence. [4], [5], [6]

V České republice se v roce 2017 prodalo přibližně 2900 robotů a hustota robotů se zvýšila na 119 robotů na 10 000 pracovníků. Množství prodaných robotů v posledních letech v tuzemsku meziročně stoupalo až o 47 %, a proto odhadovaný prodej robotů v roce 2019 bude v České republice kolem 6250 robotů. [4], [5], [6]

### 3 Průmyslové roboty a manipulátory

Pojem robot byl poprvé použit českým spisovatelem Karlem Čapkem v roce 1920 v divadelní hře R.U.R. (Rosums Universal Robots). Existuje několik možných definic tohoto pojmu, ovšem jednoznačná shoda mezi odborníky neexistuje. Jednu z možností uvádí Robotics Institute of America, který pojem robot definoval takto: „Robot je reprogramovatelný multifunkční manipulátor navržený pro přenášení materiálu, součástí, nástrojů nebo specializovaných zařízení, pomocí variabilně programovaných pohybů k provádění různých úkolů.“ Na základě jiných definic by zjednodušeně robot měl být libovolně programovatelným zařízením umožňující určitou formu mobility a umožňující práci v automatickém režimu. Pro statistické účely je navíc pro průmyslové roboty přidána podmínka nejméně tří reprogramovatelných pohybových os. Díky této podmínce se snadněji vykazuje množství zařízení, které je nasazeno v průmyslu. Klasický průmyslový robot se skládá ze tří hlavních částí. První z nich je mechanická jednotka a její motory, která definuje dosah robota, jeho přesnost, nosnost a rychlost. Druhou částí je řídicí jednotka robota (řídicí systém), která je zodpovědná za řízení pohonů mechanické jednotky, komunikaci přes zabudovaná rozhraní a řízení bezpečnostních systémů. Panel operátora (Teach pendant) je poslední hlavní částí kompletního průmyslového robota. Teach pendant slouží k posílání příkazů, editaci programů a sledování práce robota. [7], [8], [9]



Obr. 3: Hlavní části kompletního průmyslového robota

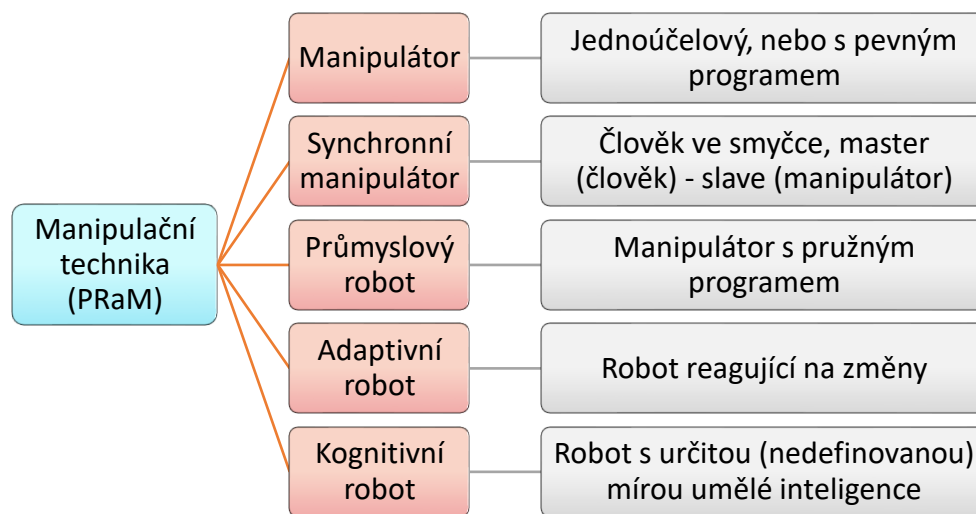
Dříve než průmyslový robot byl ve strojírenské výrobě k manipulačním účelům využíván průmyslový manipulátor. Manipulátory většinou pracují v cyklickém režimu a na rozdíl

od robotů nejsou řízeny řídicím systémem stroje. Z definice ISO vyplývá, že manipulátor od průmyslového robota lze rozeznat také podle počtu pohybových os. Pokud má manipulační zařízení méně než tři pohybové osy, vždy se jedná o manipulátor. Manipulátor může mít i více než tři pohybové osy, ale ty musí být neprogramovatelné. [7], [9], [10]

### 3.1 Rozdělení průmyslových robotů a manipulátorů

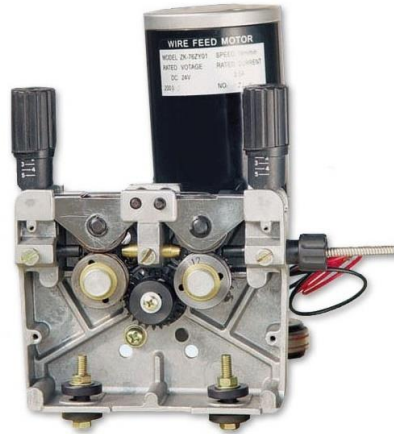
Průmyslové roboty a manipulátory (dále jen PRaM) lze klasifikovat podle mnoha kritérií. Kritériem rozdělení může být například počet stupňů volnosti, struktura kinematického řetězce, geometrie pracovního prostoru, vykonávané činnosti a oblasti nasazení, druhy pohonů nebo také rozdělení na základě vývoje definice manipulační techniky. [11], [12]

Z hlediska odlišností programování a řízení manipulační techniky je možné použít zmíněné rozdělení postavené na vývoji definice robotu.



Obr. 4: Schéma rozdělení PRaM na základě řízení a programování [11]

Jednouúčelové manipulátory nemají vlastní pohon a jsou poháněny strojem, pro který pracují. Do této skupiny patří jednouúčelové podavače a manipulátory, které jsou vyrobeny pro určitý druh stroje, pro daný výrobek a pro velmi jednoduchý pohyb (podavač papíru v tiskárně). Jednouúčelové manipulátory s pevným programem jsou obvykle řízené pevným programem daným vačkami. [9], [10], [11], [12]



*Obr. 5: Jednouúčelový podavač drátu pro svářečky MIG/MAG [13]*

Synchronní manipulátory, někdy označované jako teleoperátory, jsou zařízení vykonávající synchronizované pohyby člověka, který je ovládá. Řídicí systém zastupuje člověk, který pomocí ovládacích prvků (joystick, tlačítka nebo výjimečně exoskelet) určuje pohyby manipulátoru. Člověk tak dokáže libovolně přemísťovat velmi těžká břemena, pracovat v rizikových, nepřístupných či vzdálených prostorech nebo vykonávat činnosti, které jsou velmi citlivé na přesnost (medicína). Úkolem tohoto typu manipulátoru je nejčastěji snížení zatížení člověka, eliminace nedokonalostí (třes rukou) a zavedení činností v nevhodných podmínkách, kam člověk běžně nemá přístup. [9], [10], [11], [12]



*Obr. 6: Teleoperátor da Vinci [14]*

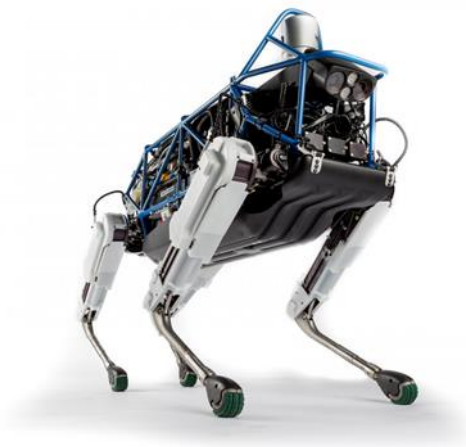
Průmyslové roboty jsou zařízení s automatickým řídicím systémem a programem, který lze snadno upravit. V současné době se jedná zřejmě o nejčastější řešení robotizace

v procesu výroby, kde je potřeba jakýmkoliv způsobem manipulovat s komponenty. Existují roboty, které se přizpůsobí téměř každému prostoru, lze je přimontovat na stěny, stropy, podlahy, nebo dokonce je integrovat přímo do prostoru stroje. Průmyslový robot může vykonávat obrovské spektrum činností, které jsou závislé pouze na programátorovi. Co zvládne člověk naprogramovat, to bude robot vykonávat. Průmyslový robot nedokáže sám reagovat na změny v procesu a nedokáže vytvořený program modifikovat. [9], [10], [11], [12]



*Obr. 7: Průmyslové roboty [15]*

Hlavním rozdílem adaptivního průmyslového robota od klasického průmyslového robota je náznak umělé inteligence. Adaptivní robot má schopnost prostřednictvím senzorů a čidel reagovat na změny pracovního prostředí. Vložený program se automaticky modifikuje na základě aktuálních dostupných informací. [9], [10], [11], [12]



*Obr. 8: Adaptivní robot Spot od společnosti Boston Dynamics [16]*



Kognitivní roboty jsou vybaveny umělou inteligencí v řídicím systému. Pomocí člověkem vytvořených a vložených algoritmů robot automaticky generuje program činností. Kognitivní robot by měl mít schopnost učit se na základě minulých zkušeností, schopnost přizpůsobit se procesu, schopnost zjednodušení problému (eliminace irelevantních informací), schopnost predikovat blízké budoucí děje nebo také umět určit vhodnou (optimální) variantu z několika možností. Kognitivní roboty disponují určitou možností vnímání a myšlení a snaží se přibližovat myšlení člověka, ale nedokážou projevat city. [9], [10], [11], [12], [17]

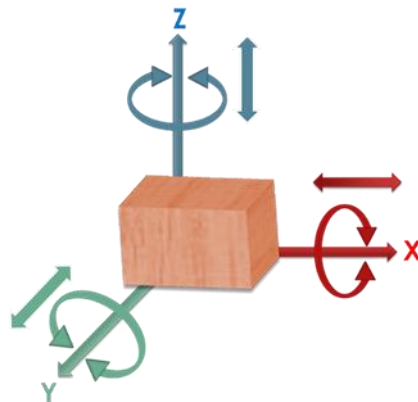


*Obr. 9: Kognitivní robot Asimo od společnosti Honda [17]*

Zatím nejvyšší předpokládanou, ale doposud nerealizovanou generací robotů jsou kognitivní roboty. V současnosti se jedná pouze o předpoklad dalšího vývoje robotů, který povede nejspíše ke změně chování robotů. Řídicí systém bude naprogramován tak, aby robot vykazoval sociální chování podobné lidskému chování. Robotovi již nebude nutné určovat činnosti, které musí udělat, protože si bude sám uvědomovat a plánovat, co je třeba. [7], [9], [17]

### 3.1.1 Počet stupňů volnosti

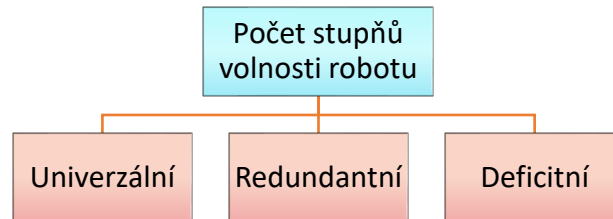
Průmyslové roboty můžeme také klasifikovat podle stupňů volnosti. Počet stupňů volnosti tuhého tělesa můžeme definovat jako počet možných nezávislých pohybů, které může těleso vykonat. Ve dvourozměrné rovině (XY), jako je například deska stolu, existují tři stupně volnosti. Předmětem lze pohybovat posuvným pohybem (translace) kolem os X a Y a pohybem rotačním okolo počátku souřadného systému. Pro tuhé těleso v prostoru existuje šest stupňů volnosti (viz Obr. 10), a tedy šest nezávislých pohybů, které může těleso vykonat. Těleso může vykonat tři translační (posuvné) pohyby v osách X, Y a Z a tři rotační pohyby kolem os X, Y a Z. Za předpokladu, že každý kloub robota má pouze jediný stupeň volnosti, robot potřebuje minimálně šest kloubů (os), aby robot mohl volně pohybovat tělesem v prostoru. Pokud každý kloub má právě jeden stupeň volnosti, je možné působení jednotlivých kloubů vyjádřit číselně pomocí natočení a posunutí. [7], [8], [9], [11]



Obr. 10: Šest stupňů volnosti tuhého tělesa v prostoru [7]

Podle stupňů volnosti můžeme průmyslové roboty rozdělit například do třech skupin na univerzální, redundantní a deficitní roboty. Univerzální roboty jsou nejrozšířenější průmyslové roboty s šesti stupni volnosti (osami). Univerzální roboty s využitím všech šesti os jednoznačně vymezi polohu a orientaci manipulovaného objektu v kartézském souřadném systému a patří mezi nejrozšířenější skupinu průmyslových robotů. Průmyslové roboty s méně než šesti osami, jsou označovány jako deficitní roboty. Většina deficitních robotů disponuje třemi nebo čtyřmi stupni volnosti a používá se například pro montáž prvků v rovině nebo paletizaci. V běžných případech jsou čtyři stupně volnosti dostatečné pro snadné přemístění objektu z jednoho místa na druhé.

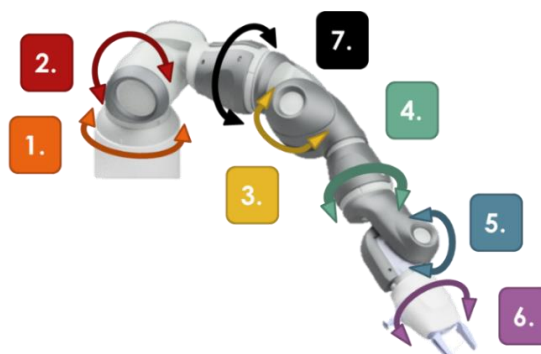
Poslední skupinou jsou roboty redundantní, které mají více než šest stupňů volnosti. Více než šest os umožňuje robotu snadnější pohyb ve stísněném prostoru a robot má větší volnost při obcházení překážek. [7], [8], [9], [11]



Obr. 11: Rozdělení průmyslových robotů podle stupňů volnosti (DoF) [11]

Robot, který disponuje šesti osami, sice může s předmětem manipulovat ve všech třech směrech a rotovat kolem os X, Y a Z, ale přesto se jedná o velmi omezující podmínku v porovnání s redundantními roboty. Lidská ruka také disponuje více než šesti stupni volnosti. Díky tomu může člověk při držení objektu v ruce snadno změnit pozici loktu, aniž by musel měnit orientaci a polohu drženého objektu. Přenesením na roboty je díky sedmé ose možné měnit pozici robotického ramena bez nutnosti změny polohy a orientace objektu. Sedmá osa nabízí také více možných konfigurací robotického ramene, a díky tomu snadnější programování v omezeném prostoru. Na druhou stranu robot ztrácí s dalšími osami svou tuhost, je komplikovanější a samozřejmě výrazně dražší. [7], [8], [9], [11]

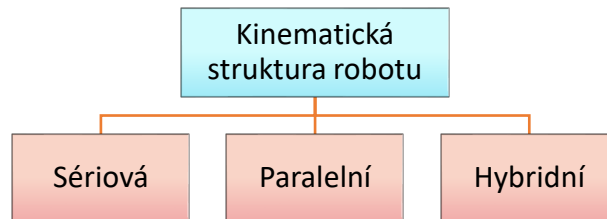
Nejdůležitější částí robotu jsou jeho hlavní tři osy (1, 2 a 3), které plní především funkci polohování robotického ramene. Další tři osy (4, 5 a 6) mají za úkol orientovat vhodně nástroj. Zbylé osy (7 a více) jsou v podstatě zbytečné a plní pouze funkci jednoduššího vyhýbání překážkám. Číslování os robotického ramene je zobrazeno na Obr. 12. [9]



Obr. 12: Číslování os sedmiosého robota

### 3.1.2 Kinematická struktura

Na základě kinematické struktury jsou roboty běžně rozděleny na sériové, paralelní a hybridní roboty. [11]



Obr. 13: Klasifikace robotů na základě kinematické struktury řetězce [11]

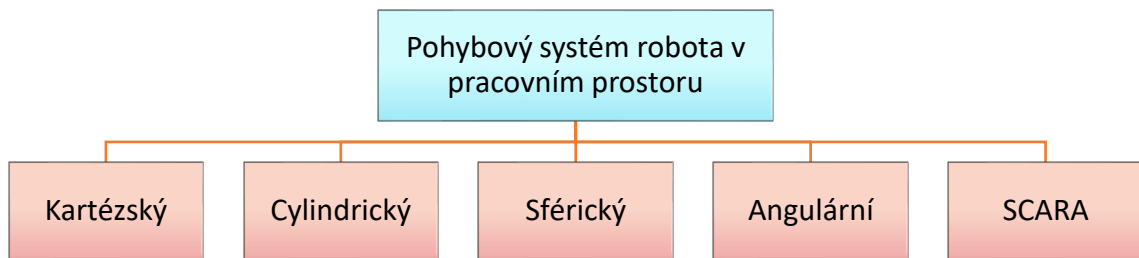
U sériových robotů je každá kinematická dvojice (dvojice pevných částí robota spojená kloubem) řazena sériově a dohromady vytváří otevřený kinematický řetězec. Toto konstrukční provedení lze využít téměř pro jakoukoliv činnost a představuje většinu používaných průmyslových robotů. Mezi hlavní nevýhody patří nižší tuhost, horší přesnost polohování a sumace chyb, které vznikly na jednotlivých kinematických dvojicích. Na druhé straně jsou roboty s paralelní kinematickou strukturou. Samotné členy robota jsou umístěny paralelně a nejsou přímo vzájemně spojeny. Jednotlivé části jsou spojeny až na konci kinematického řetězce a vytváří uzavřený kinematický řetězec. Paralelní roboty nabízejí vyšší tuhost a přesnost polohování, ale vyšší nároky na řídicí systém, a také možnost vzniku kolizí. Roboty s hybridní kinematickou strukturou kombinují obě možnosti. Nejčastěji se jedná o paralelního robota, který má na konci uzavřeného paralelního řetězce další sériově připojené části robota. [7], [9], [18]



Obr. 14: Ukázka sériového robota (vlevo) a paralelního robota (vpravo) [19]

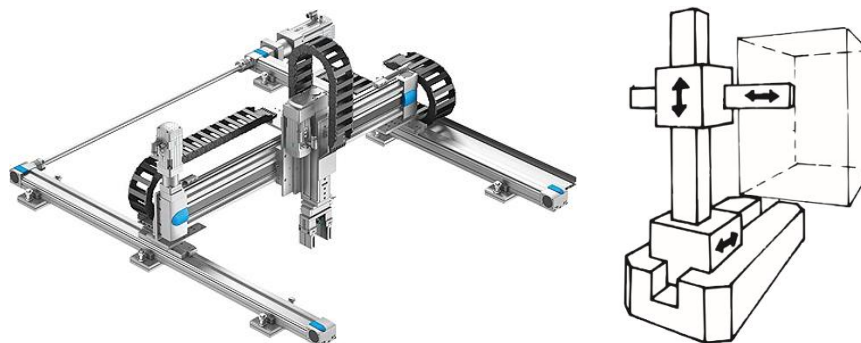
### 3.1.3 Geometrie pracovního prostoru

Robotické manipulátory můžeme také třídit na základě pohybu ramene robota v pracovním prostoru. Obecně jsou roboty kategorizovány na základě souřadnicového systému, který nejlépe reprezentuje typ pohybu robota. Výsledný typ pohybu je dán kombinací druhů pohybu (translace a rotace) základních kinematických dvojic robota, které jsou nejdůležitější pro změnu pozice nástroje robota v prostoru. [8], [9], [10], [11]



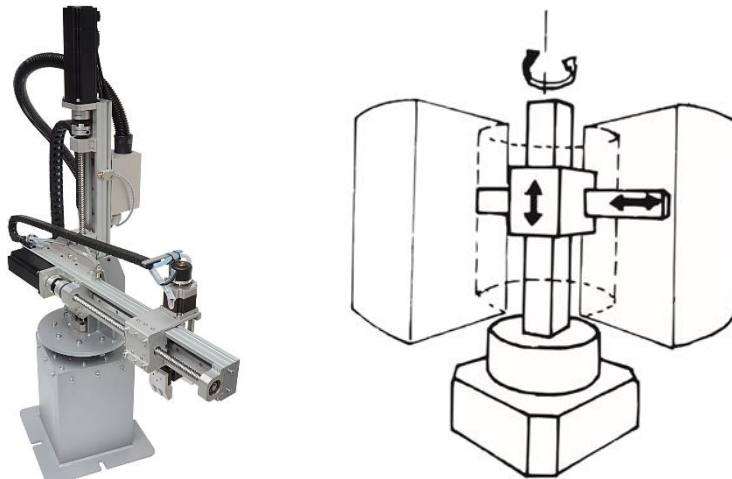
Obr. 15: Pohybový systém robota na základě souřadnicového systému [11]

Prvním typem jsou roboty, které využívají kartézský (pravoúhlý) souřadnicový systém. Tento typ pohybu je založen pouze na posuvném (translačním) pohybu všech tří základních kinematických dvojic. Kartézský robot (TTT) vykonává koordinovaný pohyb v osách X, Y a Z, které jsou na sebe vzájemně kolmé. Výsledný pracovní prostor, ve kterém se pohybuje nástroj, je ve tvaru hranolu. Během pohybu nedochází ke změně orientace manipulovaného objektu, a proto se tyto roboty používají na různé manipulační činnosti, kde není potřeba měnit orientaci předmětu (podavače, obsluha strojů). Výhodou je dobrá přesnost v celém pracovním prostoru. Naopak nevýhodou těchto robotů je velký zastavěný okolní prostor. [8], [9], [10], [20], [21]



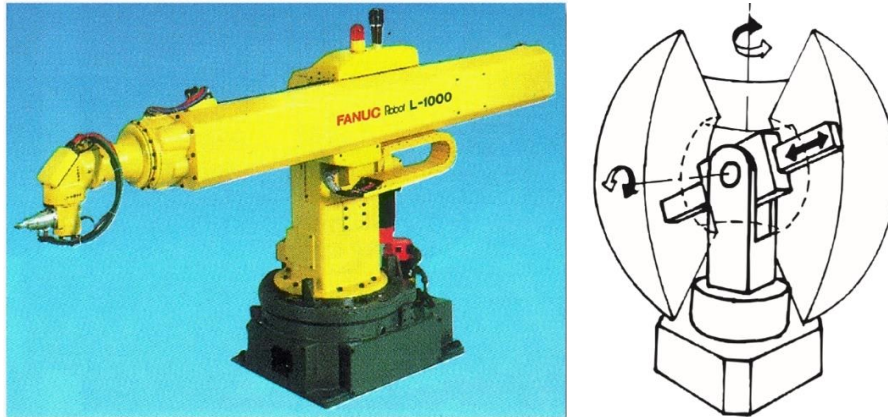
Obr. 16: Kartézský robot [21], [22]

U cylindrických robotů (RTT) je pohybový systém založen na jednom rotačním a dvou translačních pohybech. Ve většině případů se posuvný pohyb nahrazuje pohybem rotačním hned u první kinematické dvojice. Tato kombinace pohybů vede k pracovnímu prostoru robota ve tvaru válcového prstence. Velikost pracovního prostoru udávají v tomto případě osa Z (výška pracovního prostoru), osa R (maximální a minimální dosah ramene) a úhel natočení  $\Theta$ . Většina cylindrických robotů má maximální rozsah  $300^\circ$  a zbylých  $60^\circ$  je nazýváno „mrtvou“ zónou. Tato zóna slouží především jako bezpečná zóna v okolí robota. Cylindrický robot sice nepotřebuje tak velký zastavěný prostor jako kartézský, ale přesto pro manévrování vyžaduje větší prostor. Robot při manipulaci mění orientaci objektu a používá se například jako obsluha strojů na tlakové lití. [8], [9], [10], [20]



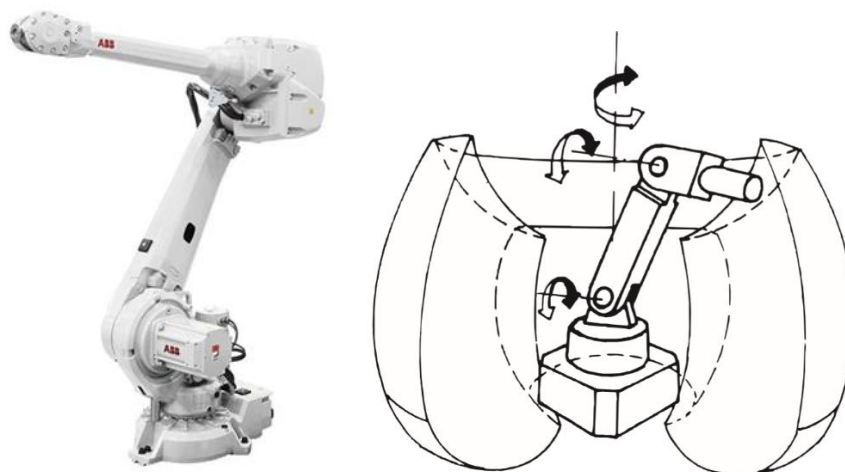
Obr. 17: Cylindrický robot [22], [23]

Pokud i druhou kinematickou dvojici s posuvným pohybem nahradí kloub s pohybem rotačním, vzniká robot se sférickým souřadnicovým systémem. Sférický pohybový systém (RRT) je tedy založen na dvou rotačních a jednom translačním pohybu. Hlavním rozdílem sférického a cylindrického robota je nahrazení osy Z, která pohybovala ramenem nahoru a dolů, rotačním kloubem s úhlem natočení  $\beta$ . Osa R a úhel  $\Theta$  jsou v tomto případě stejné jako u cylindrického robota. Pracovní obálka je u tohoto typu pohybu trochu složitější kvůli konstrukčním omezením úhlu  $\beta$ . Zjednodušeně se jedná o prostor mezi dvěma koulemi, který je ještě omezen o horní a dolní kruhovou výseč (viz Obr. 18). Tento typ robota se používá například pro svařovací linky a během manipulace dochází ke změně orientace objektu. [8], [9], [10], [20]



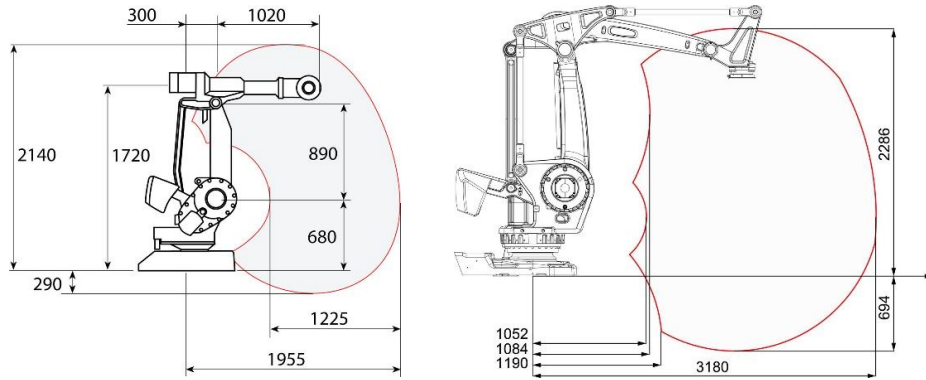
Obr. 18: Sférický robot [22]

Angulární roboty (RRR) se svým pohybem velmi podobají lidské ruce a jsou v praxi nejpoužívanější. Všechny tři klouby robota se pohybují pomocí rotace a v podstatě představují pas, rameno a loket člověka. Tyto roboty jsou velmi flexibilní a vhodné pro většinu průmyslových aplikací. Oproti ostatním sériovým robotům mají však výrazně složitější rovnice řízení kinematiky a dynamiky. Výhodou těchto robotů je minimální zastavěná plocha a snadná možnost rozšíření pracovního prostoru pomocí pojezdu nebo portálu. Angulární roboty (viz Obr. 19) mají také dobré dynamické vlastnosti, a proto dosahují vysokých rychlostí při manipulaci. Nevýhodou je horší tuhost a přesnost, která se zhoršuje s počtem kinematických dvojic a s délkou rotačních ramen. Pracovní obálka angulárních robotů je složitější a odvíjí se na základě konstrukce daného robota. Většinou se jedná o pracovní prostor připomínající tvar koule (pouze určitá část koule) viz Obr. 20. [8], [9], [10], [20]



Obr. 19: Angulární robot [19], [22]



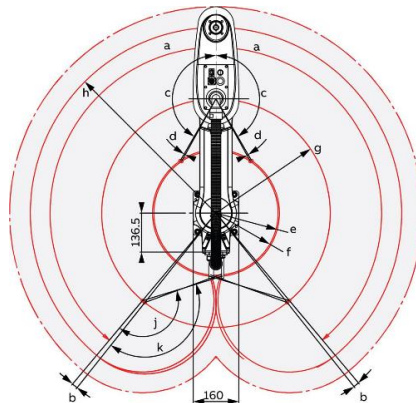


Obr. 20: Pracovní obálky robotů IRB 4400 (vlevo) a IRB 760 (vpravo) od ABB s.r.o. [19]

SCARA roboty (viz Obr. 21) stejně jako roboty sférické využívají dva rotační a jeden posuvný pohyb základních kinematických dvojic. Jedná se tedy o určitou modifikaci jednoho ze základních pohybových systémů. Výjimečností robotů SCARA je především uspořádání jejich rotačních os. V tomto případě jsou totiž všechny rotační osy rovnoběžné a robot tak díky tomu může napodobit mnoho lidských pohybů. Roboty SCARA se osvědčily svou vysokou rychlostí pohybu, a proto se využívají především pro vysokorychlostní montážní aplikace. Tvar pracovního prostoru (viz Obr. 22) je v tomto případě velmi závislý na pracovním rozsahu rotačních kloubů. [9], [20]



Obr. 21: SCARA robot [19], [24]

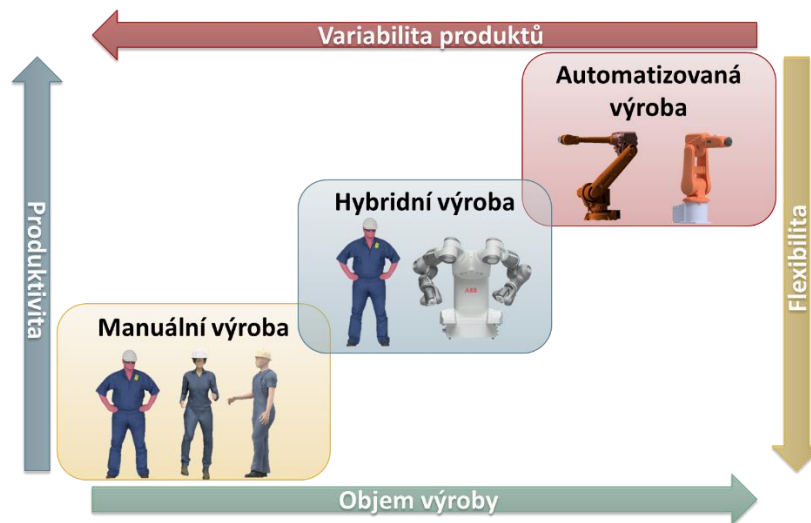


Obr. 22: Pracovní obálka robota IRB 910SC (SCARA) při pohledu shora [19]



## 4 Problematika kolaborativních pracovišť

Několik let zpátky byl vznik kolaborativní robotiky řadou odborníků považován za nemožný, protože z důvodu bezpečnosti by robot nikdy neměl spolupracovat přímo s člověkem. V současné době tomu tak zdaleka není a kolaborativní roboty jsou aktuálním tématem v oblasti robotiky. Důvodů pro vznik kolaborativních robotů bylo mnoho, ale možná nejdůležitějším bylo vyplnění „mezery“ mezi pružným a manuálním výrobním systémem. Vznikl tak hybridní systém, ve kterém práci vykonává robot společně s člověkem ve sdíleném pracovním prostoru. Tím lze dosáhnout větší flexibility než u klasických oplocených robotických pracovišť a zároveň větší produktivity než u manuálních pracovišť obsluhovaných pouze lidmi. Díky tomu se opět rozšířila oblast využití částečné automatizace i pro činnosti, které byly v minulosti vykonávány výhradně manuálně. [25], [26], [27]



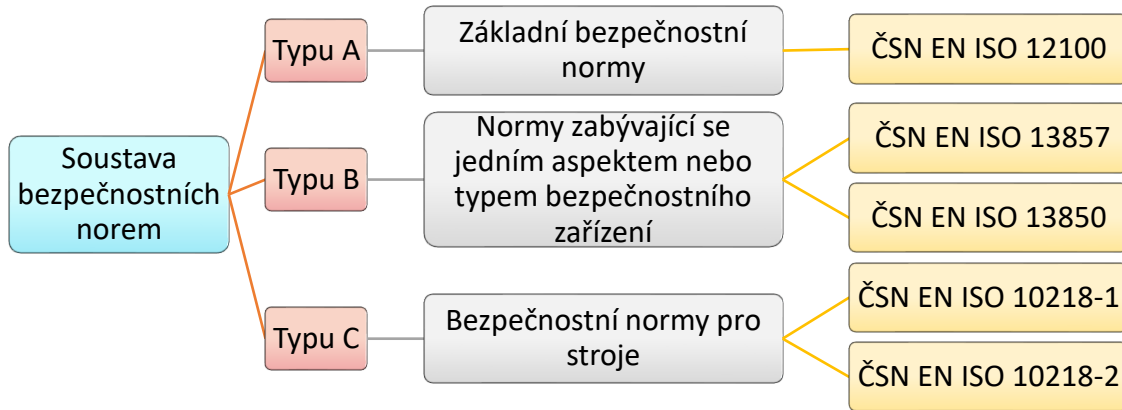
Obr. 23: Vymezení vhodné oblasti použití kolaborativní robotiky [26]

V případě kolaborativní robotiky se předpokládá společná práce člověka a robota ve sdíleném prostoru, a proto naprosto nejdůležitějším požadavkem na kolaborativní pracoviště je zajištění bezpečnosti člověka. [25], [26]

### 4.1 Bezpečnost kolaborativních pracovišť

Nástup kolaborativní robotiky byl velice rychlý a momentálně neexistuje norma zabývající se pouze kolaborativní robotikou. Proto je bezpečnost poměrně otevřeně

a prozatím neúplně vyřešené téma. V současné době je bezpečnost zajištěna soustavou bezpečnostních norem ISO a následnou certifikací dokazující, že robot bezpečnostní kritéria z norem splňuje. Soustavu bezpečnostních norem ISO lze rozdělit do třech skupin na normy typu A, B a C. [25], [26]



Obr. 24: Soustava bezpečnostních norem [25]

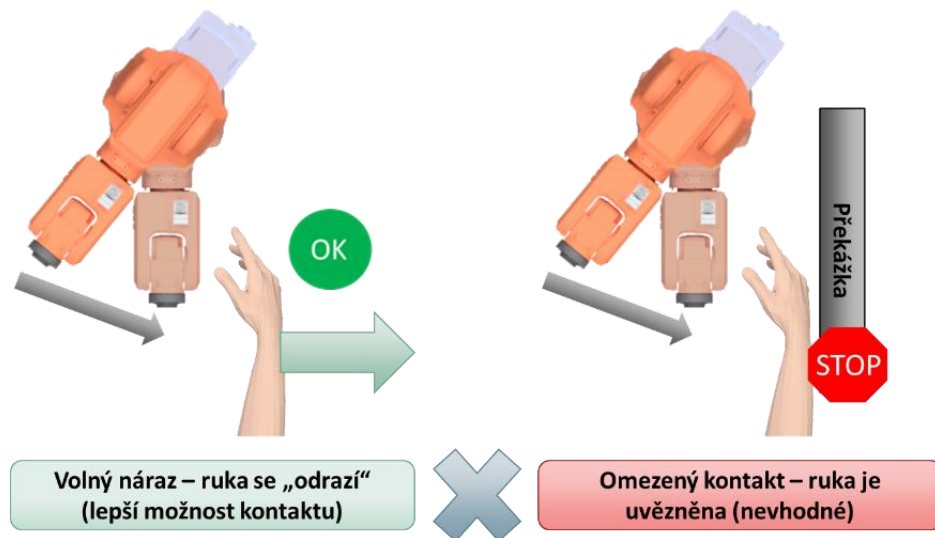
Jednoznačně nejdůležitější jsou převzaté normy ČSN EN ISO 10218-1 a ČSN EN ISO 10218-2, které se zabývají roboty a robotickými zařízeními, konkrétně požadavky na bezpečnost průmyslových robotů. První část se věnuje robotům samotným a druhá část popisuje integraci a systémy robotů. Součástí systému robota je navíc kromě samotného robota koncový efektor (nástroj) a manipulovaný díl. Kolaborativní robotika je v obou částech normy popsána velice stručně pomocí přehledu způsobů (viz 4.1.3), které zajišťují bezpečnost. Zásadní novinkou je vyvíjená technická specifikace ISO/TS 15066, která byla poprvé publikována v roce 2016 a přináší mnoho nových informací a doporučení pro tento obor robotiky. [25], [26], [28]

#### 4.1.1 Technická specifikace ISO/TS 15066

ISO/TS 15066 není norma, ale pouze technická specifikace. Tento dokument poskytuje informace a doporučení na základě aktuálních poznatků z oblasti technologie kolaborativních robotů, které jsou v současnosti považovány za správné. Řada těchto informací se teprve testuje a dokument se upravuje do vhodné podoby na základě zpětné vazby od uživatelů. Specifikace doplňuje informace uvedené v normách ISO 10218, určuje bezpečnostní požadavky na kolaborativní roboty a kolaborativní pracoviště a v budoucnosti se stane platnou normou. V současné době je však podle

autorů na její vydání příliš brzy, protože si nejsou obsahem zcela jistí. [26], [28], [29], [30]

Technická specifikace navazuje na normu ISO 10218 a detailněji popisuje čtyři hlavní způsoby zajištění bezpečnosti kolaborativního pracoviště. Především sledování rychlosti a vzdálenosti, a omezení výkonu a síly je popsáno podrobně. Na základě studie bolesti provedené na univerzitě v Mohuči (Mainz) byly definovány maximální silové a tlakové limity na 29 částech lidského těla, které by neměly být překročeny. Byly vymezeny dva druhy kontaktů člověka s robotem (viz Obr. 25). Prvním případem je volný náraz, kdy se část lidského těla „odrazí“ a kontakt trvá pouze několik milisekund. Horší možností je omezený kontakt, kde je část těla uvězněna mezi robotem a překážkou a kontakt je delší. [26], [28], [29], [30]



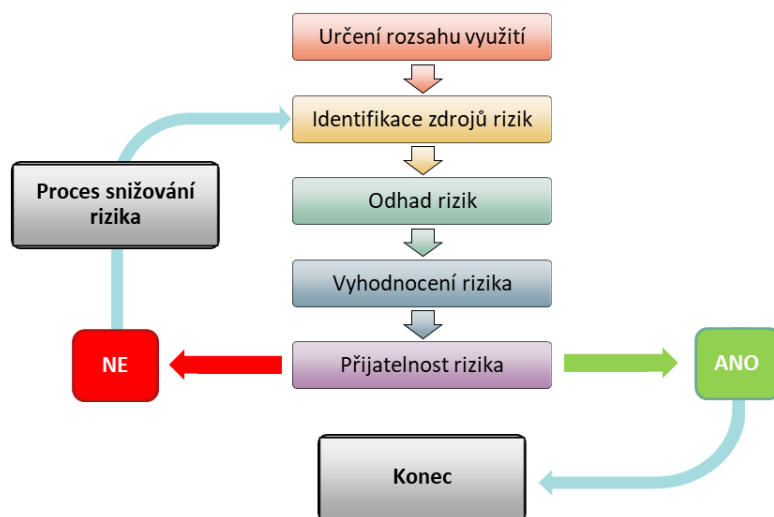
Obr. 25: Druhy kontaktů člověka a robota na kolaborativním pracovišti [29]

Dále ISO/TS 15066 doporučuje limity výkonu a síly a poskytuje návod na určení maximální rychlosti robota, aby koncový efektor nepřekročil maximální povolenou hodnotu. Popisuje posouzení rizik u kolaborativních aplikací, které je však téměř stejné jako u běžných (nekolaborativních) aplikací. Poskytuje také návrh kritérií na konstrukce kolaborativních robotů a přesné vymezení kolaborativního robota pro výrobce, kteří dříve nevěděli, jestli mohou daného robota prezentovat jako kolaborativního. [26], [28], [29], [30]

### 4.1.2 Posouzení rizik

Obecně hlavním účelem posuzování rizik v robotice je zajištění bezpečnosti pracovníků, kteří se pohybují v robotických buňkách. V případě kolaborativní robotiky je tento nástroj pro dosažení bezpečnosti obzvláště důležitý, protože dochází k přímému kontaktu člověka s robotem, který není úplně zastaven. Nejedná se pouze o použití bezpečného robota, ale také bezpečného příslušenství a celého pracoviště, které by mohlo člověka činností robota také ohrozit. Posouzení rizik je možné definovat jako identifikaci, hodnocení a odhad rizik spojených s danou aplikací, následné srovnání rizik s referenční hodnotou a stanovení přijatelné míry rizika. [27], [28]

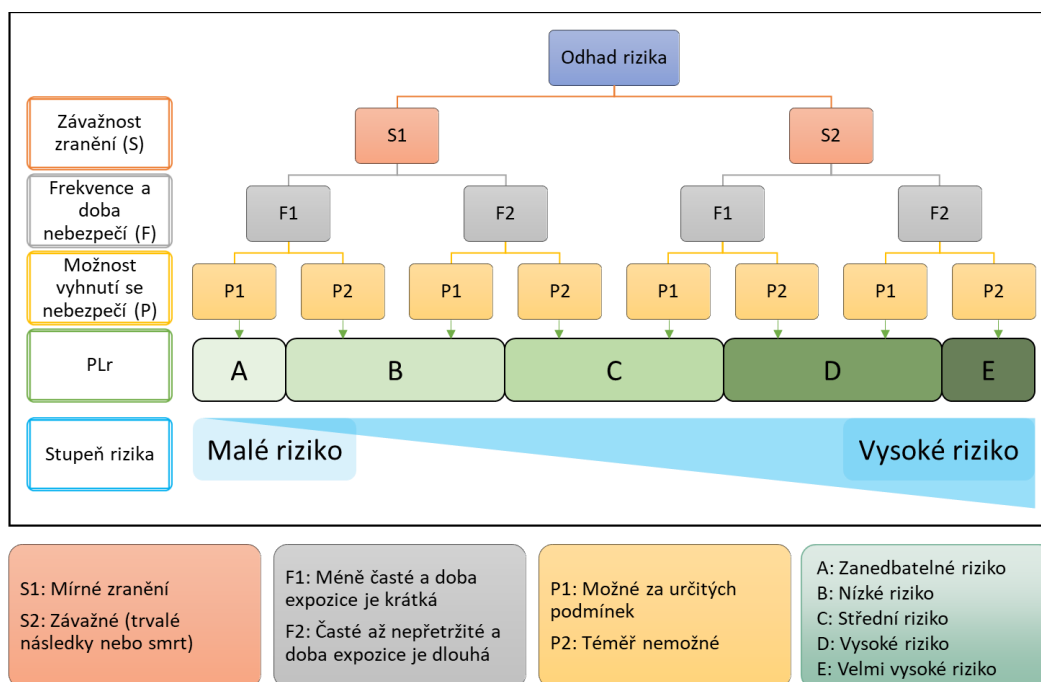
Pro zajištění bezpečnosti je nutné při integraci a návrhu robotických pracovišť splňovat příslušné normy (ISO nebo jiné) a zákony. Dodržování těchto bezpečnostních zákonů a norem je vyžadováno konkrétním státem, nebo bezpečnostní institucí zahrnující bezpečnostní normy. U větších společností se také obvykle zavádí interní přísnější bezpečnostní pokyny. Hodnocení rizika je poté založeno na jakémkoli zvoleném standardu, který je vyžadován danou oblastí, nebo standardu vyššího bezpečnostního stupně na celosvětové úrovni. Zjednodušený proces posouzení rizik je znázorněn na Obr. 26. [27], [28]



Obr. 26: Proces posouzení rizik [27]

Prvním krokem k posouzení rizik je určení rozsahu využití. Je nutné určit pracovní prostor robota, nástroje a příslušenství, stanovit předmět operace nebo také uvést maximální

limity robota (rychlost, zrychlení, užitečné zatížení). Následuje identifikace všech operací, které s sebou nesou jakýkoli druh nebezpečí. Zahrnují se i operace, kdy je robot vyřazen z provozu (například instalace robota). Po identifikaci je potřeba odhadnout míru rizika. Existuje několik způsobů, jak riziko monitorovat a odhadovat. Jednou z možností je odhad rizika podle normy ČSN EN ISO 13849-1:2006 na základě požadované úrovně vlastností (PLr<sup>1</sup>) pomocí tří parametrů (viz Obr. 27). Těmito parametry jsou závažnost poranění (S), frekvence a doba nebezpečí (F) a možnost vyhnout se nebezpečí (P). [27], [28], [31]



Obr. 27: Zjednodušený princip určení požadované úrovně vlastností (PLr) [31]

Dalším krokem je vyhodnocení rizika. K tomu je nejprve potřeba určit dosaženou úroveň vlastností (PL<sup>2</sup>). Hodnota PL definuje schopnost bezpečnostních součástí a opatření kontrolního systému zajistit bezpečnost za předvídatelných podmínek a stanovuje se na základě těchto čtyř hlavních aspektů: kategorie (Struktura), diagnostické pokrytí (DC<sup>3</sup>), hodnota střední doby do nebezpečné poruchy (MTTFd<sup>4</sup>) a poruchy se společnou

<sup>1</sup> Performance Level Rating

<sup>2</sup> Performance Level

<sup>3</sup> Diagnostic Coverage

<sup>4</sup> Mean time to dangerous failure

příčinou (CCF<sup>5</sup>). Největší vliv má kategorie, která na základě struktury určuje možnost ztráty bezpečnostní funkce v případě chyby. Nejjednodušší je kategorie B, která při jedné chybě ztratí bezpečnostní funkci. Nejsložitější je kategorie 4, kde při chybě existují další monitorující prvky zajišťující bezpečnostní funkci. DC je měřítkem účinnosti diagnostiky, která může být odhadnuta metodou režimů poruchy. MTTFd je očekávaná střední doba do selhání celého bezpečnostního systému a CFF se zabývá selháním různých položek, které vyplývají z jedné události. Z těchto aspektů je následně stanovena hodnota PL (viz Obr. 28). [27], [28], [31]

<b>1) Kategorie</b>		B	1	2	2	3	3	4	
<b>2) DC</b>		žádné	žádné	nízké	střední	nízké	střední	vyšší	
<b>3) MTTFd</b>	Nízká	a	-	a	b	b	c	-	<b>PL</b>
	Střední	b	-	b	c	c	d	-	
	Vysoká	-	c	c	d	d	d	e	
<b>4) CCF</b>		≤ 65 bodů			≥ 65 bodů				

Obr. 28: Zjednodušený princip určení dosažené úrovně vlastností PL [31]

Mezi potřebnou a dosaženou úrovní vlastností existuje jednoduchý vztah, kde dosažená úroveň vlastností musí být vždy stejná nebo vyšší než potřebná úroveň vlastností ( $PL \geq PL_r$ ). To zajišťuje, že každé riziko bude monitorováno nebo zabezpečeno zařízením, které může akceptovat úroveň přítomného nebezpečí. Pokud tedy požadovaná úroveň  $PL_r$  bude „C: střední riziko“, je potřeba, aby dosažená úroveň vlastností PL byla minimálně c, lépe d či e (viz Obr. 28). [27], [28], [31]

Když je riziko vyhodnocené, přichází otázka, jestli je toto riziko přijatelné. Ve většině případů je vyžadováno, aby míra rizika byla na zanedbatelné nebo nízké úrovni. Pokud tomu tak není, většinou jsou nutné další procesy ke snižování rizika. Po procesu snížení rizik je nutné celý řetězec posouzení rizik zopakovat (viz Obr. 26), aby se zajistilo, že snížení rizik nevytváří rizika nová. [27], [28]

Při procesu snižování rizik se obvykle nejprve klade důraz na opatření bezpečného návrhu, dále na zabezpečení a doplňkové opatření a až teprve poté na informace pro použití. Do opatření bezpečného návrhu kolaborativního procesu patří například použití

<sup>5</sup> Common Cause Failure

měkkého materiálu konstrukce, snížení energie (redukce užitečné nosnosti robota), snížení rychlosti nebo modifikace procesu. Mezi zabezpečení a doplňková opatření patří kryty, zámky, bezpečnostní snímače (krouticí moment), nouzové zastavení, použití bezpečnostních konfigurací a logických funkcí nebo jiného ochranného zařízení. Pokud rizika nelze už redukovat jinak, je nutné použít informace pro použití, kde jsou udávány pokyny pro práci, výstražná zařízení, nebo osobní ochranné pomůcky (ochranné brýle, rukavice, helma). [25], [27], [28]

### **4.1.3 Typy bezpečných kolaborativních operací**

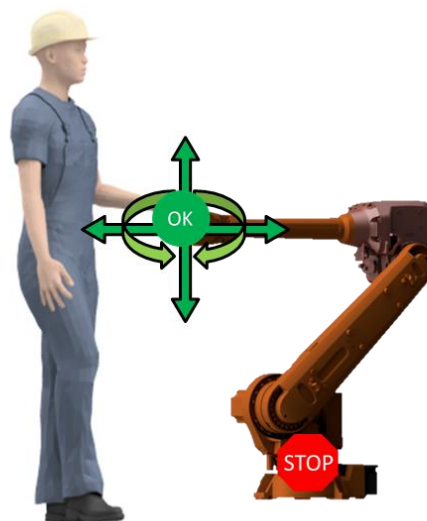
Bezpečnost na kolaborativním pracovišti musí být dle normy ISO 10218 zajištěna pomocí jednoho ze čtyř typů sdílení prostoru člověka s robotem. Tyto typy se nazývají: Bezpečnostní monitorované zastavení, Ruční navádění, Sledování rychlosti a vzdálenosti a Omezení síly a výkonu. U všech těchto typů je nutné zajistit bezpečnost celého kolaborativního pracoviště. Použití kolaborativního robota nezaručuje bezpečnost celého kolaborativního pracoviště. Naopak použití klasického průmyslového robota zase neznamená, že pracoviště nebude bezpečné. [32], [33], [34], [35]

Bezpečnostní monitorované zastavení (Safety Monitored Stop) je nejjednodušší způsob umožňující přístup člověka do pracovního prostoru robota. V tomto případě robot pracuje většinu času sám bez spolupráce s člověkem. Nejedná se o kolaborativní aplikaci v pravém slova smyslu, v jakém si spolupráci člověka s robotem běžně představujeme, ale spíše o společnou koexistenci v prostoru. Pracoviště je monitorováno laser skenerem, kamerovým systémem nebo bezpečnostními spínači, které detekují přítomnost člověka. Při vstupu obsluhy do monitorovaného prostoru robot aktivuje brzdy a zastaví veškerou činnost. Robot je však po celou dobu zásahu obsluhy zapnutý a po odchodu obsluhy, která mu z důvodu bezpečnosti musí dát pokyn, znovu automaticky pokračuje v programu. Monitorovaná oblast musí být dostatečně velká, aby robot stihl bezpečně zastavit. Tento typ spolupráce se využívá například pokud robot nese těžkou součást, na které obsluha musí provést určitou operaci, při výměně nástrojů, nebo nutné přítomnosti pracovníka v prostoru robota. [32], [33], [34], [35]



Obr. 29: Bezpečnostní monitorované zastavení

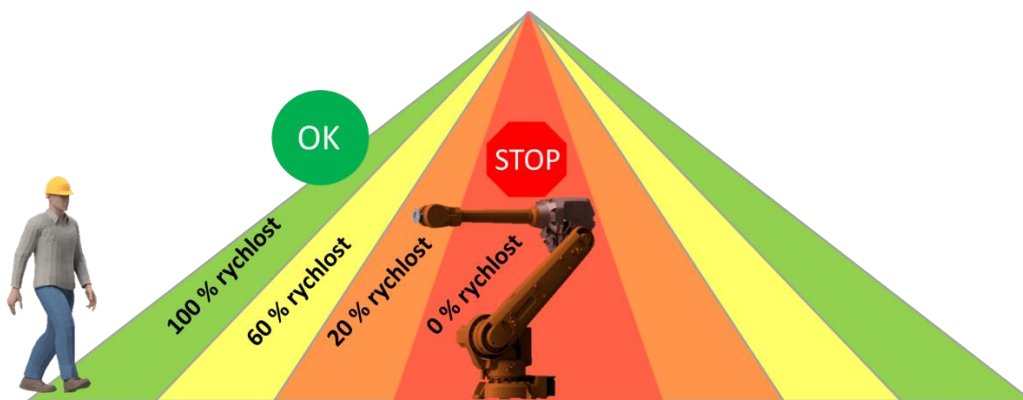
Ruční navádění se používá pro navádění robota, nebo také pro učení robota pomocí jeho vedení po trajektorii. Pokud je tedy potřeba rychlého naučení jednoduché úlohy typu „vezmi a umísti“ (pick and place), může být využit tento typ aplikace. Navádění robota je zase možné využít pro výrazné odlehčení úkolů obsluhy, kdy obsluha robota navede na potřebnou pozici a nechá robota vykonat naprogramovanou úlohu. Lze využít jak kolaborativní roboty, tak i klasické průmyslové s přídavným zařízením (nástrojem se snímačem momentu síly). Tento typ bezpečné spolupráce se vztahuje pouze na robota během funkce vedení obsluhou. Pro automatické činnosti robota je stále nutné zajistit bezpečnost pomocí jiného módu sdílení prostoru. Ruční navádění se využívá například na montážních linkách v automobilovém průmyslu, kde umožňuje zvýšit produktivitu zaměstnanců a eliminovat těžké pracovní úkony. [32], [33], [34], [35]



Obr. 30: Ruční navádění



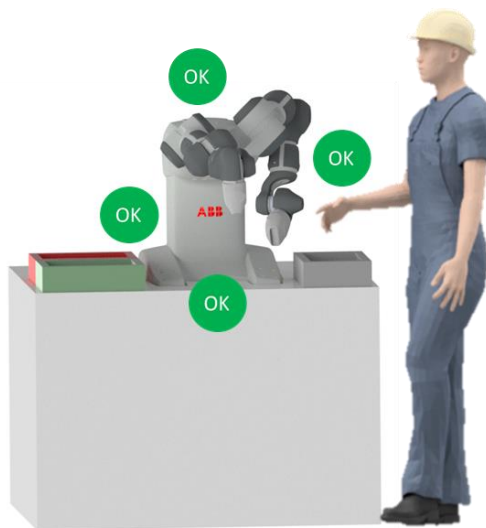
V případě sledování rychlosti a vzdálenosti je pracovní prostor a okolí robota rozděleno do několika bezpečnostních zón, nejméně však tří. Tento prostor je snímán pomocí laser skenerů, kamerových systémů nebo jiné monitorovací techniky. Při vstupu obsluhy do monitorovaných bezpečnostních zón dochází pouze ke zpomalení robota. Až teprve v poslední bezpečnostní zóně (červená), kde by mohlo dojít ke kontaktu robota s člověkem, dochází k úplnému zastavení robota. Zpomalení v předchozích zónách není z důvodu kolize (zóny nejsou v dosahové vzdálenosti robota), ale kvůli tomu, aby při vstupu do červené zóny robot stihl včas zastavit. Pracoviště v tomto případě většinou nejsou kompletně oplocena a k úplnému zastavení robota (neproduktivní časy) dochází v menší míře než u bezpečnostního zastavení. Při odchodu není nutné robotovi dávat zpětnou vazbu, protože činnost a rychlost robota je určena pouze pomocí bezpečnostních zón a robot se automaticky rozjede. Výhodou je větší produktivita a menší zastavěná plocha pracoviště. Proto je tento typ vhodnější pro pracoviště, kde je nutné využití průmyslového robota, ale zároveň se využívá operací, které vyžadují častou přítomnost člověka. [32], [33], [34], [35]



Obr. 31: Sledování rychlosti a vzdálenosti

S omezením síly a výkonu pracuje typ robotů, který může pracovat ve společném prostoru bez přídavných bezpečnostních prvků. Označení kolaborativní robot se používá nejčastěji právě pro typ robotů s omezením síly a výkonu. Na rozdíl od bezpečnostního monitorovaného zastavení a sledování rychlosti a vzdálenosti nedochází pouze ke koexistenci v prostoru, ale k neustálé spolupráci člověka s robotem bez nutnosti úplného zastavení robota. V případě omezení síly a výkonu je dovolen fyzický kontakt mezi operátorem a robotem. Kontakt může být úmyslný, kdy obsluha robota zastaví,

nebo odstrčí, ale také neúmyslný, kdy robot narazí do překážky (operátora). V obou případech je robot limitován tak, aby nezpůsobil člověku bolest a v žádném případě zranění. K zajištění bezpečnosti jsou využívány jak pasivní, tak aktivní bezpečnostní prvky. Mezi pasivní prvky patří nejčastěji zaoblené tvary a měkký materiál na povrchu robota, který pomáhá působící sílu při nárazu rozložit na větší plochu. V žádném případě by části robota neměly mít ostré hrany. Aktivní prvky jsou aktivně omezeny a jedná se především o limit síly a výkonu. Roboty pomocí integrovaných senzorů (momentové a rychlostní) nejčastěji sledují abnormální přetížení v motorech ve všech osách. Pokud dojde k přetížení z hlediska síly, robot je naprogramován tak, aby zastavil. Doporučené limitní hodnoty síly a výkonu pro různé části těla jsou definované v technické specifikaci ISO/TS 15066. [32], [33], [34], [35]



Obr. 32: Omezení síly a výkonu

## 4.2 Přehled kolaborativních robotů s omezenou silou

Výrobců kolaborativních robotů je na trhu velké množství a nebylo vhodné zde uvádět kompletní přehled všech dostupných kolaborativních robotů. Pro základní přehled byly vybrány kolaborativní roboty známých výrobců a roboty, které jsou něčím specifické a odlišují se od ostatních. Termín „kolaborativní robot“ může být pochopen různě, a proto je nutné ho upřesnit. Obecně jako kolaborativního robota chápeme každého robota, který je schopen fungovat v blízkosti člověka a v žádném případě neohrozí jeho bezpečí. Pokud tedy robot pracuje v jednom ze čtyř kolaborativních režimů práce,

nemusí být nutně omezený silou, aby mohl být považován za kolaborativního robota. Tento přehled byl ovšem zaměřen pouze na kolaborativní roboty s omezenou silou. Roboty s omezenou silou jsou zástupcem jedné ze čtyř skupin kolaborativního režimu práce a jsou často nazývány jako „Koboty“. Lze je tak snadno podle tohoto názvu odlišit od běžných průmyslových robotů, které pomocí bezpečnostních prvků pracují v jednom ze čtyř kolaborativních režimů práce. [36], [37], [38]

Kolaborativní roboty s omezenou silou jsou speciálně navrženy pro práci s lidmi. Mají nejčastěji zabudované senzory pro měření momentu síly a při přetížení okamžitě zastaví. Pokud dojde k nárazu, senzory detekují přetížení a dochází k zastavení činnosti robota tak, aby neohrozil člověka. To je hlavním důvodem, proč kolaborativní roboty s omezenou silou mohou pracovat vedle lidí bez nutnosti přidavného oplocení. Kvůli bezpečnosti je u těchto robotů typická nižší nosnost a rychlost pohybu ramene robota, aby robot stihl včas zastavit a náraz nezpůsobil člověku bolest. Dalšími znaky této skupiny robotů jsou oblejší tvary, aby síla při nárazu byla přenesena na větší plochu, nebo také použití měkčích a lehčích materiálů pro zmírnění nárazu. [36], [37], [38]

#### **4.2.1 ABB s.r.o. – YuMi (IRB 14000)**

YuMi od společnosti ABB s.r.o. je jeden z nejznámějších kolaborativních robotů na světě. Jedná se o lehkého robota (38 kg), který disponuje hned dvěma sedmiosými robotickými rameny. Může tedy pracovat jako dva nezávislé roboty, ale častěji je využíváno poměrně snadné synchronizace obou robotických ramen. Zajímavostí je umístění řídicí jednotky přímo do těla robota, nebo také řešení montáže robota k desce pracovního stolu. Pohybující se části robota (robotická ramena) jsou zaoblené a pokryté ochrannou pryží pro větší bezpečnost. V základu je robot vybaven na každém rameni koncovým efektozem v podobě rovnoběžných prstů, které také splňují veškerá kritéria bezpečnosti. Pro vylepšení funkcí lze robota vybavit integrovanou kamerou nebo přísavkami s přívodem vzduchu o tlaku 0,4 MPa. Cílovou aplikací robota je především drobná montáž, nejčastěji montáž drobné elektroniky. Důvodem je velmi nízká nosnost robota (jednoho ramene) pouhých 0,5 kg. Nízká nosnost je ale kompenzována přesností a dobrou rychlostí robota (1,5 m/s), konkrétně výrobcem uváděná opakovatelnost polohy je  $\pm 0,02$  mm. [36], [39], [40]

Tabulka 1: Technické specifikace robota YuMi [36], [39], [40]

YUMI (IRB 14000)					
Nosnost [kg]	Max. dosah [mm]	Opakovatelnost polohy [mm]	Hmotnost robota [kg]	Počet stupňů volnosti	Orientační cena (USD)
0,5 (2x)	500	± 0,02 mm	38	7 (2x)	40 000



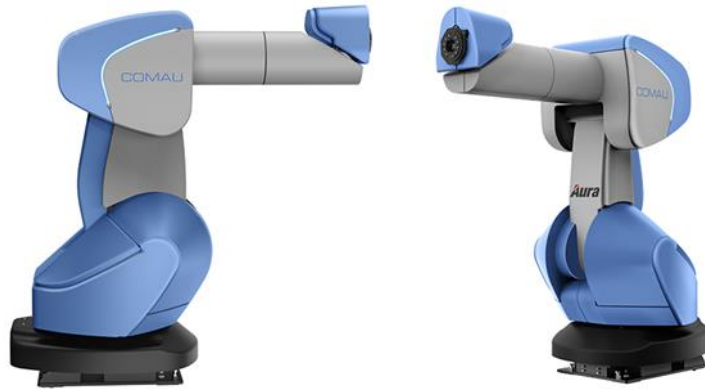
Obr. 33: Kolaborativní robot YUMI [41]

#### 4.2.2 Comau Czech s.r.o.– AURA

Společnost Comau Czech s.r.o. je jeden z výrobců průmyslových robotů, který svého kolaborativního robota AURA vytvořil úpravou již existujícího průmyslového robota. Klasického šestiosého robota pomocí přídatných bezpečnostních prvků společnost přeměnila na robota kolaborativního. Tělo robota je pro větší bezpečnost pokryto ochrannou vrstvou pěny a několika bezpečnostními senzory ukrytými pod krycí vrstvou na těle robota. Robot disponuje senzorem přiblížení, který při přiblížení člověka robota zpomalí a senzorem dotyku, který při dotyku s překážkou robota zastaví. Mezi výhody robota Aura patří vysoká nosnost a dosah v porovnání s ostatními kolaborativními roboty. Zajímavostí je také možnost vypnutí kolaborativního režimu a využití vyšší rychlosti robota. Mezi cílové aplikace patří především automobilový průmysl a manipulace s těžkými předměty v blízkosti člověka. [36], [42], [43]

Tabulka 2: Technické specifikace robota Aura [36], [43]

AURA -170-2.8					
Nosnost [kg]	Max. dosah [mm]	Opakovatelnost polohy [mm]	Hmotnost robota [kg]	Počet stupňů volnosti	Orientační cena (USD)
170	2790	± 0,1 mm	1615	6	n/a



Obr. 34: Kolaborativní robot Aura [42]

### 4.2.3 FANUC Czech s.r.o.– CR 35iA

Robot CR 35iA je největší z dostupných kolaborativních robotů od společnosti FANUC Czech s.r.o. Tento šestiosý robot je postaven z tradičního průmyslového robota, ale díky integrovaným bezpečnostním prvkům byl upraven na kolaborativního robota. Bezpečnost zajišťuje citlivý senzor momentu síly, který monitoruje veškeré pohyby robota, a ochranné měkké obložení z pryže pro zmírnění nárazu. Z důvodu větší nosnosti je robot vhodný pro obsluhu strojů, automobilový průmysl a těžší průmyslové aplikace. [36], [37], [44]

Tabulka 3: Technické specifikace robota CR 35iA [36], [44]

CR 35iA					
Nosnost [kg]	Max. dosah [mm]	Opakovatelnost polohy [mm]	Hmotnost robota [kg]	Počet stupňů volnosti	Orientační cena (USD)
35	1813	± 0,08 mm	990	6	n/a



Obr. 35: Kolaborativní robot CR35iA [36]

#### 4.2.4 KAWADA INDUSTRIES Inc.– NEXTAGE

Nextage je velice specifický kolaborativní robot. Svým tvarem konstrukce připomíná postavu člověka bez spodních končetin. Tento robot má celkem patnáct stupňů volnosti, dvě robotická ramena po šesti stupních volnosti, rotační osu v části robota připomínající trup a 2 rotační osy v části připomínající krk. Na „hlavě“ robota je integrovaná stereo kamera pro detekci změn v pracovním prostředí a měření vzdálenosti ve třech rozměrech. Bezpečnost zajišťují především motory robota, které jsou omezeny na pouhých 80 W, ale také omezená rychlost a nízká nosnost. Technologie se vzhledem ke konkurenci může zdát poněkud zastaralá, přesto se jedná o zajímavé řešení kolaborativního robota. Vhodnou aplikací pro robota bude montáž elektroniky a výrobků menších rozměrů a hmotností. [36], [45]

Tabulka 4: Technické specifikace robota NEXTAGE [36], [45]

NEXTAGE					
Nosnost [kg]	Max. dosah [mm]	Opakovatelnost polohy [mm]	Hmotnost robota [kg]	Počet stupňů volnosti	Orientační cena (USD)
1,5 (2x)	577	± 0,03 mm	29	15	60 000



Obr. 36: Kolaborativní robot NEXTAGE [36], [41]

#### 4.2.5 KUKA Automation ČR s.r.o.– LBR iiwa

Robot LBR iiwa byl prvním sériově vyráběným robotem umožňujícím spolupráci člověka s robotem bez nutnosti bezpečnostního oplocení. Jedná se o sedmiosého robota lehké konstrukce („LeichtBauRoboter“). Robot je vybaven velmi citlivými senzory pro měření

momentu síly. Oproti ostatním robotům s omezenou silou, které nejčastěji fungují na principu procházejícího proudu v motoru, tyto senzory detekují i velmi malé narušení ve všech sedmi osách. LBR iiwa se díky své lehké konstrukci, zakrytování převážně ze slitiny hliníku bez jediné ostré hrany, krátkým dobám odezvy při nárazu a menší nosnosti břemene, dokáže pohybovat poměrně rychle při aktivní kontrole omezené síly. Cílovou aplikací je především manipulace součástí (dílů), testování výrobků, obsluha strojů a paletizace. [36], [46], [47]

Tabulka 5: Technické specifikace robota LBR iiwa 14 R820 [36], [46]

LBR iiwa 14 R820					
Nosnost [kg]	Max. dosah [mm]	Opakovatelnost polohy [mm]	Hmotnost robota [kg]	Počet stupňů volnosti	Orientační cena (USD)
14	820	± 0,1 mm	29,9	7	70 000



Obr. 37: Kolaborativní robot LBR iiwa 14 R820 [41]

#### 4.2.6 Rethink robotics GmbH – Sawyer

Robot Sawyer byl navržen z původního konceptu robota Baxter, který byl jedním z prvních kolaborativních robotů vůbec. Rozdílem je možnost většího užitečného zatížení, mnohem lepší opakovatelnost polohy a vhodnost použití v průmyslu. Monitorování momentu síly pomocí integrovaných senzorů v každém kloubu robota a nízká nosnost robota dovolují vysokou rychlost pohybu nástroje až 1,5 m/s. Výrobce se také chlubí softwarovou platformou Intera, která umožňuje jednodušší programování i pro uživatele, kteří se doposud nesetkali s programováním robotů. Integrovaný modul Intera Insights zase poskytuje informace o výrobě v reálném čase na obrazovce namontované přímo na těle robota a dokáže anomálie predikovat dříve, než se stanou.

Výhodou může být také vestavěný kamerový systém Cognex, který robotovi pomáhá kontrolovat přítomnost a orientaci dílů. Robota je vhodné využít na paletizaci, kontrolu, manipulaci s lehkými díly, obsluhu strojů. [36], [48], [49]

Tabulka 6: Technické specifikace robota Sawyer [36], [48]

Sawyer					
Nosnost [kg]	Max. dosah [mm]	Opakovatelnost polohy [mm]	Hmotnost robota [kg]	Počet stupňů volnosti	Orientační cena (USD)
4	1260	± 0,1 mm	19	7	37 000



Obr. 38: Kolaborativní robot Sawyer [36], [49]

#### 4.2.7 Universal Robots A/S – UR3

Společnost Universal Robots A/S se během několika let stala jedním z nejdůležitějších zástupců kolaborativní robotiky. Společnost prodala více než 31 000 kolaborativních robotů a momentálně je největším výrobcem kolaborativních robotů na světě. Společnost vyrábí roboty ve třech různých velikostech s nosností 3 kg, 5 kg a 10 kg. Nízkou váhu a větší bezpečnost zajišťuje zakrytování vyrobené z hliníku a polypropylenu. Okamžité zastavení při nárazu zajišťují citlivé senzory monitorující moment síly. Výhodou kolaborativních robotů společnosti Universal Robots A/S je nižší pořizovací cena, online obchod UR+, kde společnost nabízí další doplňkové vybavení robota od kamer, koncových efektorů až po doplňkový software pro zajištění rychlé, hladké a bezrizikové integrace robota. Důležitou výhodou robota UR3 je také nekonečný pracovní rozsah třetího zápěstí robota (6. osa) s rychlostí otáčení až  $\pm 360^\circ/\text{s}$ , který lze využít například



při šroubování. Cílové aplikace robotů mohou být montáž, výdej, obsluha strojů, balení, výdej a testování produktů [36], [50], [51]

Tabulka 7: Technické specifikace robota UR3 [36], [51]

UR3					
Nosnost [kg]	Max. dosah [mm]	Opakovatelnost polohy [mm]	Hmotnost robota [kg]	Počet stupňů volnosti	Orientační cena (USD)
3	500	± 0,1 mm	11	6	28 000



Obr. 39: Kolaborativní robot UR3 [41]

#### 4.2.8 Parametry výběru kolaborativního robota

Každý kolaborativní robot má své výhody a nevýhody oproti ostatním a je vhodný pro odlišný typ aplikace. Srovnávacích parametrů, podle kterých lze hodnotit jednotlivé kolaborativní roboty, je mnoho. Mezi šest základních parametrů patří nosnost, váha robota, opakovatelnost, „bezpečnost“, obtížnost programování a dosah robota. [36]

Prvním zmíněným parametrem je nosnost neboli užitečná hmotnost, kterou robot může nést. Nosnosti udávané výrobcí jsou určeny bez váhy koncového efektoru. Pokud tedy bude využit robot s nosností 7 kg a váhou koncového efektoru 1 kg, může být manipulováno pouze se součástmi lehčími než 6 kg. [36]

Váha robota je dalším zásadním parametrem výběru. Lehčí roboty jsou více flexibilní a je možné je snadno přemísťovat ve výrobě bez použití manipulačního zařízení. Naopak pro přemístění těžkých robotů je potřeba tým zaměstnanců, který se postará o přemístění a následné upevnění robota na nové pozici. [36]

Třetím parametrem je opakovatelnost. Ta je v případě kolaborativních robotů zásadnější než přesnost, která je v tomto případě téměř zbytečnou specifikací. Důvodem je obvyklý princip programování kolaborativních robotů pomocí vedení rukou („Hand Guiding“). Proto je schopnost provést přesně naučený pohyb cennější než přesnost najít přesný bod v prostoru. Důležité je také zmínit, že hodnota udávaná výrobcem je maximální možná, pravděpodobně tedy bude opakovatelnost ještě nižší (lepší). [36]

Hodnocení bezpečnosti u robotů je trochu složitější, protože existuje mnoho různých akreditací pro zajištění bezpečnosti robota. Ohledně bezpečnosti je především podstatné si uvědomit, že i když je robot certifikován jako bezpečný, neznamená to, že celá aplikace a pracoviště splňují všechny bezpečnostní zásady. Vždy je tedy nutné následně provést posouzení rizik podle vhodné normy. [36]

Obtížnost programování je vždy subjektivní a je těžké ho hodnotit, protože každému uživateli vyhovuje jiný přístup. Rozdíly jsou především v metodách programování kolaborativních robotů, zatímco u některých výrobců se metoda příliš neliší od programování klasických průmyslových robotů, u jiných je přístup výrazně zjednodušený. Jednotlivé přístupy budou také různě vyhovovat začátečníkům a pokročilým programátorům. [36]

Posledním ze základních parametrů pro výběr kolaborativního robota je jeho dosah. Existuje více možných měření vzdálenosti, ale nejčastěji se jedná o maximální vzdálenost od základny, které může robot dosáhnout. [36]

Dalším parametrem výběru může být také rychlost. Ta je ovšem z důvodu bezpečnosti velice omezená a většinou úměrně klesá s maximální možnou nosností robota. Nezanedbatelná je samozřejmě cena, nebo znalost robotů a řídicího systému určitého výrobce. Otázkou při výběru může být také montážní poloha robota. Zatímco některé roboty lze umístit pouze v běžné poloze přidělané k podlaze (resp. pracovnímu stolu), jiné lze montovat na strop nebo stěny. Parametrů pro výběr je samozřejmě daleko více a záleží vždy na zvolené aplikaci. [36]

## 5 Návrh pracoviště automatické kontroly

Prvním krokem v rámci automatizace procesu kontroly kvality byl návrh pracoviště. V této kapitole je kompletně popsán návrh jednotlivých variant pracoviště. Návrh potřebného vybavení pracoviště a příslušenství robota pro zadanou úlohu. Návrh rozmístění pracoviště byl tvořen paralelně s návrhem jednotlivých komponent, které měly významný vliv na finální podobu pracoviště. Největší vliv měla volba základních vstupních parametrů, které z velké části předem určily vhodné rozmístění pracoviště.

### 5.1 Cíle zadání a motivace řešení

V oblasti automatizace (robotizace) je v současnosti testováno zavádění kolaborativních robotů na pracoviště, které bylo dříve velice těžké automatizovat kvůli nutné přítomnosti člověka. Zavedením kolaborativních robotů na tyto pracoviště je možné vyřešit nedostatek kvalifikovaných zaměstnanců, zvýšit produktivitu na pracovišti, snížit provozní náklady nebo třeba eliminovat vliv člověka na výrobní procesy. Cílem proto bylo vytvoření automatizovaného pracoviště kontroly kvality s nasazením kolaborativního robota. Kolaborativní robot by částečně vyřešil nedostatek kvalifikovaných zaměstnanců pro obsluhu souřadnicového měřicího stroje (dále CMM<sup>6</sup>), eliminoval vliv obsluhy při měření a při správném použití by měla být zvýšena celková produktivita pracoviště. Motivací řešení bylo zároveň možné snížení provozních nákladů, které by i přes vysokou vstupní investici do potřebného zařízení vedlo k možné úspoře.

### 5.2 Vstupní parametry

Pracoviště bylo vytvořeno ve spolupráci se společnostmi ABB s.r.o. a Carl Zeiss spol. s.r.o., a proto pro návrh pracoviště byly vybrány stroje těchto společností. Prvním zvoleným strojem byl kolaborativní robot YuMi od ABB s.r.o., který se nachází v laboratořích ústavu 12134 skupiny technologického projektování. Druhým vybraným strojem byl souřadnicový měřicí stroj DuraMax od společnosti Carl Zeiss spol. s.r.o., který byl pro účely tohoto projektu společností zapůjčen.

---

<sup>6</sup> Coordinate Measuring Machine

### 5.2.1 Kolaborativní robot (YuMi)

Hlavním důvodem použití kolaborativního robota YuMi (viz Kapitola 4.2.1) bylo zajištění bezpečnosti pracovníkům, kteří se pohybují v blízkosti pracoviště. Jedním z požadavků na pracoviště bylo dodržení vymezené zastavěné plochy (2,5 x 2,5 metru) pro kterou je použití kolaborativního robota YuMi velice vhodné. YuMi má dostatečný dosah a disponuje maximální opakovatelností polohy  $\pm 0,02$  mm, která je výhodná pro přesné umístění předmětu kontroly do přípravků pro měření. Zároveň je robot velice lehký a montuje se nejčastěji přímo k desce stolu. Díky tomu je flexibilní a může být snadno přesunut na jinou pozici. Zásadním hlediskem výběru byla samozřejmě dostupnost robota ve školních laboratořích a vhodnost robota k manipulaci s předměty kontroly.

### 5.2.2 Souřadnicový měřicí stroj (DuraMax)

Souřadnicové měřicí stroje (CMM) jsou významnou inovací v oblasti měření, která výrazně redukovala měřicí časy ve strojírenství. CMM jsou velice účinným prostředkem pro zvyšování a udržování jakosti ve výrobě, které slouží k měření geometrických prvků dílců. Geometrickými prvky může být například délka, průměr, úhel, sklon nebo rovnoběžnost. Existuje několik typů CMM s různými souřadnicovými systémy. Jednoznačně nejpoužívanějším typem je CMM s kartézskou soustavou. Princip v tomto případě spočívá ve stanovení základního bodu v prostoru a určování polohy všech bodů na součásti formou souřadnicových rozměrů v osách X, Y a Z. Jednotlivé parametry skutečného povrchu jsou z naměřených souřadnic dopočítávány pomocí počítačové techniky, která je zároveň využita pro kontrolu, jestli geometrický tvar dílce vyhovuje požadavkům. CMM lze klasifikovat na základě několika kritérií, například podle konstrukčního uspořádání (mostové, výložníkové, sloupové, portálové a jiné), s ohledem na hmotnost kontrolovaných dílců (pohyblivý stůl, pevný stůl), nebo také z hlediska přesnosti a způsobu použití. Většina CMM je dodávána se základní snímací hlavicí se sadou doteků, zařízením pro ustavení obrobku, počítačem, přenosným ovládacím pultem a dalším zařízením podle přání zákazníka. Je možné použít různé možnosti měření, které jsou využívány k měření jednotlivých bodů, spojitě snímání tvaru, nebo také spojitou kontrolu úchylek tvaru křivek. Kontrolní měření na CMM vždy obnáší sestavení plánu měření (např. strategie měření, přípravky na upnutí na stole), provedení

měření, vyhodnocení a následné protokolování. Oproti konvenčním metodám měření je hlavní výhodou CMM především vysoká rychlost a přesnost měření. Ta je ovlivňována řadou chyb, které mohou přesnost výrazně ovlivnit. Zdrojem chyb u CMM měření mohou být chyby souřadného systému (chyby kolmosti, přímosti, deformace stroje), snímacího systému (linearita, životnost), měřicího dotyku (průhyb), měřené součásti (povrch), chyby řízení, okolní podmínky (chvění, kolísání teploty), špatná volba strategie měření, ale i obsluha. Právě eliminace vlivu člověka na přesnost a rychlost automatické kontroly je jedním z cílů této práce. [52], [53], [54]

CMM DuraMax (viz Obr. 40) je stroj výložníkové konstrukce, který je navržen ve speciální řadě (MaxLine) měřicí techniky od společnosti Carl Zeiss spol. s.r.o., která je ideální pro nasazení přímo ve výrobě. Díky nasazení tohoto stroje je možné rychleji reagovat na výrobní chyby, v optimálním případě je možné se jim předem vyhnout. DuraMax je dodáván se skenovacím senzorem ZEISS VAST XXT, který umožňuje měření jednotlivých bodů i dotykové skenování pro rychlé a vysoce přesné měření. Výměna snímačů je prováděna automaticky ve výměnném zásobníku pomocí CNC řízení. Výhodou je velice úsporná konstrukce stroje, eliminace potřeby tlakového vzduchu a možnost přemístění stroje pouze s využitím paletového nebo vysokozdvizného vozíku. Pracovní deska stroje je litinovým odlitkem a je ustavena na podstavci na čtyřech základních podpěrách. V desce je 25 otvorů se závity M10, které slouží k připevnění přípravků k desce stolu. S úspornou konstrukcí souvisí i menší měřicí rozsah, který je v tomto případě pouhých 500x500x500 mm a je vhodný pro kontrolu menších dílců. DuraMax je teplotně stabilní v rozsahu + 18 °C až 30 °C a má integrovaný systém pasivního tlumení vibrací. [52]



Obr. 40: CMM DuraMax od společnosti Carl Zeiss spol. s.r.o.

Zásadním důvodem pro volbu CMM DuraMax byla jeho prostorově úsporná konstrukce, teplotní stabilita v rozsahu + 18 °C až 30 °C vhodná i pro měření v dílenském prostředí a maximální chyba měření  $2,9 + \frac{L}{200}$  [μm] platná ve zmíněném teplotním rozsahu. DuraMax má kompletně zakryté vodící dráhy se stupněm krytí IP54 proti vlhkosti a prachu. Zároveň nevyžaduje přívod tlakového vzduchu a disponuje integrovaným systémem pasivního tlumení vibrací. Hlediskem výběru byla podobně jako u robota YuMi jeho dostupnost, vhodnost pro kontrolu vybraného předmětu a možnost zapůjčení stroje od společnosti Carl Zeiss spol. s.r.o. [52]

### 5.3 Předmět kontroly kvality

Paralelně se stroji byl zvolen i předmět kontroly, který měl na výběr strojů zásadní vliv. Parametry při výběru předmětu kontroly byla především nízká užitečná nosnost robota a vhodnost tvaru pro automatické měření na souřadnicovém měřicím stroji DuraMax. Maximální možné zatížení robota YuMi je 0,5 kg na jedno robotické rameno od příruby. Tedy s odečtením váhy gripperu a vytvořených paralelních prstů zbývá přibližně 250 g na hmotnost předmětu kontroly. Zároveň při uchopení předmětu mezi paralelní prsty je vhodné, aby charakteristický rozměr součásti nepřekročil 50 mm. Na základě těchto požadavků byl zvolen jako předmět kontroly kvality jednoduchý kalíšek s vygravírovaným znakem ČVUT (viz Obr. 41). Kalíšek je svým tvarem ideální pro odebrání pomocí paralelních prstů s upraveným tvarem prstů kopírujících tvar kalíšku. Při odebrání z přípravků bude kalíšek vždy uchopen totožně díky tvaru a hornímu dorazu, který byl na prstech vytvořen. Tím jsou vykompenzovány možné nepřesnosti, aby nedocházelo k uchopení jednotlivých kalíšků v různých hladinách Z.



Obr. 41: Předmět kontroly kvality

## 5.4 Návrh vybavení pracoviště

Během návrhu rozmístění pracoviště byly souběžně navrženy a objednány všechny ostatní potřebné součásti pracoviště. Některé z nich však byly realizovány až na základě reálných rozměrů zakoupeného vybavení (předmět kontroly kvality, přepravky pro kalíšky). Pro pracoviště kontroly kvality bylo potřeba navrhnout například nový větší stůl, na který by se vešly všechny přepravky, vybrat vhodné přepravky, navrhnout přípravek do přepravek, přípravek na pracovní stůl CMM, nové paralelní prsty pro robota, přípravek na překládání předmětu kontroly, přípravek na přesné umístění přepravek a stůl pro počítač a ovládací panel CMM. Veškeré vybavení pracoviště bylo navrhováno v souvislosti s navrhovanými variantami pracoviště (viz 5.5), které výrazně ovlivnily finální podobu jednotlivých dílů.

### 5.4.1 Přepravky pro předmět kontroly kvality

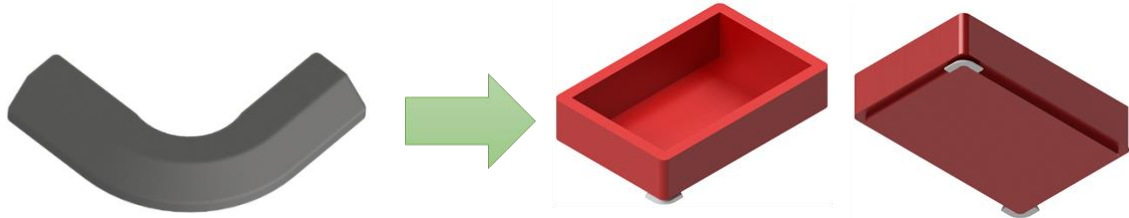
Pro účely zásobování pracoviště byly vybrány barevné přepravky (viz Obr. 42), které byly svou velikostí vhodné pro předměty kontroly. V šedých přepravkách byly na pracoviště dopravovány vstupní (nezkontrolované) předměty kontroly kvality. Ty pak na základě výsledku kontroly kvality byly umístěny do zelené (vyhovující) nebo červené (nevyhovující) přepravky. Vnější rozměry vybraných přepravek jsou 300x200x75 mm a vnitřní rozměry udávané výrobcem jsou 255x157x65 mm. Na základě vnitřních rozměrů přepravky a možnosti odebírání pomocí paralelních prstů byl stanoven počet předmětů kontroly v přepravce na 15 (5x3) kusů.



*Obr. 42: Barevné přepravky určené předmětům kontroly kvality*

Pro program robota bylo zásadní zaručit velice přesnou pozici přepravek na pracovním stole robota. Přepravky musely být snadno vyjímatelné a nahraditelné novými

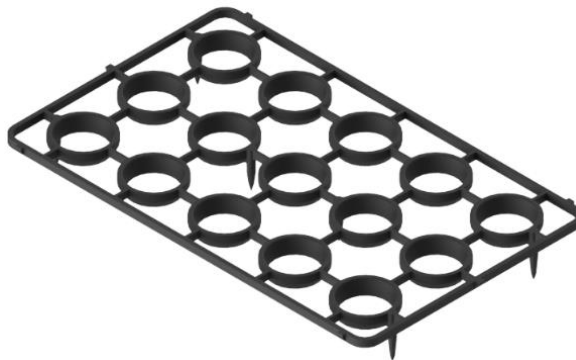
přepravkami s dalšími předměty kontroly kvality. Z tohoto důvodu byly navrženy a vytisknuty dvě protilehlé rohové zarážky (viz Obr. 43), které byly pevně připojeny k dřevěné desce stolu a polohou určovaly pozici přepravky na desce pracovního stolu.



Obr. 43: Zarážky pro zaručení přesné pozice přepravky na stole

### 5.4.2 Přípravky pro předmět kontroly

Pro určení přesné pozice předmětů kontroly kvality, která je zásadní jak pro CMM Duramax, tak pro připravený program robota bylo vytvořeno několik přípravků. Prvním z nich byl vytištěný vymežovací přípravek (Obr. 44), který byl součástí každé barevné přepravky. Tento přípravek jednoznačně určoval pozici předmětů kontroly ve všech třech souřadnicích. Jednotlivé otvory pro kalíšky byly od sebe vzájemně vzdáleny tak, aby se do prostoru mezi nimi vešly paralelní prsty robota. Přípravek byl také vybaven čtyřmi nožičkami na stranách a jednou kratší nožičkou uprostřed kvůli vypouklému dnu přepravky.



Obr. 44: Přípravek pro určení přesné pozice předmětů kontroly kvality v přepravce

Přípravek (viz Obr. 45) na pracovní stůl CMM Duramax byl obroben z oceli a k desce pracovního stolu CMM byl připojen pomocí šroubu. Z důvodu přesného měření musela být dutina přípravku velice přesná a svým tvarem kopírovat kuželovitý tvar předmětu kontroly kvality. Přesná pozice předmětu kontroly v přípravku byla zajištěna pomocí dvou vnitřních hran kuželovité dutiny.





*Obr. 45: Přípravek na pracovní stůl CMM*

Jedním z přípravků byl také vytištěný přípravek pro překládání předmětů kvality (viz Obr. 46), který byl využitelný pouze ve speciálních případech pro účel expozice pracoviště. V tomto případě byl využit cyklus pro 15 předmětů kontroly kvality, které byly po dokončení kontroly za pomoci tohoto přípravku přeloženy zpět do původní šedé přepravky a celý cyklus kontroly začal znovu. Tím pro účely expozice odpadla potřeba doplňování nových přepravek a automatický cyklus pracoval bez zásahu člověka.

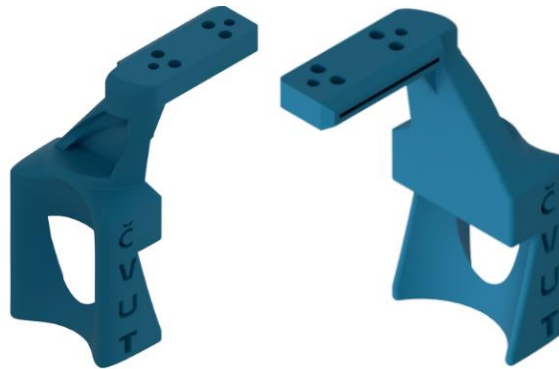


*Obr. 46: Přípravek pro překládání předmětů kontroly kvality*

### **5.4.3 Paralelní prsty pro robota**

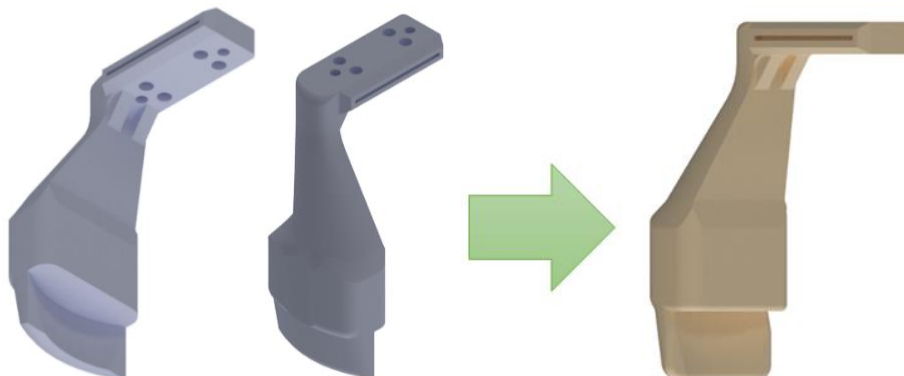
Zvolením předmětu kontroly vznikla potřeba nových paralelních prstů, protože použití původních prstů s rovnou plochou nebylo možné. Nově navržené paralelní prsty (viz Obr. 47) svým tvarem kopírovaly kalíšek a horní doraz sloužil k odebrání kalíšků vždy ve stejné hladině Z. Inspirací pro tuto verzi paralelních prstů byly původní prsty od

ABB s.r.o., pro které byly všechny rozměry známe. Kvůli zjednodušení byla velká část rozměrů stejná, aby například nové prsty měly stejný TCP<sup>7</sup> a jejich konfigurace byla jednodušší. Tato verze prstů byla větších rozměrů (široké a dlouhé), ale s výrazným odlehčením kvůli menší spotřebě materiálu. Velký důraz byl kladen také na reprezentativní vzhled. Problémem a důvodem nevyužití této varianty byly její větší rozměry, které po rozhodnutí o 15 pozicích uvnitř každé přepravky tuto verzi prstů zcela vyřadily.



*Obr. 47: První varianta paralelních prstů robota*

Ve druhé variantě (viz Obr. 48) byly prsty upraveny tak, aby byly výrazně menších rozměrů, ale zvládly odebrat kalíšky podle původního plánu. Tato verze prstů z důvodu testování byla poté vytištěna na 3D tiskárně a aplikována na robota. Vzhledem k uspokojivým výsledkům bylo rozhodnuto, že daná varianta se stane i variantou finální. Ačkoli prsty fungovaly perfektně, vhodnější a bezpečnější verzí pro zaměstnance by byla jejich zaoblená varianta, která ovšem z důvodu ceny tisku nakonec nebyla zrealizována.



*Obr. 48: Finální varianta paralelních prstů robota (vlevo) a zaoblená finální varianta (vpravo)*

---

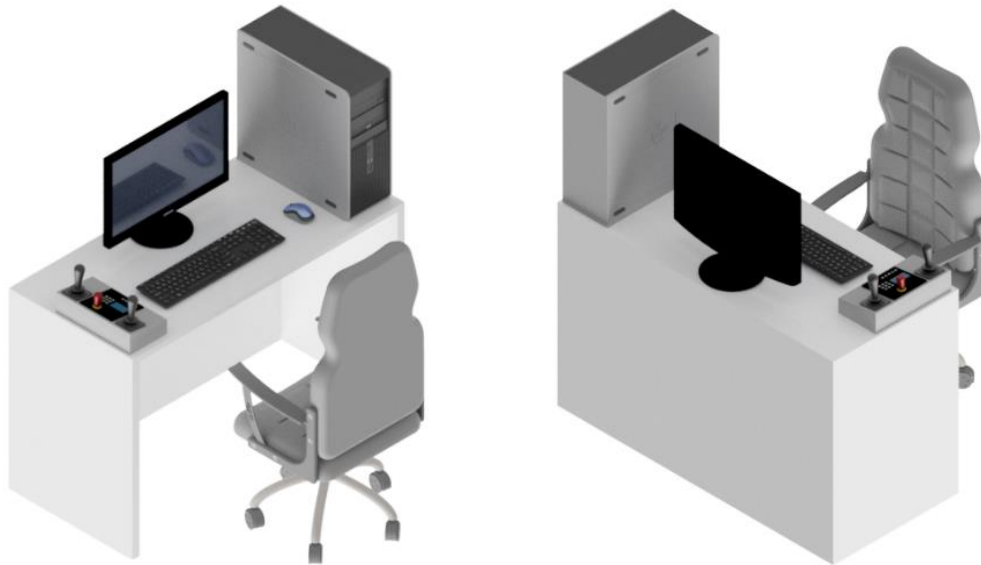
<sup>7</sup> Tool Center Point

#### 5.4.4 Stoly pro robota YuMi a CMM DuraMax

Kromě volby a rozmístění strojů bylo důležitou částí návrhu pracoviště navržení hlavního dřevěného stolu (viz Obr. 49) pod robota YuMi. Ten byl pomocí čtyř šroubů mezi podstavcem robota připojen k původnímu nosnému stolu a díky přesnému otvoru ve tvaru kontury robota původní stůl zcela zakryl. Na základě rozmístění přepravek na obou bocích stolu a kompromisu mezi dosahem robota a pozicí přepravek (aby nebyly až za robotem) byly určeny základní rozměry stolu 1100 x 800 mm. Výška stolu byla určena na 660 mm, aby nový stůl kompletně zakryl původní ocelový. Ve všech rozích stolu byly použity výškově stavitelné nožičky, pomocí kterých se stůl podepřel a boční desky pouze nevisely. Na Obr. 49 je vidět finální rozložení přípravků na stole.

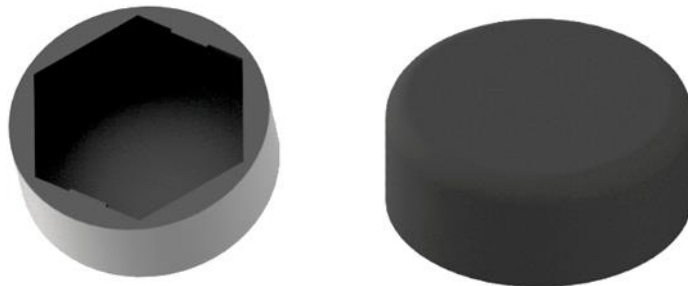


*Obr. 49: Hlavní stůl, který byl připojen pomocí šroubů k původnímu ocelovému stolu robota*  
Kompletní pracoviště obsahovalo také pomocný stůl pro řízení CMM DuraMax. Za tímto účelem byl navržen stůl menších rozměrů (1100 x 500 mm) pro počítač s velkým monitorem obsahující software Calypso, který je zásadní pro vyhodnocení provedené kontroly. Na stole měl být také umístěn řídicí panel CMM DuraMax.



*Obr. 50: Pomocný stůl pro pracoviště CMM DuraMax*

Na stolech pro lepší vzhled a eliminaci ostrých hran byly použity další drobné doplňky jako například vytištěné kryty na šrouby (viz Obr. 51).



*Obr. 51: Kryt na šrouby*

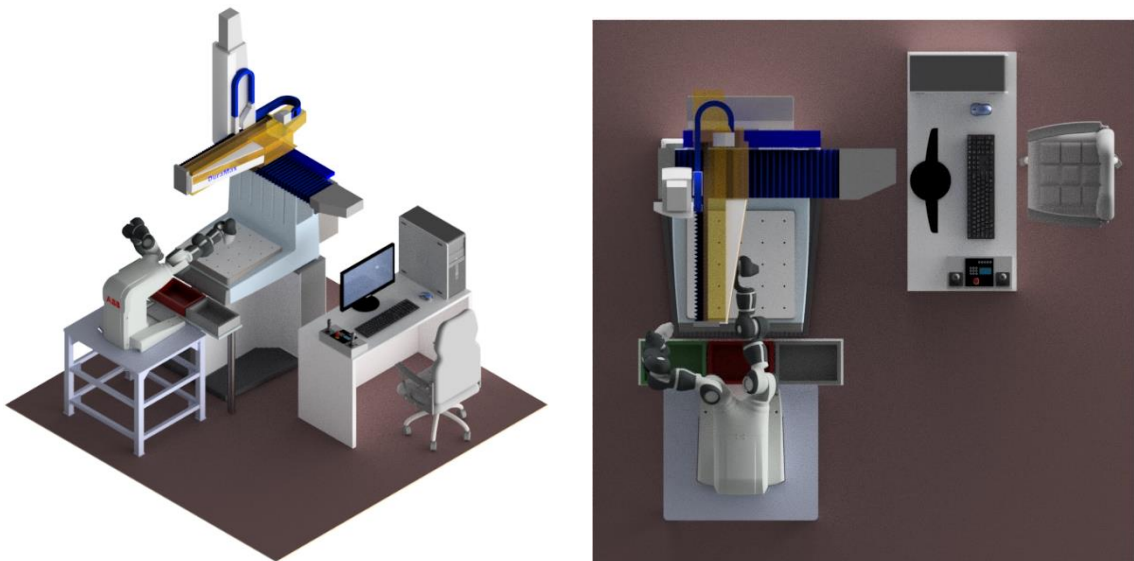
Tím byly navrženy a vybrány všechny potřebné komponenty pro finální variantu pracoviště (viz 5.5.5), které byly po ověření této varianty vyrobeny, nebo zakoupeny.

## 5.5 Návrh variant pracoviště

S návrhem jednotlivých částí (vybavení) pracoviště bylo paralelně zpracováno i jeho kompletní rozmístění, a proto v následujících variantách jsou zobrazeny zjednodušené podoby pracoviště s využitím navrženého vybavení bez přípravků a s reálnými rozměry pracoviště.

### 5.5.1 Varianta 1

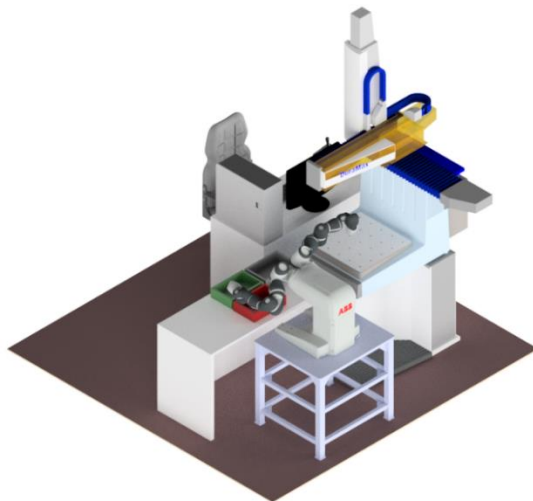
Pro první navrženou variantu (viz Obr. 52) byl využit původní ocelový stůl, ke kterému byl robot YuMi v laboratořích přimontován. Robot byl postaven čelem k CMM DuraMax a mezi oba stroje byl umístěn přídatný stůl. Stůl byl přimontován k původnímu stolu pomocí předem připravených otvorů tak, aby byla poloha přídatného stolu vůči robotu neměnná. Stůl s vybavením CMM byl umístěn na pravé straně v dostatečné vzdálenosti od CMM tak, aby byl Duramax přístupný z obou stran i zezadu. Tato varianta nebyla zvolena z důvodu sníženého dosahu robota na pracovní stůl kvůli umístění přepravek mezi robota a CMM. Robot sice dosáhl doprostřed pracovního stolu, ale nevykonal by přímočarý pohyb potřebný k umístění předmětu kontroly do přípravku. Druhým důvodem bylo estetické hledisko. Přídatný stůl nepůsobil dobrým dojmem. Pod robotem by byla vidět řídicí jednotka a kabeláž mezi robotem a CMM.



*Obr. 52: První varianta návrhu pracoviště (robot naproti CMM)*

### 5.5.2 Varianta 2

Druhou variantou (viz Obr. 53) bylo umístění robota bokem k CMM s přídatným stolem před robotem. V této variantě by muselo činnost vkládání a odebírání předmětu kontroly zabezpečit pouze jedno robotické rameno. Tím by se prodloužil vedlejší čas, kdy neprobíhá měření. Zároveň by druhé robotické rameno v tomto případě zřejmě nemělo dostatečné využití. Přídatný stůl nebyl v této variantě připojen k původnímu a hrozilo jeho posunutí. Tato varianta byla zcela nevhodná z mnoha důvodů.



Obr. 53: Druhá varianta návrhu pracoviště (robot bokem k CMM)

### 5.5.3 Varianta 3

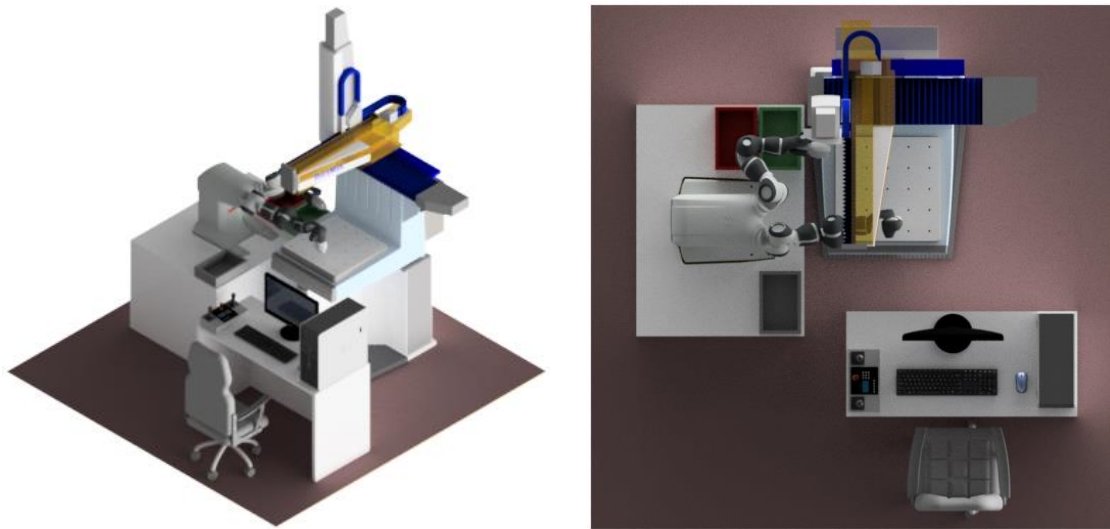
Ve třetí variantě (viz Obr. 54) bylo použito stejné rozmístění pracoviště jako v první variantě, ale s novým stolem pro robota. Aby nemusel být vyráběn úplně nový stůl, bylo využito původní konstrukce, ke které byla přimontována vrchní dřevěná deska s otvorem ve tvaru kontury robota. Zároveň byl původní stůl ze všech stran zakryt bočními deskami s uzamykatelnými dvířky pro přístup k řídicí jednotce robota. Do původního stolu byly současně navrženy police, které sloužily k uschování ovládacího panelu a ostatního náhradního příslušenství robota. Tato varianta nebyla zvolena kvůli horšímu dosahu doprostřed pracovního stolu CMM.



Obr. 54: Třetí varianta návrhu pracoviště (robot naproti CMM)

### 5.5.4 Varianta 4

Ve čtvrté variantě (viz Obr. 55) bylo ověřeno použití robota z boku CMM s novým širším, ale kratším stolem. Přepřavky na stole byly přemístěny vedle robota tak, aby robot mohl být umístěn blíže k CMM a zvýšil se jeho dosah. Tato varianta byla možná, ale robot byl v pohybu zbytečně omezen konstrukcí CMM a hrozilo by také větší riziko kolize. Propojení pomocí kabeláže by se v tomto případě perfektně ukrylo, ale stůl s robotem by bránil v přístupu z jedné strany k CMM. Pomocné pracoviště pro DuraMax by se nevešlo z boku a muselo by být umístěno před nebo za CMM.

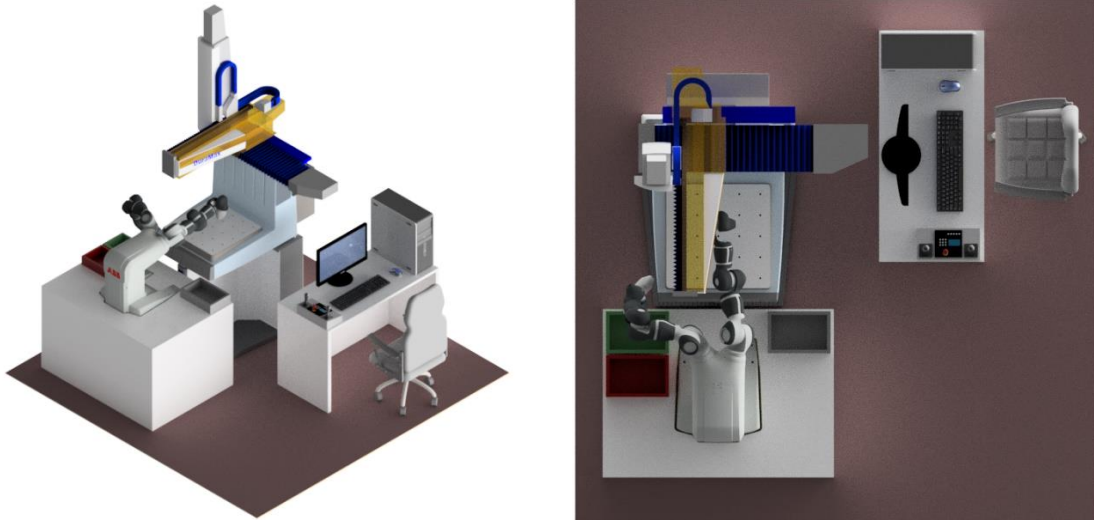


Obr. 55: Čtvrtá varianta návrhu pracoviště (robot z boku CMM)

### 5.5.5 Varianta 5

Jako pátá varianta (viz Obr. 56) bylo zvoleno umístění robota čelem naproti CMM s širokým stolem a přepravkami na stranách. Robot má větší dosah než v ostatních variantách a měl by být schopen přímočaře vkládat a odebírat předmět kontroly do přípravku na pracovním stole CMM. Výhodou je dobrý přístup k CMM DuraMax z obou stran i zezadu.





Obr. 56: Pátá (finální) varianta návrhu pracoviště (robot naproti CMM)

## 5.6 Rozhodnutí o finální variantě pracoviště

Z navržených variant byla poté vybrána finální varianta pracoviště. Hlavními parametry výběru bylo: splnění podmínky maximální zastavěné plochy pracoviště, dostatečný dosah robota, který byl zásadní pro umístění předmětů kontroly do přípravku a vhodnost pozice robota z hlediska programování. Všechny navržené varianty splnily podmínku zastavěné plochy pracoviště. Největší dosah robota a zároveň jeho vhodnou pozici z hlediska programování zajistila pátá varianta. Především z důvodu dosahu a pozice robota byla tato varianta určena jako finální (viz Obr. 56).

Pro finální variantu byla následně provedena simulace a verifikace pracoviště. Hlavním důvodem bylo ověření dosahu, protože robot byl umístěn zřetelně níž než pracovní rovina CMM, a proto byl při návrhu pracoviště požadován co největší možný dosah robota. Robot v současném stavu pracoviště nešel posunout výš, protože to neumožnil původní ocelový stůl, který byl využit.



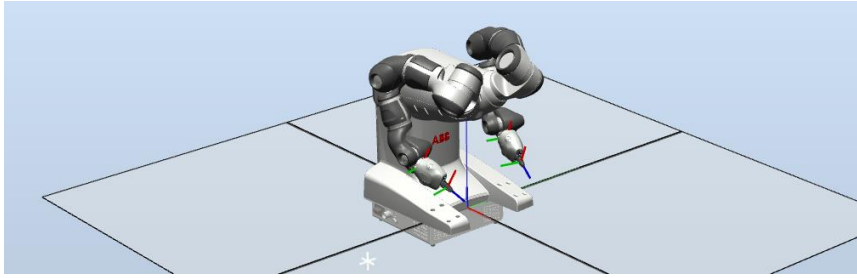
## 6 Simulace a verifikace zvolené varianty pracoviště

V této kapitole je popsána provedená simulace a verifikace páté (finální) varianty pracoviště. Vzhledem k následné realizaci projektu byla verifikace zásadní z hlediska odhalení případných nedostatků pracoviště před nákupem a výrobou jednotlivých komponent. Pro účely simulace a verifikace byl využit software RobotStudio od společnosti ABB s.r.o. Tento software obsahuje knihovnu dostupných robotů ABB s.r.o. společně s virtuálním řídicím systémem. Robot studio slouží převážně pro offline programování robotů, ale díky reálné simulaci robotů ve virtuálním prostředí lze v tomto softwaru ověřit navrhovaná varianta pracoviště. Nejdříve bylo vytvořeno kompletní pracoviště s importovaným robotem IRB 14000 z knihovny programu. Následně byly vytvořeny targety, které byly použity pro tvorbu programových rutin. Targety jsou jednotlivé cílové pozice v prostoru s orientovaným souřadným systémem. Všechny programové rutiny byly poté synchronizovány a doplněny o virtuální signály pro správnou funkci nástroje robota. Celkem byly vytvořeny čtyři programové rutiny pro založení dvou předmětů kontroly do přípravku a jejich uložení druhým robotickým ramenem do zelené a červené přepravky. Modelový popis činnosti vytvoření jedné rutiny je uveden v kapitolách 6.1 a 6.2.

Před simulací a verifikací bylo ještě vhodné zjednodušeně popsat skladbu programu robota pro lepší pochopení používaných termínů. Program robota IRB 14000 (YuMi) se skládá ze dvou úloh, kde každá úloha představuje jedno robotické rameno. Každá úloha se skládá z několika programových a systémových modulů. Ty obsahují všechny programové rutiny, data programu, jejich interpretace a další potřebné informace pro správnou funkci programu robota. Programová rutina je základní část programu, kterou programátor vytváří přidáváním jednotlivých programových instrukcí.

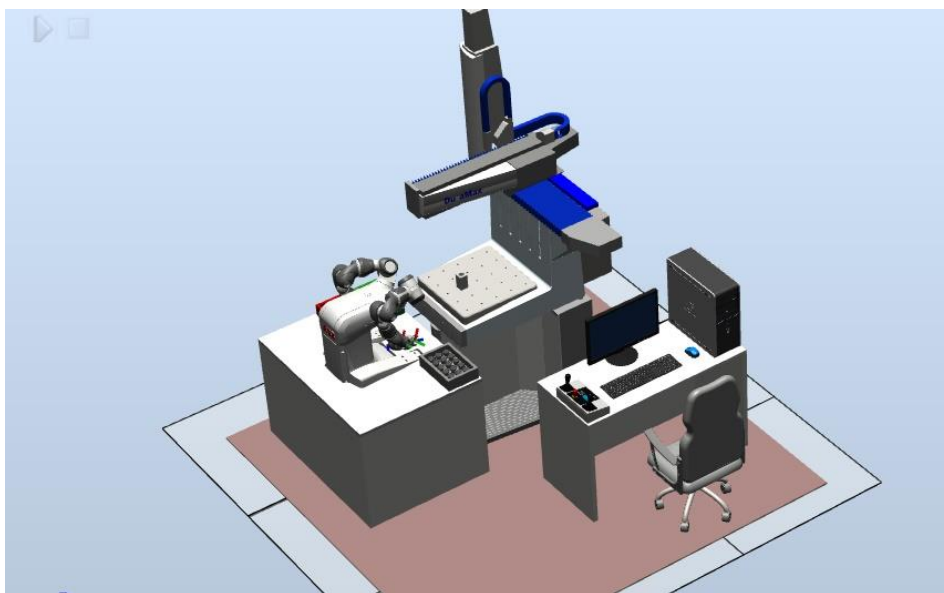
### 6.1 Založení projektu a sestavení pracoviště v RobotStudiosu

Při založení projektu byl zvolen robot IRB 14000 a RobotStudio automaticky přiřadilo virtuální řídicí systém a vytvořilo novou stanici s importovaným modelem vybraného robota (viz Obr. 57) bez nástrojů. Použité nástroje byly importovány z dostupné knihovny od ABB s.r.o. a vhodně umístěny k přírubě obou robotických ramen.



*Obr. 57: Vytvořená stanice s robotem YuMi (IRB 14000)*

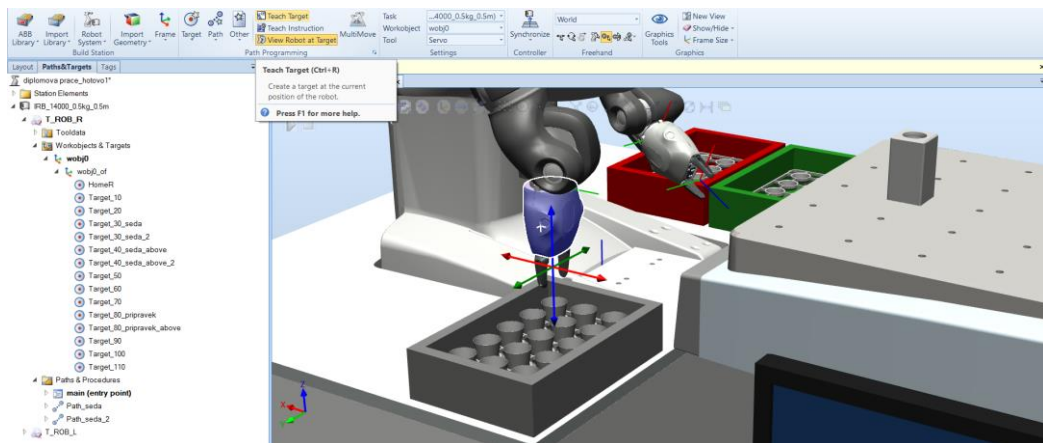
K provedení simulace a verifikace činnosti robota byl potřeba model pracoviště. K tomu byl využit model finální varianty pracoviště vytvořený v softwaru Autodesk Inventor. Model s reálnými rozměry byl doplněn o přípravek na pracovním stole CMM DuraMax a vyexportován ve formátu sat, který se používá pro import geometrie v RobotStudio. Model bylo nutné částečně opravit, protože modely strojů obsahovaly plochy, které se původně nepodařilo ve formátu sat do RobotStudia přenést. Pracoviště se importovalo počátkem souřadného systému do stejného souřadného systému jako robot, a proto bylo nutné pomocí úpravy pozice robota správně umístit ke stolu. Pro správné umístění byla využita dostupná kontrola měření v softwaru Autodesk Inventor. Přemístění bylo poté provedeno v softwaru RobotStudio jednoduchým přepsáním hodnot posunutí a rotace robota od počátku souřadného systému. K úplné kompletaci pracoviště (viz Obr. 58) byly poté importovány předměty kontroly do vstupní (šedé) přepravy, které jsou potřebné pro vytvoření pohybových instrukcí.



*Obr. 58: Kompletní pracoviště v softwaru RobotStudio*

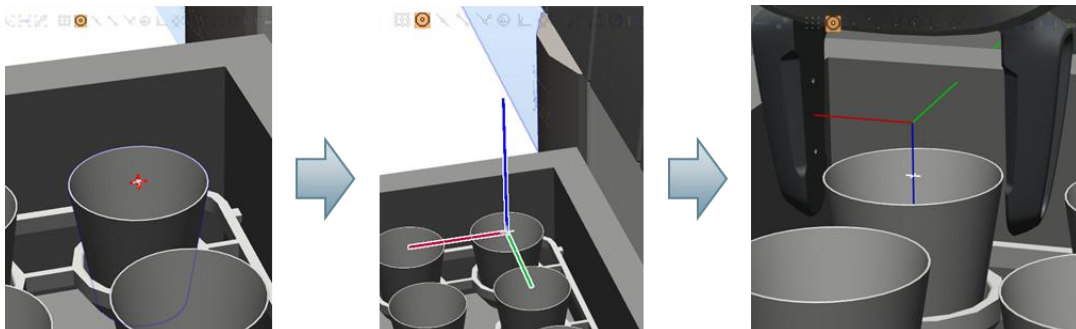
## 6.2 Vytvoření targetů

Prvním krokem bylo vytvoření targetů (viz Obr. 59), pomocí kterých se vytvořila výsledná pohybová trajektorie. Robotické rameno bylo postupně přestavováno pomocí kombinace lineárních a rotačních pohybů (kolem TCP), které umožňují funkce „Jog Linear“ a „Jog Reorient“. Druhou využívanou možností pro přestavení bylo použití virtuálního FlexPendantu. FlexPendant je dotykový panel od společnosti ABB s.r.o. určený k ovládání a programování robota. V obou případech se cílová poloha po navedení robota zaznamenala pomocí funkce „teach target“. Poloha jednotlivých targetů byla následně modifikována na základě plynulé trajektorie.



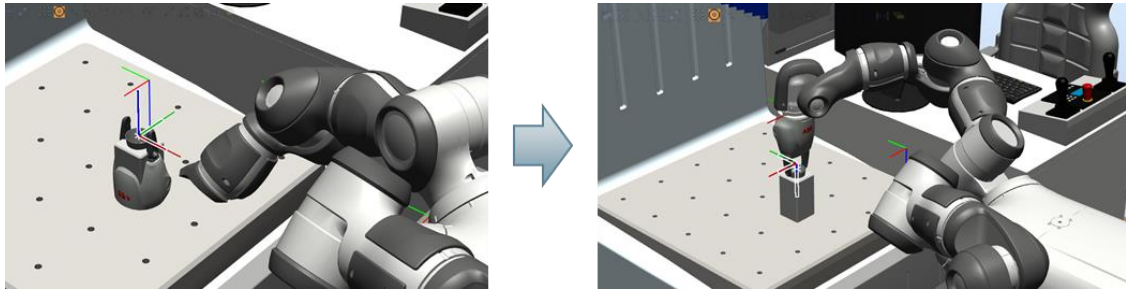
Obr. 59: Tvorba targetů pro pravé robotické rameno

Targety pro odebrací pozice předmětů kontroly kvality byly vytvořeny pomocí funkce „Snap Center“. Tato funkce automaticky vytvořila target na vybrané horní kruhové ploše předmětu kontroly. Vytvořený target bylo nutné ručně modifikovat, aby byl správně orientovaný vzhledem k nástroji a byl ve správné výšce. K finální úpravě bylo využito zobrazení nástroje v daném targetu (viz Obr. 60).



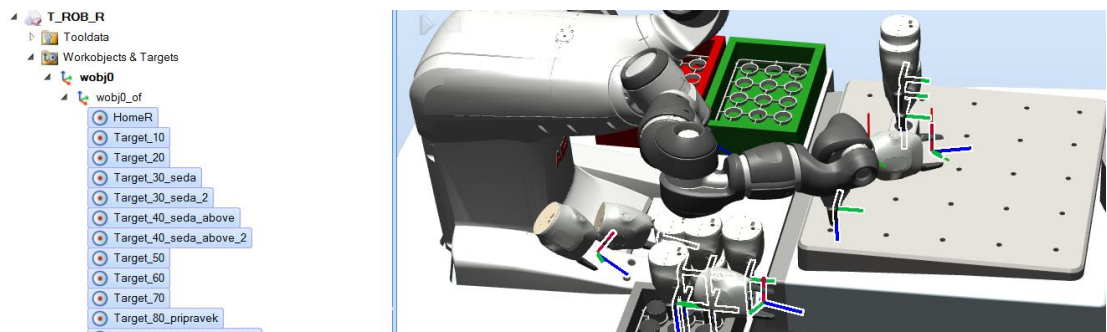
Obr. 60: Tvorba targetů na předmětu kontroly kvality

Stejný postup tvorby targetů bylo nutné aplikovat na všechny přípravy, kde byly umístěné předměty kontroly kvality. Bez úpravy vytvořených targetů by robot odebíral předměty kontroly nevhodně, jak je vidět na Obr. 61. Pokud existuje více možností, jednotlivým targetům lze také přiřadit odlišnou konfiguraci (natočení jednotlivých os).



Obr. 61: Editace targetu pro odebírací pozici

Posledním krokem před tvorbou trajektorie byla kontrola (viz Obr. 62) všech vytvořených targetů. V rámci této kontroly byly pouze zobrazeny nástroje ve všech vytvořených cílových pozicích a byla provedena vizuální kontrola polohy robota. Tato vizuální kontrola by odhalila pouze targety, do kterých se robot nemůže dostat v žádné možné konfiguraci.

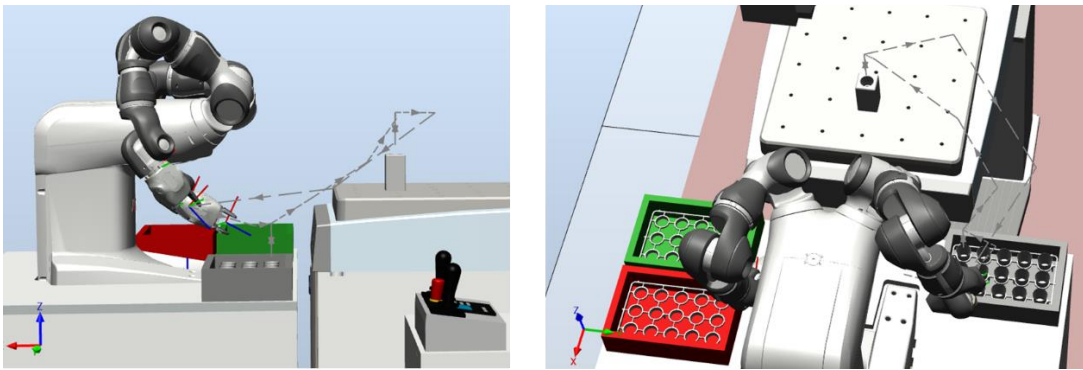


Obr. 62: Zobrazení nástroje robota ve všech vytvořených targetech

### 6.3 Tvorba programové rutiny

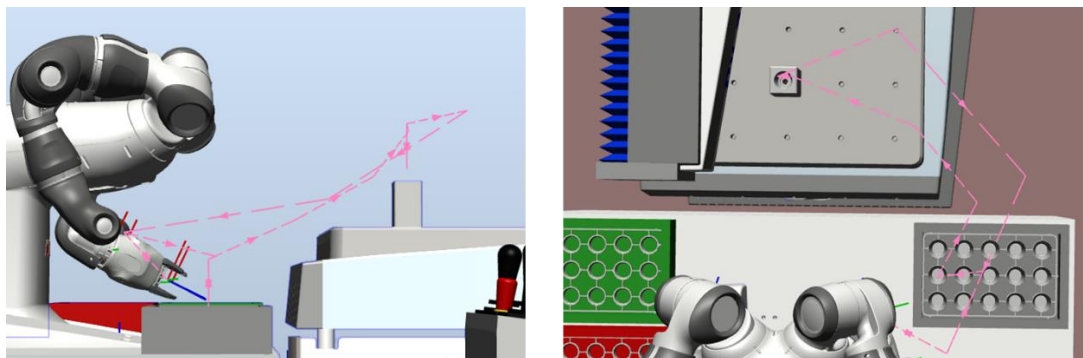
Následovalo vytvoření programové rutiny s názvem Path\_seda pro první předmět kontroly v přepravce. Základní pohybové instrukce byly vkládány pomocí targetů společně s volbou vhodného typu pohybu. Lineární pohyb (MoveL), kde trajektorie TCP mezi dvěma targety je lineární, byl využit pouze pro odebírání a vkládání předmětů kontroly do přípravků. V tomto případě byl lineární pohyb zásadní, protože bylo nutné předměty kontroly přímočaře zasouvat do přípravků. Pro ostatní pohyby byl využit

pohyb typu „joint“, kde při pohybu mezi dvěma targety je dovoleno různě měnit natočení a polohu nástroje. Zjednodušeně nezáleží na tom, po jaké trajektorii se nástroj robota přemístí z bodu A do bodu B. Robot díky tomu může využít jednodušších a rychlejších pohybů. Po vytvoření trajektorie byly dále upraveny rychlosti a zóny jednotlivých pohybových instrukcí. Použitím zóny nemusí TCP robota přímo projet vytvořeným targetem, ale pouze definovanou zónou. Díky tomu je výsledný pohyb plynulejší. Výsledná trajektorie pohybu pro první předmět kontroly je zobrazena na Obr. 63.



*Obr. 63: Vizualizace trajektorie pohybu pro první předmět kontroly*

Další pohybové rutiny by se vytvořily zkopírováním první rutiny a offsetem výhradně odebíracích pozic. Pro účely verifikace a simulace nebyla potřeba všech 15 rutin pravého robotického ramene, a proto byla vytvořena pouze jedna další rutina pro odebrání druhého předmětu kontroly v přepravce. Tato trajektorie je téměř stejná jako první a pro odlišení je označena růžovou barvou (viz Obr. 64).

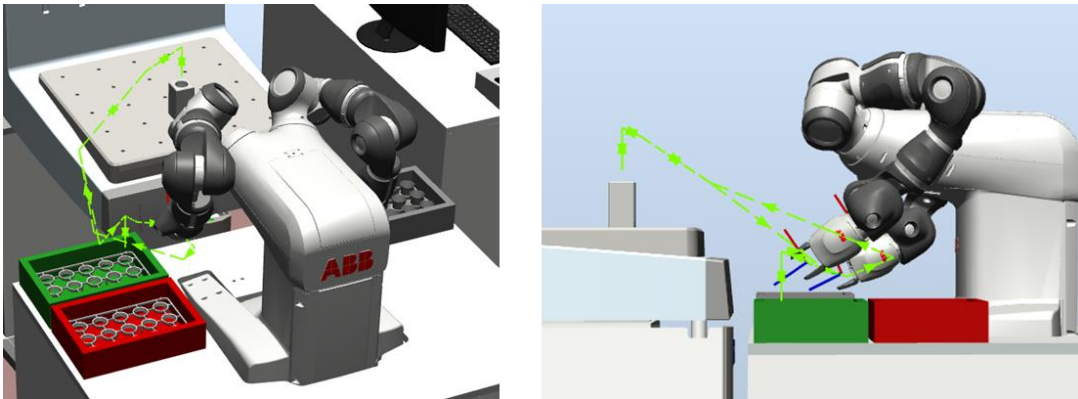


*Obr. 64: Vizualizace trajektorie pohybu pro druhý předmět kontroly*

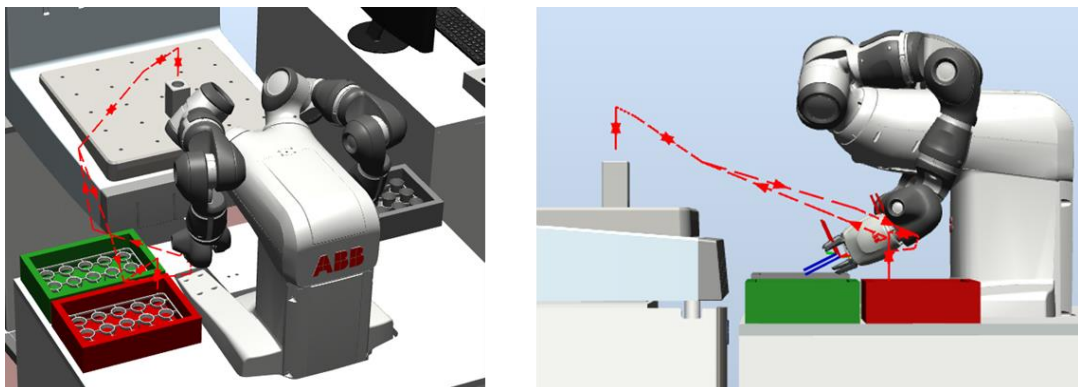
Postup pro vytvoření targetů a pohybových rutin pro druhé (levé) robotické rameno byl obdobný s tím rozdílem, že bylo nutné vytvořit dvě odlišné rutiny. Pohybovou rutinu pro



zakládání vhodných předmětů kontroly do zelené přepravky a rutinu pro zakládání nevyhovujících předmětů kontroly do červené přepravky. Pro část obou trajektorií v oblasti pracovního stolu CMM Duramax byly pro zjednodušení použity totožné targety. Finální trajektorie pohybu pro zakládání do zelené přepravky je na Obr. 65. Trajektorie pro zakládání do červené přepravky je zobrazena na Obr. 66.



*Obr. 65: Vizualizace trajektorie pohybu pro zakládání do zelené přepravky*

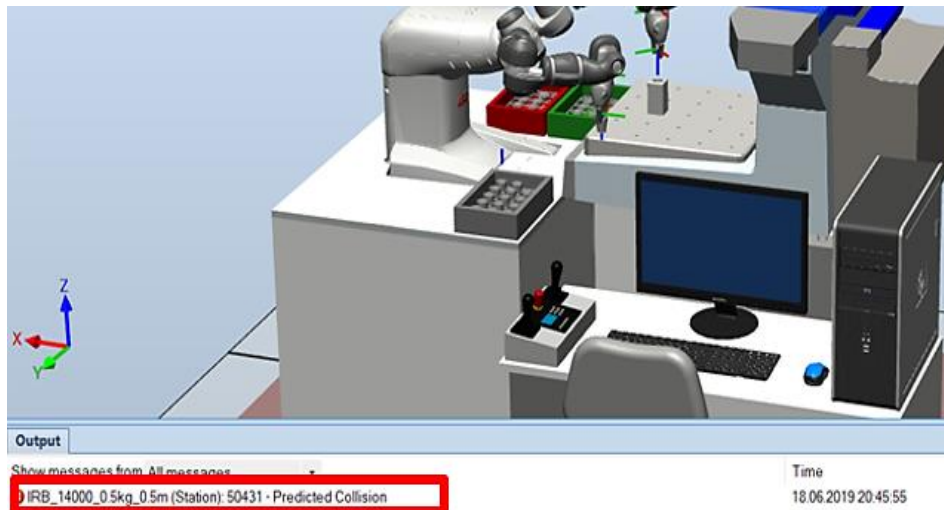


*Obr. 66: Vizualizace trajektorie pohybu pro zakládání do červené přepravky*

Všechny čtyři sestavené programové rutiny byly poté samostatně odsimulovány a tím bylo provedeno základní ověření dosahu robota na přípravek umístěný na pracovním stole CMM Duramax. Během simulace nevznikly žádné kolize a bylo ověřeno, že se robot dokáže snadno vyrovnat s výrazným rozdílem ve výšce pracovních rovin obou strojů a dosahem na přípravek. Navržená varianta pracoviště byla ověřena a nevyžadovala žádné větší úpravy.

Po základním ověření bylo pro kompletní simulaci části procesu nutné zprovoznit pohyb paralelních prstů robota a doplnit další potřebné programové instrukce. Bez těchto

programových instrukcí robotická ramena nebyla vzájemně synchronizována a při spuštění simulace obou ramen zároveň docházelo ke kolizi (viz Obr. 67).



Obr. 67: Kolize během simulace v RobotStudio

K účelům vzájemné synchronizace robotických ramen byla využita programová instrukce WaitSyncTask. Tato synchronizační instrukce čeká na stejný programový řádek v obou úlohách (robotická ramena). Pokud se tedy jedno rameno dostane na řádek s touto instrukcí, je pozastaveno do doby, kdy se i druhé rameno dostane na řádek se stejnou instrukcí WaitSyncTask. Před samotným použitím bylo potřeba definovat příslušné datové typy (musí být stejné) do hlavičky obou programů v záložce RAPID (viz Obr. 68).

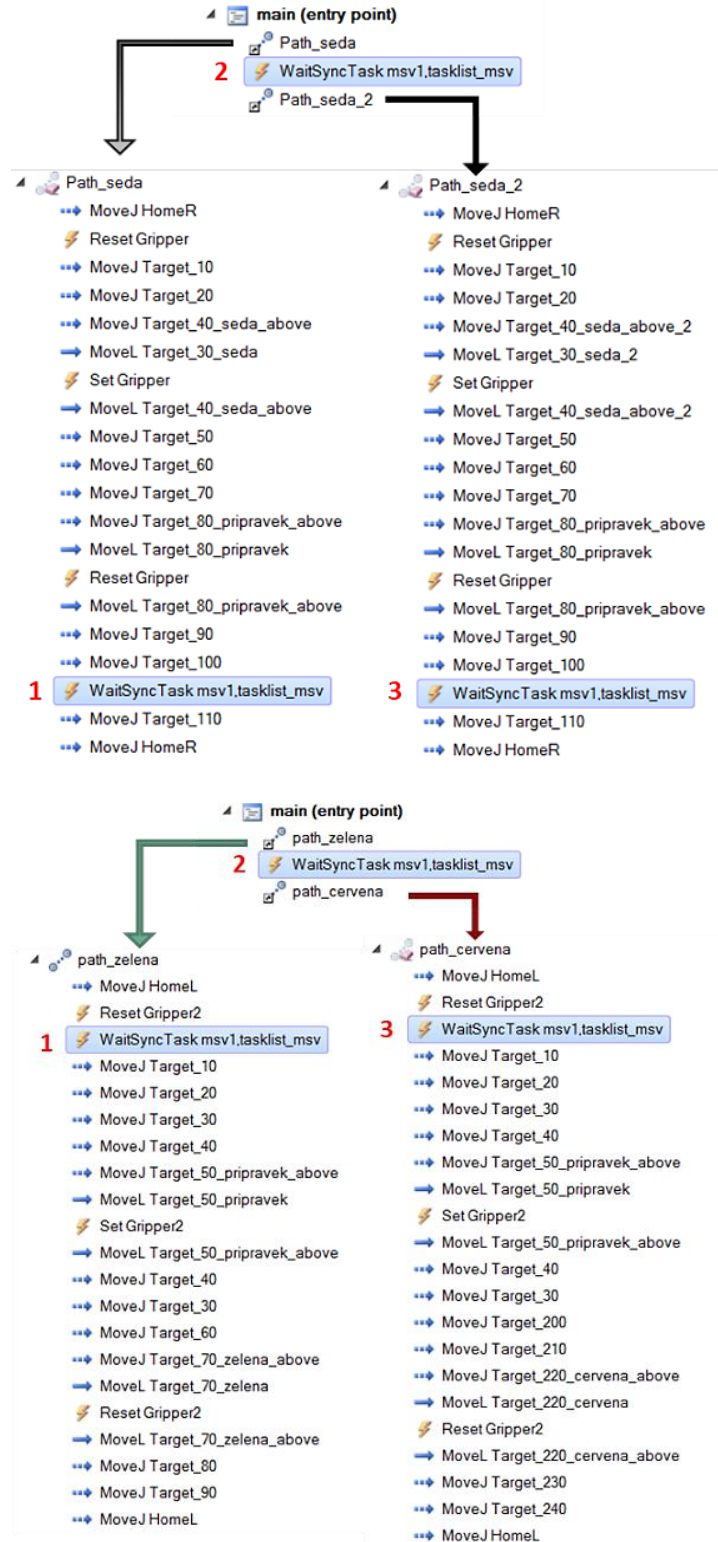
```

diplomova prace_hotovo1:View1  IRB_14000_0.5kg_0.5m (Station) x
T_ROB_L/Module1* x
1  MODULE Module1
2  CONST robtargent Homel:=[[89.387946423,156.622117957,147.913470217],[0.066010726,0.842420918,-0.111214912,0.523068661],[0,0,0,4],[101.964427132
3  VAR syncident msv1;
4  PERS tasks tasklist_msv(2):=[["T_ROB_L"],["T_ROB_R"]];
5  VAR num Vnum_GripperL_pos;
6  PERS wobjdata WobjRotTable:=[[FALSE,TRUE,"",[497.92,-415.592,145.254],[0.729159,0.015921,0.00506495,0.68414],[[0,0,0],[1,0,0,0]]];
7  CONST robtargent Target_10:=[[3.939426365,223.304891407,183.796102937],[0.058058882,0.906422234,-0.203948144,0.365284894],[0,0,0,4],[103.477995
8  CONST robtargent Target_20:=[[123.759508975,397.461280689,231.362407436],[0.163084005,-0.952814565,0.083788021,-0.241924738],[0,0,0,5],[93.7706
9  CONST robtargent Target_30:=[[342.354263642,344.742876843,320.166640826],[0.116984088,-0.95945218,0.190171152,0.172049908],[0,-1,0,5],[-158.55
10  CONST robtargent Target_40:=[[478.031636988,113.651058019,412.466114506],[0.069110514,0.911736145,-0.380877113,0.137453859],[-1,-1,0,5],[-168.3
11  CONST robtargent Target_50_prip_ravek_abcove:=[[519.5,0,434.5],[0.000043662,-0.924346378,0.381554415,-0.000008582],[-1,-1,0,5],[-155.406999031,9E
12  CONST robtargent Target_50_prip_ravek_abcove:=[[519.5,0,352.5],[0.000043662,-0.924346378,0.381554415,-0.000008582],[-1,-1,0,5],[-155.406999031,9E+09,9E
13  CONST robtargent Target_60:=[[150.438782194,373.004904116,175.080073008],[0.000119379,0.825905876,-0.563800000,0.000021033],[0,-1,1,5],[157.730
14  CONST robtargent Target_70_zelena_abcove:=[[212.5,282,104.5],[0,-0.707106781,0.707106781,0],[0,0,0,5],[163.364001895,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+
15  CONST robtargent Target_70_zelena_abcove:=[[212.5,282,104.5],[0,-0.707106781,0.707106781,0],[0,0,0,5],[163.364001895,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+
16  CONST robtargent Target_80:=[[172.724307432,268.72125787,197.741987444],[0.007663978,0.902377378,-0.235948169,0.360534038],[0,-1,0,4],[129.970908
17  CONST robtargent Target_90:=[[164.897795683,186.357871602,174.733271538],[0.009027619,0.881547265,-0.078884457,0.465370996],[0,0,0,4],[108.2579
18  CONST robtargent Target_200:=[[65.352231057,373.402330967,236.560672217],[0.127606928,-0.81675207,0.562422965,-0.017690032],[0,0,0,5],[115.3240
19  CONST robtargent Target_210:=[[46.841892808,389.23928519,187.180103228],[0.000141838,0.825914007,-0.56379609,0.000032636],[0,1,-1,5],[157.7619
20  CONST robtargent Target_220_cervena_abcove:=[[2.5,282,194.5],[0,-0.707106781,0.707106781,0],[0,0,0,5],[157.870006392,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+
21  CONST robtargent Target_220_cervena_abcove:=[[2.5,282,194.5],[0,-0.707106781,0.707106781,0],[0,0,0,5],[157.870006392,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+
22  CONST robtargent Target_230:=[[46.841892808,389.23928519,187.180103228],[0.000141838,0.825914007,-0.56379609,0.000032636],[0,1,-1,5],[157.7619
23  CONST robtargent Target_240:=[[47.98769103,218.775399327,163.807890133],[0.029361982,0.984296846,0.074834893,0.157153848],[0,0,0,4],[94.567294
24
25  PROC main()
26    path_zelena;
27    WaitSyncTask msv1,tasklist_msv;
28    path_cervena;
29  ENDPROC
30  PROC path_zelena()
31    MoveJ Homel,v400,z50,GripperL\Wobj:=wobj0;
32    Reset Gripper2;
33    MoveJ Target_10,v400,z50,GripperL\Wobj:=wobj0;

```

Obr. 68: Definice tasklistu a syncidentu pro funkci WaitSyncTask

Po definici byl vytvořen jeden stejný WaitSyncTask pro všechny čtyři rutiny. Pro správnou funkci bylo ještě nutné WaitSyncTask v jednotlivých rutinách umístit na správný řádek v programu (viz Obr. 69).



Obr. 69: Synchronizace programových rutin pomocí instrukce WaitSyncTask

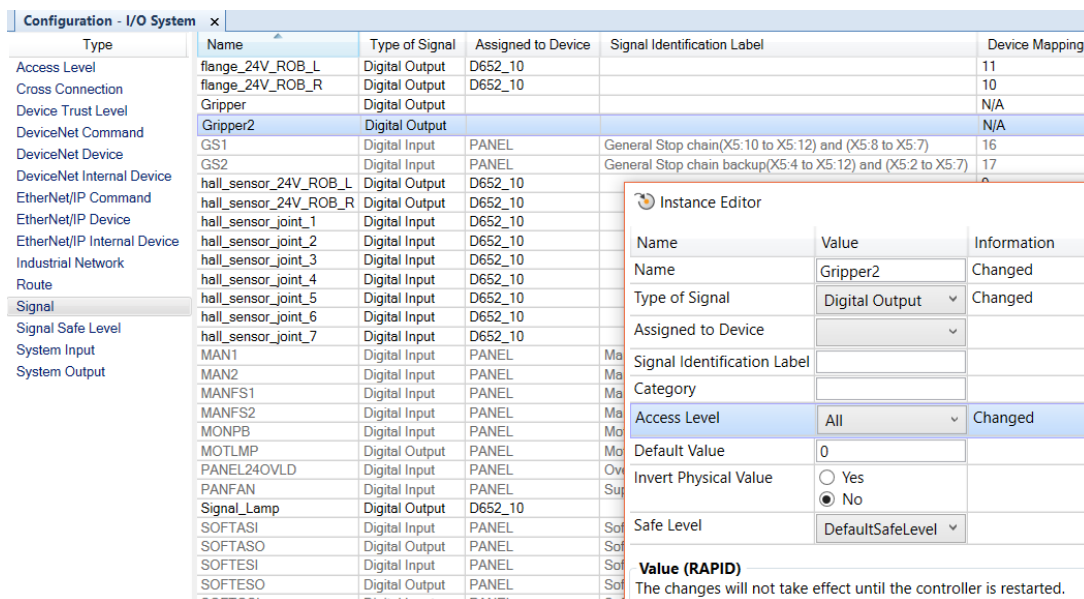


V našem případě začínalo zakládat pravé robotické rameno a levé stálo (čekalo), dokud pravé nedokončilo činnost zakládání do přípravku a neopustilo pracovní prostor CMM. Z tohoto důvodu byly dvojice instrukcí WaitSyncTask umístěny na začátku každé programové rutiny levého robotického ramene (čeká) a na konci každé rutiny pravého robotického ramene. Další WaitSyncTask byl použit mezi každou programovou rutinou, aby pravé rameno nezačalo zakládat další předmět kontroly dříve, než levé robotické rameno opustí prostor CMM. Správným použitím instrukcí WaitSyncTask byla eliminována možnost vzájemné kolize robotických ramen i při narušení běhu programu člověkem pomocí zastavení robota. Použité řádky pro synchronizaci ramen jsou zobrazeny na Obr. 69, kde jsou jednotlivé dvojice této instrukce, které na sebe čekají, vyznačeny stejným červeným číslem.

## 6.4 Virtuální signál pro manipulaci s předměty kontroly kvality

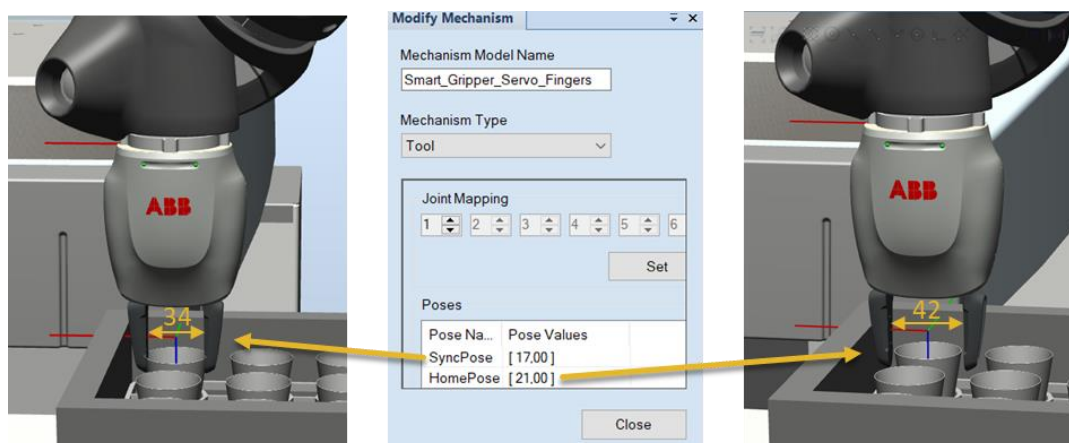
Robot sice prováděl správně všechny pohybové trajektorie a obě robotická ramena byla synchronizována, ale předměty kontroly zatím zůstávaly ve vstupní šedé přepravce. K přenášení předmětů bylo potřeba zprovoznit nástroj (smart gripper) robota tak, aby se paralelní prsty pohybovaly a byly schopné chytit/pustit vybraný předmět. Při online programování je pohyb paralelních prstů zajištěn pomocí předinstalovaných funkcí gripperu v ovládací jednotce FlexPendant. Stačí tedy jednoduše použít funkci g\_GripIn pro uchycení předmětu definovanou silou. Pro roztažení prstů od sebe se používají funkce g\_GripOut (maximální rozsah), nebo g\_MoveTo s definovanou vzdáleností paralelních prstů. V základní verzi RobotStudia zmíněné funkce bohužel nejsou a jejich použití není možné. Existuje ale několik jiných možností, jak paralelní prsty rozpohybovat a zajistit funkci přenášení předmětů.

V tomto projektu byl zvolen způsob pomocí virtuálního signálu. Nejprve bylo nutné vytvořit digitální signály (viz 7.3) pro obě robotická ramena v záložce Controller. Signál pro nástroj na pravém rameni byl pojmenován Gripper a signál pro levé rameno Gripper2. Oba signály (viz Obr. 70) byly vytvořeny jako digitální výstupy, protože bylo nutné měnit jejich hodnoty pomocí programových instrukcí. Digitální vstupy nelze pomocí programu robota ovlivnit. Po vytvoření obou signálů bylo nutné restartovat řídicí systém robota, aby se provedené změny aktivovaly.



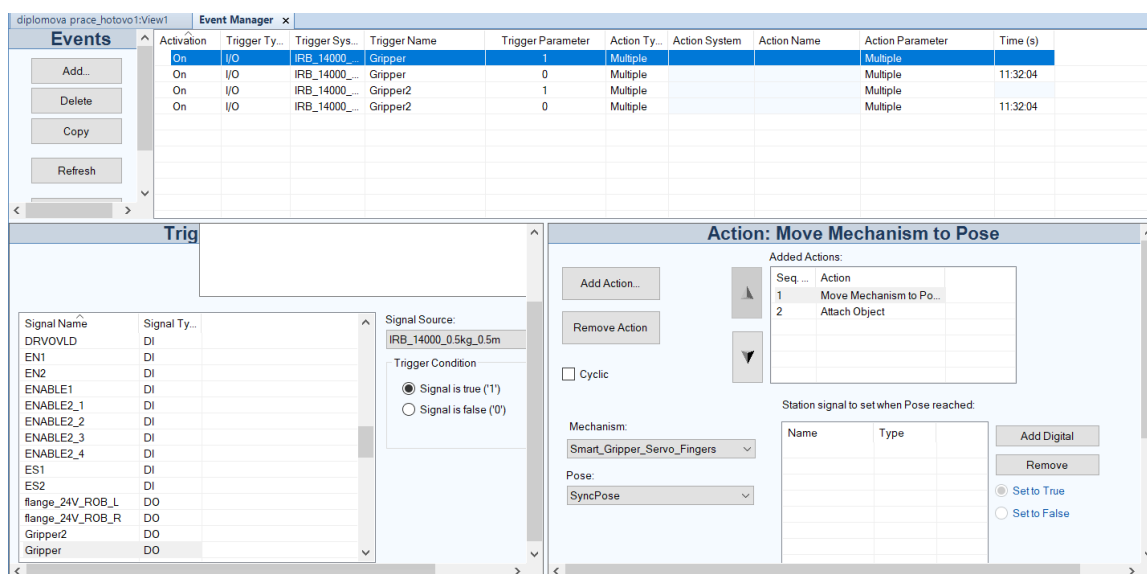
Obr. 70: Založení virtuálního signálu v RobotStudios

Signály byly vytvořeny a bylo potřeba jim přiřadit určitou funkci. K tomu slouží Event Manager v záložce Simulace. Nástroj z knihovny má již předdefinované dvě základní pozice mechanismu paralelních prstů, které byly využity v Event Manageru. V první pozici jsou prsty zcela sevřené a ve druhé naopak úplně roztažené. Tyto pozice byly pro náš projekt nevyhovující, a proto bylo nutné je upravit. Nástroje byly odhlášeny z knihovny, aby bylo možné v modifikaci mechanismu změnit hodnoty základních pozic. Pozice HomePose pro rozevřené paralelní prsty byla stanovena na vzdálenost 21 mm každého prstu od TCP, aby nástroj nekolidoval s přepravkou. Druhá pozice pro odebrání předmětu kontroly byla určena na 17 mm. Ve skutečnosti budou použity jiné paralelní prsty (viz Kapitola 5.4.3), a proto tyto hodnoty v tuto chvíli nebyly zásadní.



Obr. 71: Modifikace mechanismu nástroje z knihovny

V Event Manageru byly postupně přidány čtyři události (viz Obr. 72). Pro každý signál (nástroj) byla přidána událost kdy hodnota signálu je 1 (TRUE) a hodnota 0 (FALSE). Hodnotě signálu 1 byly přidány dvě akce. První z nich byla pro mechanismus paralelních prstů, který měl prsty posunout do určené pozice SyncPose. Druhou akcí byla funkce „Attach object“ s přidáním parametrem pro odebrání jakéhokoli nejbližšího předmětu vzhledem k TCP. Hodnotě 0 byly přidány akce pro puštění předmětu kontroly („Detach object“) a akce pro přesun prstů do pozice HomePose.

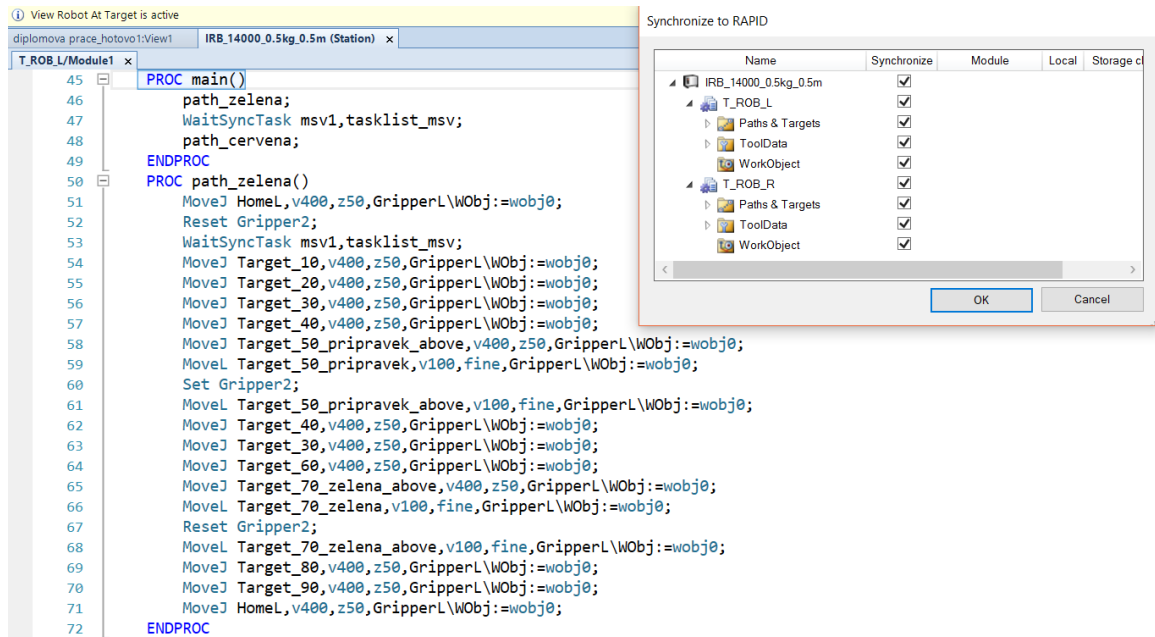


Obr. 72: Vytvoření událostí pro signály v Event Manageru

Signály byly poté přidány do všech vytvořených programových rutin. Funkce Set Gripper (resp. Gripper2) byla použita pro nastavení signálu na hodnotu 1 a byla aplikována jednou v každé rutině hned za pohybovou instrukcí MoveL, kde bude potřeba odebrat předmět. Funkce Reset Gripper (resp. Gripper2) nastavila hodnotu signálu na 0 a byla použita v každé rutině dvakrát. Na začátku pro roztažení paralelních prstů kvůli přepravce a podruhé za pohybovou instrukcí MoveL, kde bylo potřeba pustit předmět v dané pozici. Pro všechny instrukce MoveL bylo nutné nastavit zónu fine, aby nástroj dojel přímo do cílového bodu a teprve poté odebral/pustil předmět kontroly. Použití všech funkcí Set a Reset je vidět na Obr. 69.

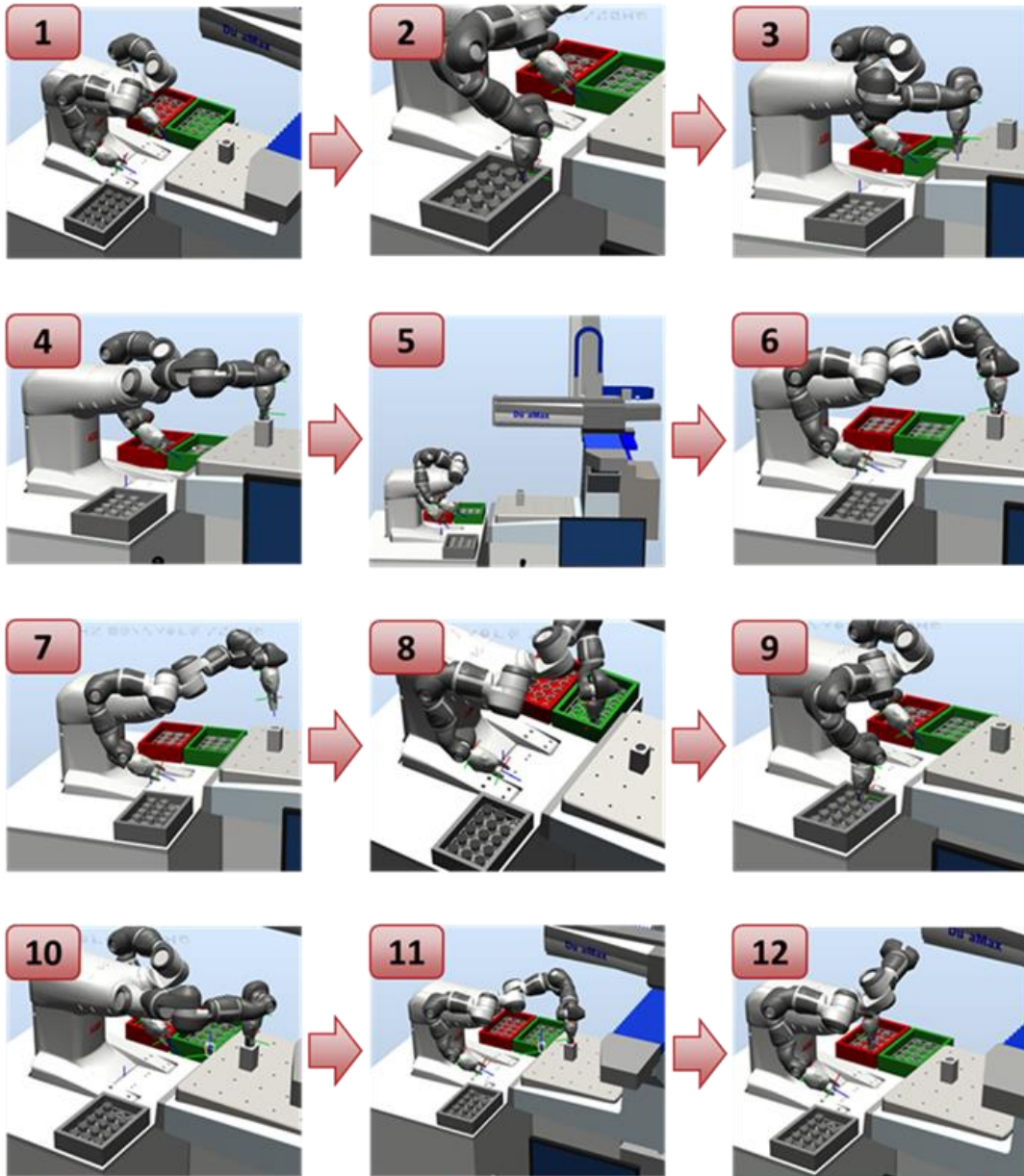
Vytvořené úlohy obou robotických ramen byly poté synchronizovány do RAPIDu, a tím byl vygenerován program robota. RAPID je programovací jazyk pro řízení robotů od společnosti ABB s.r.o. Tento vytvořený program robota lze využít pro simulaci

v RobotStudios, ale převážně slouží pro funkci reálného robota. Ukázka programové úlohy levého robotického ramena je na Obr. 73.



Obr. 73: Ukázka vygenerovaného programu levého robotického ramene

Na závěr byla provedena finální simulace celého vytvořeného procesu. Pravé robotické rameno vhodně umístilo oba předměty kontroly do přípravku na pracovním stole CMM. Levé robotické rameno poté předměty kontroly odebralo a umístilo jeden předmět do zelené a druhý do červené přepravy. Kompletní simulace proběhla v pořádku a finální varianta pracoviště byla dostatečně ověřena. Celý proces simulace je zpracován ve formě videa, které je součástí Přílohy 1. V příloze 1 je také balíček Pack and Go s vytvořeným robotickým pracovištěm v RobotStudios a finální model pracoviště ze softwaru Autodesk Inventor. Zjednodušený proces výsledné simulace je zobrazen na obrázku Obr. 74.



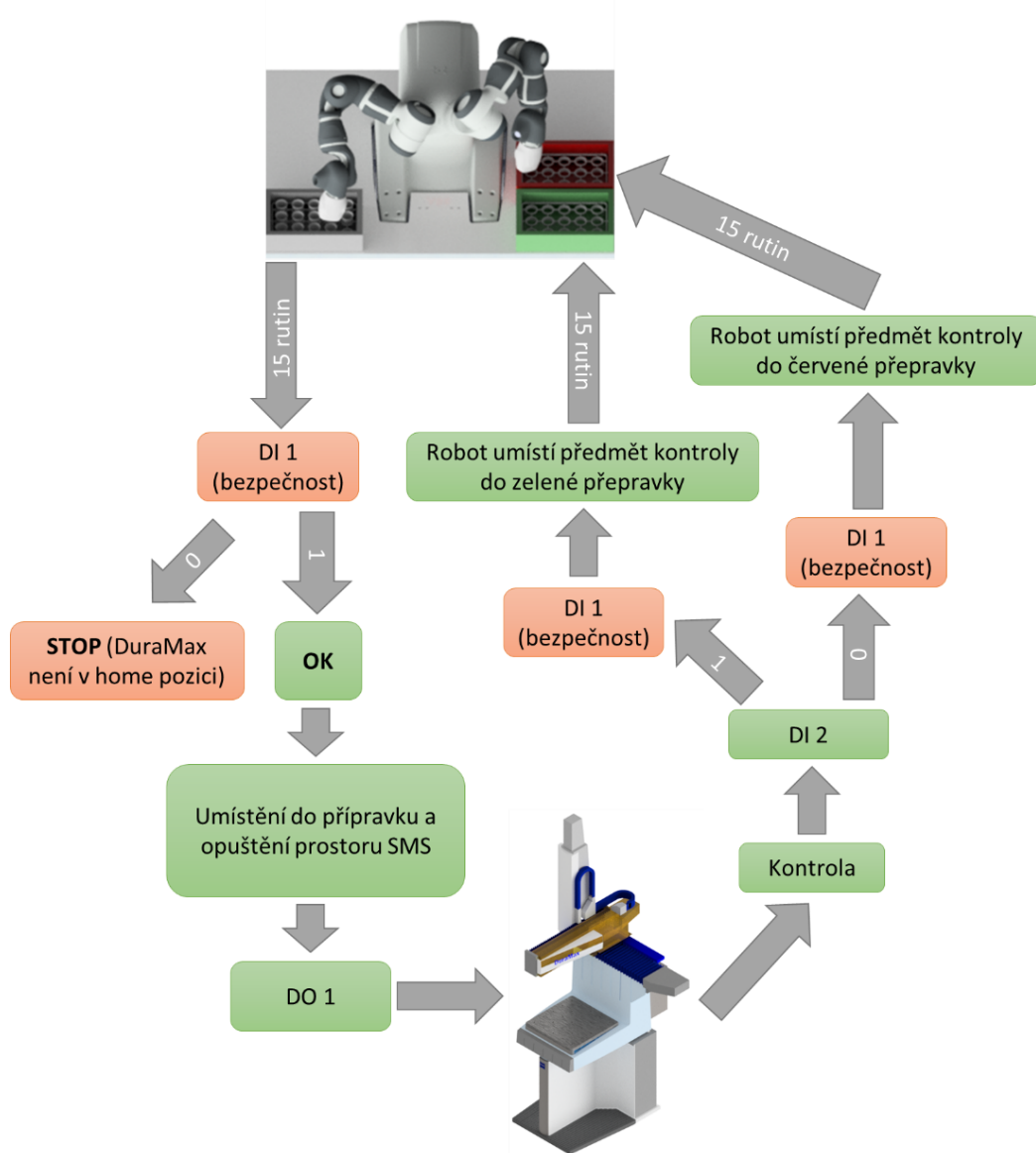
**1:** Počáteční pozice robota  
**2:** Odebrání předmětu ze vstupní přepravky  
**3:** Přemístění předmětu kontroly  
**4:** Umístění předmětu do přípravku na stole CMM  
**5:** Kontrola kvality na CMM  
**6:** Odebrání předmětu kontroly z přípravku

**7:** Přemístění předmětu kontroly  
**8:** Umístění předmětu do zelené přepravky  
**9:** Odebrání druhého předmětu kontroly kvality  
**10:** Umístění druhého předmětu kontroly  
**11:** Odebrání předmětu kontroly po měření  
**12:** Založení do červené přepravky

Obr. 74: Zjednodušená vizualizace procesu v softwaru RobotStudio

## 7 Programování a realizace pracoviště

Programování bylo nejdelší a nejsložitější částí přípravy kompletního pracoviště. V této kapitole je shrnuto kompletní programování robota na zrealizovaném pracovišti. Celý proces byl rozdělen do několika podkapitol, které se částečně prolínaly, ale z větší části bylo při programování dodrženo stejného postupu jako u podkapitol. Před samotným programováním bylo zpracováno zjednodušené schéma programu (viz Obr. 75), které sloužilo jako pomocný nástroj při programování a záznam původní představy o programu.



Obr. 75: Zjednodušené schéma programu robota



Základní myšlenkou, která popisuje uvedené zjednodušené schéma (viz Obr. 75) bylo vytvoření 15 základních rutin pro každou barevnou přepravku. Pro zajištění bezpečnosti měl být využit digitální vstup 1, který svou hodnotou udával pozici CMM DuraMax. Po umístění předmětu kontroly do přípravku robot pošle digitální signál (výstup 1) CMM DuraMax, který na základě tohoto signálu zahájí měření. Na základě výsledku kontroly kvality CMM pošle signál (digitální vstup 2), který rozhodne o umístění předmětu kontroly do červené (nevyhovující), nebo zelené (vyhovující) přepravky. Celý proces je detailně popsán v dalších částech této kapitoly.

## 7.1 Vytvoření základních programových rutin

Prvním krokem při programování bylo vytvoření 15 rutin pro každou barevnou přepravku. Pro snadnější číslování pozic předmětů v přepravce byla vytvořena jednoduchá ilustrace (viz Obr. 76). Předměty kontroly jsou číslovány stejně jako pozice v přepravce, tedy první předmět kontroly je umístěn na první pozici v přepravce. Hlavní prioritou číslování pozic byly jednotlivé sloupce (5) směrem od robota YuMi. Druhým kritériem byla vzdálenost polohy od CMM DuraMax. První předmět kontroly byl tedy v přepravce na pozici nejbližší k robotu YuMi i k CMM Duramax a poslední (patnáctý) předmět kontroly byl na pozici, která je od obou strojů nejvíce vzdálena.



Obr. 76: Číslování pozic předmětů kontroly v přepravce

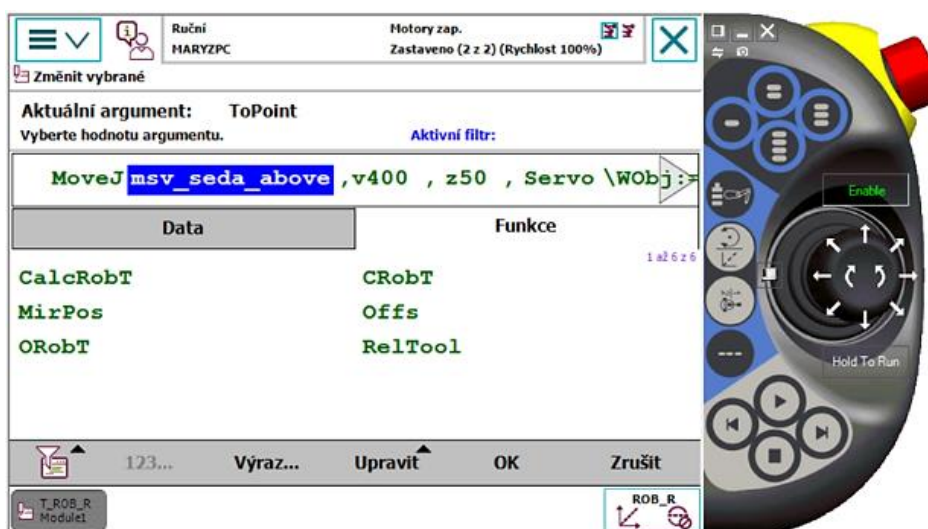
Vytvořený program v softwaru RobotStudio nebyl plně využit, protože použití speciálních paralelních prstů, nepřesnosti pracoviště a odladění plynulé trajektorie vyžadovalo úpravu většiny vytvořených pozic v rutinách. Kromě toho také z důvodu procvičení bylo rozhodnuto, že základní rutiny budou vytvořeny znovu od začátku. Původní program z RobotStudia nebyl zbytečný, protože předem zaručil funkčnost pracoviště a před sestavením kompletního pracoviště byl prospěšný k testování funkce paralelních prstů. Program zároveň posloužil jako předloha při dalším programování. Všechny rutiny byly vypracovány znovu pomocí kombinace online (FlexPendant) a offline (RobotStudio) programování. Pro přestavení robota do jednotlivých targetů bylo využito ručního přestavení s možností aktivace průchodu. Aktivováním průchodu bylo možné s robotickým ramenem libovolně pohybovat a přesně manuálně nastavit každou pozici s nejvhodnější konfigurací všech os. Díky tomu bylo odladění plynulé trajektorie výrazně jednodušší a rychlejší než při přestavování v RobotStudios. Jednotlivé targety byly navíc přidávány přímo do rutiny ve formě pohybové instrukce typu MoveL (linear)/MoveJ (joint) a pohyb robotického ramene mezi dvěma targety byl okamžitě testován v manuálním režimu robota. Většina targetů byla poté upravena, aby trajektorie byla co nejplynulejší a předměty kontroly byly odebírány ve vhodné výšce. Pro pohyb paralelních prstů byly využity programové funkce g\_GripIn (odebrání předmětu), g\_GripOut (roztažení prstů na maximum) a g\_MoveTo (pro roztažení prstů do určité pozice). Při odebírání předmětů kontroly z přepravek bylo pomocí funkce g\_MoveTo roztažení prstů nastaveno na 17 mm. Tato vzdálenost byla určena na základě zkoušení pozic prstů v prostoru přepravky. Nastavením této vzdálenosti prsty nekolidovaly s přepravkou ani jinými předměty kontroly a prostor mezi paralelními prsty a odebíraným předmětem kontroly byl také dostatečný. Posledním krokem bylo odladění použité síly k odebírání předmětů kontroly. Síla byla na základě pokusů stanovena na 6 N, protože předmět kontroly držel správnou pozici mezi prsty pevně i při maximální rychlosti. Zároveň paralelní prsty nejsou příliš namáhány a nemělo by dojít k jejich snadnému rychlému zničení. Základní nesynchronizovaná rutina pro založení prvního předmětu kontroly do přípravku je zobrazena na Obr. 77.



```
PROC Routine1msv_R()  
  MoveJ homeR, v1000, z50, GripperR;  
  g_MoveTo 17;  
  MoveJ msv10, v1000, z50, GripperR;  
  MoveJ msv20, v1000, z50, GripperR;  
  MoveJ Offs(msv_seda_above,0,0,0), v1000, z50, GripperR;  
  MoveL Offs(msv_seda_odber,0,0,0), v1000, fine, GripperR;  
  g_GripIn\holdForce:=6;  
  MoveL Offs(msv_seda_above,0,0,0), v1000, fine, GripperR;  
  MoveJ msv30, v1000, z50, GripperR;  
  MoveJ msv40, v1000, z50, GripperR;  
  MoveJ msv50, v1000, z50, GripperR;  
  MoveJ msv_pripravek_above, v1000, z50, GripperR;  
  MoveL msv_pripravek, v1000, fine, GripperR;  
  g_GripOut;  
  MoveL msv_pripravek_above, v1000, fine, GripperR;  
  g_GripIn\holdForce:=6;  
  MoveJ msv50, v1000, z50, GripperR;  
  MoveJ msv60, v1000, z50, GripperR;  
  MoveJ msv70, v1000, z50, GripperR;  
  MoveJ msv10, v1000, z50, GripperR;  
  MoveJ homeR, v1000, z50, GripperR;  
ENDPROC
```

Obr. 77: Základní rutina pro založení prvního předmětu kontroly do přepravku

Zbýlých 14 rutin pro každou barevnou přepravku bylo pro zjednodušení zkopírováno a každé rutině byla pomocí funkce offset upravena odebírací pozice v přepravce. Funkce offset byla přidána pomocí jednotky FlexPendant, kde se po otevření targetu příslušné pohybové instrukce nachází i další doplňující funkce. Pro správné použití funkce offset je potřeba zadat nejprve cílový target a posunutí v osách X, Y a Z od daného targetu. Funkce offset používá posunutí vzhledem k základnímu souřadnému systému pracoviště (v RobotStudios jako World). Pokud by bylo potřeba posunutí vzhledem k souřadnému systému nástroje, použila by se funkce RelTool. Použití funkce offset pro druhou rutinu pravého robotického ramena je zobrazeno na Obr. 78.



Obr. 78: Použití funkce offset pro zkopírované rutiny

Zbylé rutiny byly téměř stejné jako tři hlavní rutiny vytvořené pro každou barevnou přepravku. Jediným rozdílem bylo použití offsetovaných pozic pro odebrání předmětů z přepravek. Pro ukázkou byly uvedeny dvě zkopírované a následně upravené rutiny pro druhou a šestou pozici v přepravce (viz Obr. 79).

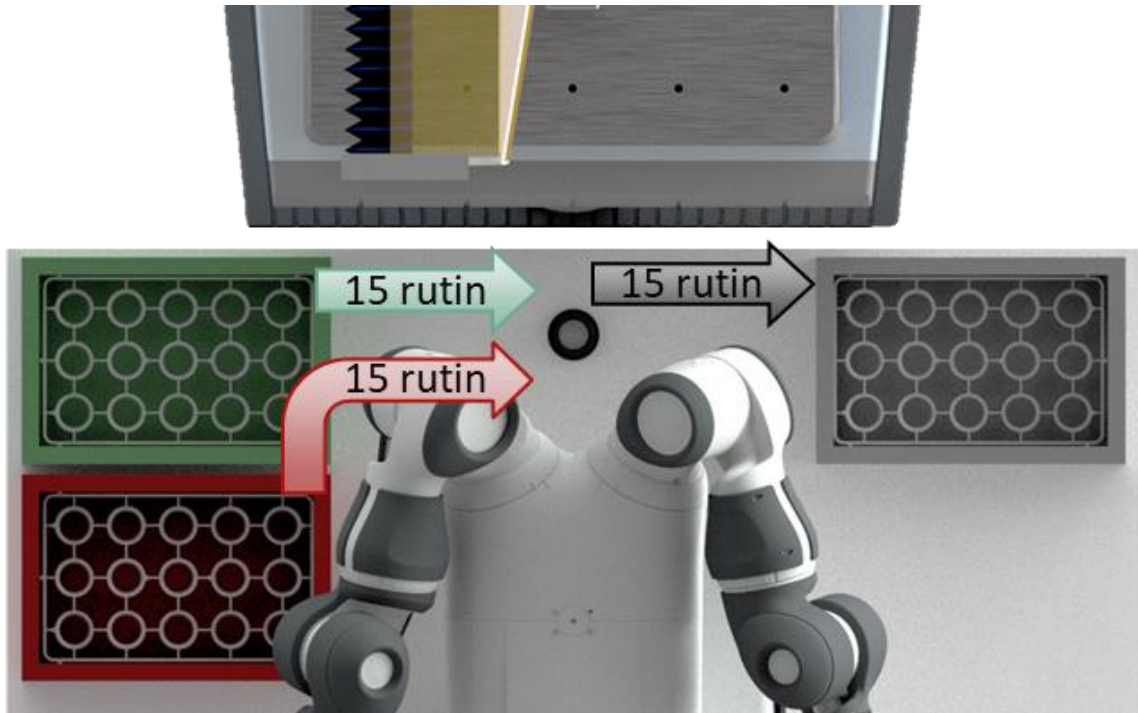
```
PROC Routine2msv_R()
  MoveJ homeR, v1000, z50, GripperR;
  g_MoveTo 17;
  MoveJ msv10, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv20, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ Offs(msv_seda_above, -50.5, 0, 0), v1000, z50, GripperR;
  MoveL Offs(msv_seda_odber, -50.5, 0, 0), v1000, fine, GripperR;
  g_GripIn\holdForce:=6;
  MoveL Offs(msv_seda_above, -50.5, 0, 0), v1000, fine, GripperR;
  MoveJ msv30, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv40, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv50, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv_prip_ravek_above, v1000, z50, GripperR;
  MoveL msv_prip_ravek, v1000, fine, GripperR;
  g_GripOut;
  MoveL msv_prip_ravek_above, v1000, fine, GripperR;
  MoveJ msv50, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv60, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv70, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv10, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ homeR, v1000, z50, GripperR;
ENDPROC

PROC Routine6msv_R()
  MoveJ homeR, v1000, z50, GripperR;
  g_MoveTo 17;
  MoveJ msv10, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv20, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ Offs(msv_seda_above, -101, -50.5, 0), v1000, z50, GripperR;
  MoveL Offs(msv_seda_odber, -101, -50.5, 0), v1000, fine, GripperR;
  g_GripIn\holdForce:=6;
  MoveL Offs(msv_seda_above, -101, -50.5, 0), v1000, fine, GripperR;
  MoveJ msv30, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv40, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv50, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv_prip_ravek_above, v1000, z50, GripperR;
  MoveL msv_prip_ravek, v1000, fine, GripperR;
  g_GripOut;
  MoveL msv_prip_ravek_above, v1000, fine, GripperR;
  MoveJ msv50, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv60, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv70, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv10, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ homeR, v1000, z50, GripperR;
ENDPROC
```

Obr. 79: Ukázka zkopírovaných a upravených rutin (2 a 6)

Za účelem expozice automatizovaného pracoviště kontroly kvality bylo vytvořeno dalších 45 rutin pro vracení předmětů kontroly zpět do vstupní šedé přepravy. Za normální situace by tyto rutiny nebyly vůbec potřeba, ale jejich využití bylo vhodné pro eliminaci potřeby doplňování nových přepravek s nezkontrolovanými předměty. Přidáním těchto rutin bylo pracoviště z důvodu expozice úmyslně plně automatizované a nevyžadovalo žádný zásah obsluhy.

Předávání předmětů přímo mezi robotickými rameny by kvůli tvaru předmětu kontroly a vytvořeným přípravkům bylo příliš složité a musely by se navrhnout nové speciální paralelní prsty robota. Z tohoto důvodu byl vytvořen jednoduchý přípravek pro překládání předmětů kontroly (viz Obr. 46), který byl umístěn uprostřed stolu s robotem YuMi. Levé robotické rameno postupně vracelo předměty kontroly z barevných přepravek (střídavě ze zelené a červené) do přípravku na překládání. Pravé robotické rameno předměty z přípravku odebralo a zařazovalo je zpět do vstupní přepravy. Zjednodušené schéma procesu vracení předmětů zpět do šedé přepravy je zobrazeno na Obr. 80.



Obr. 80: Schéma procesu vracení předmětů kontroly do vstupní přepravky

Při tvorbě byl aplikován stejný postup pomocí vytvoření základních rutin pro každou přepravku, jejich zkopírováním a offsetem odebracích pozic. Základní podoba rutin pro uklízení předmětů kontroly zpět do původní přepravky je ukázána na Obr. 81. Nalevo je zobrazena rutina pro první předmět kontroly levého robotického ramena a vpravo je rutina pro pravé robotické rameno.

```

PROC Vraceni1msv_L()
  g_MoveTo 17;
  MoveJ msv50, v1500, z50, GripperL;
  MoveJ Offs(zelena_above,0,0,0), v1500, z50, GripperL;
  MoveL Offs(zelena_odber,0,0,0), v1500, fine, GripperL;
  g_GripIn\holdForce:=6;
  MoveL Offs(zelena_above,0,0,0), v1500, fine, GripperL;
  MoveJ msv50, v1500, z50, GripperL;
  MoveJ msv110, v1500, z50, GripperL;
  MoveJ msv120, v1500, z50, GripperL;
  MoveJ stred_pripavek_above, v1500, z50, GripperL;
  MoveL stred_pripavek, v1500, fine, GripperL;
  g_MoveTo 17;
  MoveL stred_pripavek_above, v1500, fine, GripperL;
  MoveJ msv120, v1500, z50, GripperL;
  MoveJ msv110, v1500, z50, GripperL;
ENDPROC

PROC Vraceni1msv_R()
  MoveJ homeR, v1500, z50, GripperR;
  g_GripOut;
  MoveJ msv110, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ msv120, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ msv130, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ msv140, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ msv150, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ stred_pripavek_above, v1500, z50, GripperR;
  MoveL stred_pripavek, v1500, fine, GripperR;
  g_GripIn\holdForce:=6;
  MoveL stred_pripavek_above, v1500, fine, GripperR;
  MoveJ msv160, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ msv170, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ Offs(msv_seda_above,0,0,0), v1500, z50, GripperR;
  MoveL Offs(msv_seda_odber,0,0,0), v1500, fine, GripperR;
  g_MoveTo 17;
  MoveL Offs(msv_seda_above,0,0,0), v1500, fine, GripperR;
  MoveJ msv170, v1500, z50, GripperR;
ENDPROC

```

Obr. 81: Rutiny pro vracení předmětů kontroly do vstupní přepravky

Celkově bylo vytvořeno 90 samostatných rutin, konkrétně 30 pro pravé robotické rameno a 60 pro levé robotické rameno. Všechny rutiny byly postupně vyzkoušeny v manuálním režimu při nízké rychlosti, aby v případě pochybení nedošlo k poškození

paralelních prstů, v horším případě robota, nebo dokonce CMM. Během testování nebyly odhaleny žádné větší chyby a všechny rutiny fungovaly správně.

## 7.2 Synchronizace a tvorba hlavních programových rutin

Všechny rutiny fungovaly samostatně správně, ale nebylo možné spustit obě robotická ramena najednou, protože nebyla provedena synchronizace a robot by ohlásil předpokládanou kolizi. To je jedna z velkých výhod robota YuMi, který dokáže predikovat vzájemné kolize svých robotických ramen.

Pro synchronizaci byla stejně jako v Kapitole 6.3 použita synchronizační instrukce `WaitSyncTask`, tentokrát bylo ovšem k vytvoření této instrukce využito jednotky `FlexPendant`. Použití instrukce `WaitSyncTask` pomocí jednotky `FlexPendant` bylo výrazně jednodušší, protože nebylo nutné znát potřebné datové typy a jejich správnou definici v úvodních řádcích programu. Přidání instrukce bylo provedeno ze záložky instrukcí `MultiTasking`, kde se přidáním automaticky otevřelo nové okno s prázdnými poli pro doplnění potřebných parametrů této instrukce. Kliknutím na prázdné pole jednotka automaticky odkazovala na vytvoření správného datového typu. Důležité bylo vytvoření naprosto stejných instrukcí s totožnými názvy datových typů pro obě robotická ramena, jinak byla instrukce nefunkční.

Původní synchronizace zakládacích rutin byla provedena pomocí dvou různých instrukcí `WaitSyncTask`. Pro zakládací rutiny pravého robotického ramena byly obě instrukce `WaitSyncTask` na konci programu v pořadí hned za sebou. U levého ramene byla jedna instrukce na začátku a druhá na konci programové rutiny. Důvodem je, aby pravé rameno založilo předmět do přípravku a teprve při návratu do bezpečné pozice spustilo činnost levého ramene. Po odebrání předmětu kontroly a opuštění prostoru CMM byla do všech rutin levého robotického ramena přidána druhá instrukce `WaitSyncTask`. Teprve poté se dokončila první rutina pravého ramene a mohla začít další v pořadí (Založení předmětu z druhé pozice výchozí přepravy). Synchronizované rutiny pravého a levého robotického ramena jsou na Obr. 82, ale při dalším programování bylo použití těchto instrukcí částečně upraveno.

```

PROC Routine1msv_L()
  WaitSyncTask msv3_zacatek, task_msv;
  MoveJ HomeL, v1000, z50, GripperL;
  g_GripOut;
  MoveJ msv10, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ msv20, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ msv30, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ msv40, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ msv_prip_ravek_bove, v1000, z50, GripperL;
  MoveL msv_prip_ravek_ober, v1000, fine, GripperL;
  g_GripIn/holdForce:=10;
  MoveL msv_prip_ravek_bove, v1000, fine, GripperL;
  MoveJ msv40, v1000, z50, GripperL;
  WaitSyncTask msv4_odebr, task_msv;
  MoveJ msv30, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ msv50, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ Offs(zelena_bove,0,0,0), v1000, z50, GripperL;
  MoveL Offs(zelena_ober,0,0,0), v1000, fine, GripperL;
  g_MoveTo 17;
  MoveL Offs(zelena_bove,0,0,0), v1000, fine, GripperL;
  MoveJ msv50, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ msv60, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ msv70, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ HomeL, v1000, z50, GripperL;
ENDPROC

PROC Routine1msv_R()
  MoveJ homeR, v1000, z50, GripperR;
  g_MoveTo 17;
  MoveJ msv10, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv20, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ Offs(msv_seda_bove,0,0,0), v1000, z50, GripperR;
  MoveL Offs(msv_seda_ober,0,0,0), v1000, fine, GripperR;
  g_GripIn/holdForce:=6;
  MoveL Offs(msv_seda_bove,0,0,0), v1000, fine, GripperR;
  MoveJ msv30, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv40, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv50, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv_prip_ravek_bove, v1000, z50, GripperR;
  MoveL msv_prip_ravek, v1000, fine, GripperR;
  g_GripOut;
  MoveL msv_prip_ravek_bove, v1000, fine, GripperR;
  MoveJ msv50, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv60, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv70, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ msv10, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ homeR, v1000, z50, GripperR;
  WaitSyncTask msv3_zacatek, task_msv;
  WaitSyncTask msv4_odebr, task_msv;
ENDPROC

```

Obr. 82: Ukázka synchronizovaných rutin pomocí instrukce WaitSyncTask

Pro spouštění všech základních rutin byla vytvořena jedna hlavní rutina, která postupně volala jednotlivé rutiny. Bez hlavní rutiny by byl program z důvodu velkého množství rutin příliš nepřehledný a špatně by se s ním pracovalo. Podobný postup použití instrukce WaitSyncTask i s vytvořením hlavní rutiny byl aplikován i pro druhou část programu, kde byly předměty kontroly vraceny zpět do vstupní přepravy.

Hlavní rutina pro překládání předmětů kontroly zpět do vstupní přepravy nebyla závislá na činnosti CMM DuraMax, a proto se v ní nevyskytovaly žádné digitální signály (viz 7.3). Robot se při překládání sice pohyboval v blízkosti CMM, ale nezasahoval do jeho pracovního prostoru, a proto nebyla potřeba ani bezpečnostní digitální signál. Na základě těchto informací bylo jasné, že synchronizace v této části programu bude zajištěna pouze instrukcemi WaitSyncTask a podoba synchronizovaných rutin bude téměř finální. Synchronizace mezi rutinami byla v tomto případě provedena částečně přímo v každé rutině, ale některé instrukce WaitSyncTask byly použity až v hlavní rutině pro překládání.

Podoba rutin po přidání synchronizačních instrukcí je vidět na Obr. 83. Pro rutiny levého robotického ramene byly použity dvě instrukce WaitSyncTask úplně na konci každé rutiny. Zatímco u pravého robotického ramene byla jedna synchronizační instrukce uprostřed programu po odebrání z překládacího přípravku a druhá v hlavní rutině pro překládání před každou rutinou (viz Obr. 84). Umístění synchronizačních instrukcí bylo provedeno na základě testování několika variant, aby bylo provedení činnosti bezpečné, ale zároveň co nejrychlejší. Během úpravy těchto rutin byl také použit první podmíněný příkaz IF-ELSE, který způsobil, že při chybějícím předmětu kontroly robot pouze roztáhl



paralelní prsty a pokračoval na další rutinu v pořadí. Díky tomu po chybějícím předmětu kontroly robot najel do následující pozice v přepravce a nezakládal do překládacího přípravku „vzduch“.

```

PROC vraceni1msv_L()
  g_MoveTo 17;
  MoveJ msv50, v1500, z50, GripperL;
  MoveJ Offs(zelena_above,0,0,0), v1500, z50, GripperL;
  MoveL Offs(zelena_odber,0,0,0), v1500, fine, GripperL;
  g_GripIn\holdForce:=6;
  MoveL Offs(zelena_above,0,0,0), v1500, fine, GripperL;
  MoveJ msv50, v1500, z50, GripperL;
  IF g_GetPos() < 5 THEN
    g_MoveTo 17;
  ELSE
    MoveJ msv110, v1500, z50, GripperL;
    MoveJ msv120, v1500, z50, GripperL;
    MoveJ stred_pripavek_above, v1500, z50, GripperL;
    MoveL stred_pripavek, v1500, fine, GripperL;
    g_MoveTo 17;
    MoveL stred_pripavek_above, v1500, fine, GripperL;
    MoveJ msv120, v1500, z50, GripperL;
    MoveJ msv110, v1500, z50, GripperL;
    MoveJ msv50, v1500, z50, GripperL;
    WaitSyncTask msv1, task_msv;
    WaitSyncTask msv2, task_msv;
  ENDIF
ENDPROC

PROC Vraceni1msv_R()
  MoveJ homeR, v1500, z50, GripperR;
  g_GripOut;
  MoveJ msv110, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ msv120, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ msv130, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ msv140, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ msv150, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ stred_pripavek_above, v1500, z50, GripperR;
  MoveL stred_pripavek, v1500, fine, GripperR;
  g_GripIn\holdForce:=6;
  MoveL stred_pripavek_above, v1500, fine, GripperR;
  WaitSyncTask msv2, task_msv;
  MoveJ msv160, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ msv170, v1500, z50, GripperR;
  MoveJ Offs(msv_seda_above,0,0,0), v1500, z50, GripperR;
  MoveL Offs(msv_seda_odber,0,0,0), v1500, fine, GripperR;
  g_MoveTo 17;
  MoveL Offs(msv_seda_above,0,0,0), v1500, fine, GripperR;
  MoveJ msv170, v1500, z50, GripperR;
ENDPROC

```

Obr. 83: Podoba synchronizovaných rutin pro vracení předmětů kontroly do vstupní přepravky  
Hlavní rutiny pro vracení předmětů kontroly do šedé vstupní přepravky jsou zobrazeny na Obr. 84.

```

PROC uklizeni_msvL()
  MoveJ HomeL, v1000, z50, GripperL;
  g_MoveTo 17;
  MoveJ msv70, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ msv60, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ msv50, v1000, z50, GripperL;
  aRutina1msv;
  aRutina16msv;
  aRutina2msv;
  aRutina17msv;
  aRutina3msv;
  aRutina18msv;
  aRutina4msv;
  aRutina19msv;
  aRutina5msv;
  aRutina20msv;
  aRutina6msv;
  aRutina21msv;
  aRutina7msv;
  aRutina22msv;
  aRutina8msv;
  aRutina23msv;
  aRutina9msv;
  aRutina24msv;
  aRutina10msv;
  aRutina25msv;
  aRutina11msv;
  aRutina26msv;
  aRutina12msv;
  aRutina27msv;
  aRutina13msv;
  aRutina28msv;
  aRutina14msv;
  aRutina29msv;
  aRutina15msv;
  aRutina30msv;
  MoveJ msv50, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ msv60, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ msv70, v1000, z50, GripperL;
  MoveJ HomeL, v1000, z50, GripperL;
ENDPROC

PROC uklizeni_msvR()
  MoveJ homeR, v1000, z50, GripperR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina1msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina2msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina3msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina4msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina5msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina6msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina7msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina8msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina9msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina10msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina11msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina12msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina13msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina14msvR;
  WaitSyncTask msv1, task_msv;
  Rutina15msvR;
  MoveJ msv10, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ homeR, v1000, z50, GripperR;
ENDPROC

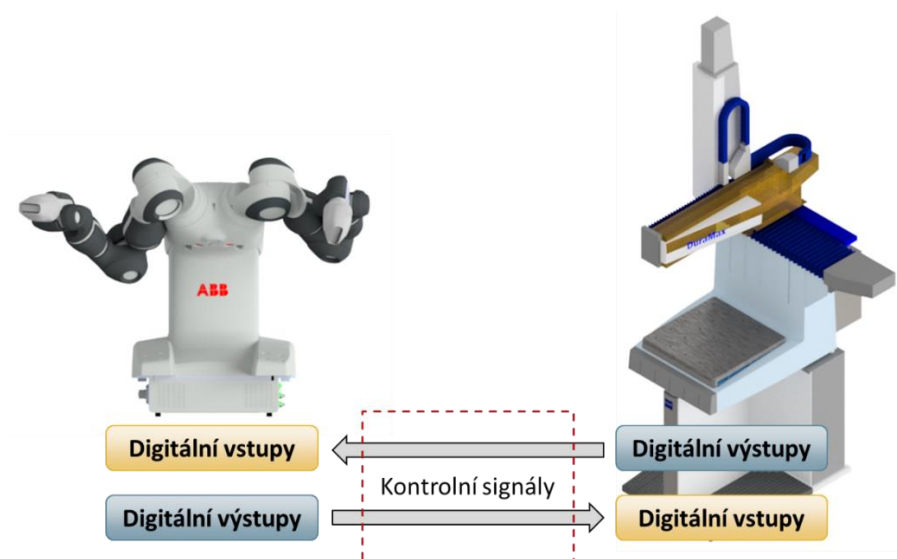
```

Obr. 84: Hlavní rutiny pro překládání předmětů kontroly zpět do vstupní přepravky

Přidáním synchronizačních instrukcí a vytvořením hlavních rutin, které postupně volaly všech 90 vytvořených rutin, bylo možné celý proces pustit najednou a ověřit jeho funkčnost. Všechny rutiny v této kapitole byly synchronizovány a byly plně funkční. Program robota byl sice plně funkční, ale pouze bez použití CMM, protože doposud nebyla vytvořena žádná komunikace mezi oběma stroji. Problémem byla také špatná adaptabilita programu při změnách procesu. Levé robotické rameno například muselo najet do všech 30 pozic, protože nebylo jasné, kolik předmětů kontroly je v každé přepravce. Vyřešení tohoto problému se věnuje Kapitola 7.4. Během testování byly odstraněny drobné chyby vzniklé při programování.

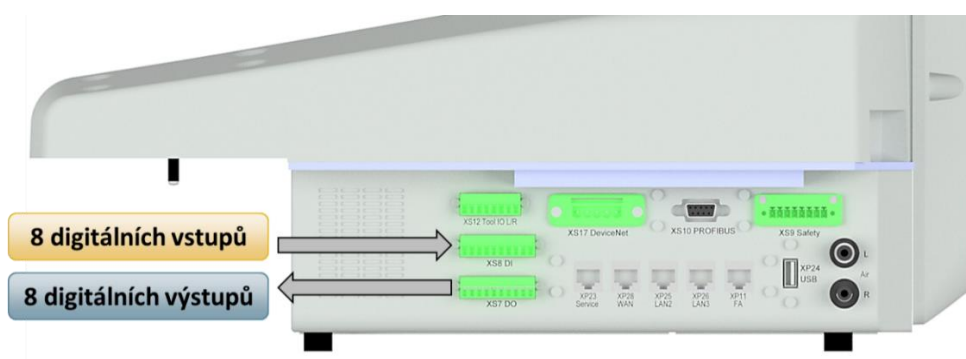
### **7.3 Digitální vstupy a výstupy pro komunikaci**

Komunikace robota a dalších strojů (viz Obr. 85) může být vytvořena pomocí několika různých způsobů. U průmyslových robotů se většinou jedná o drátovou komunikaci pomocí digitálních vstupů a výstupů (signálů). Digitálním vstupem je jakákoliv informace, kterou robot nebo počítač robota (řídící jednotka) dokáže přijmout a vyhodnotit. V mnoha případech lze určitou část fyzického světa popsat jednoduše pomocí logického výroku PRAVDA či NEPRAVDA (1 a 0). Například na otázku jsou dveře otevřené, existují právě dvě možné odpovědi. Dveře jsou zavřené (0) a dveře jsou otevřené (1). Aby daná informace mohla být robotem správně vyhodnocena, využívá se rozlišení vysoké a nízké hodnoty napětí. Pokud je napětí vyšší než určitá hodnota, počítač detekuje digitální vstup jako vysoký (1/PRAVDA). Naopak při nižší hodnotě je digitální vstup detekován jako nízký (0/NEPRAVDA). Digitálním výstupem je informace, pomocí které robot může ovlivňovat okolní fyzický svět. Výstupní napětí je v tomto případě produkováno prostřednictvím řídící jednotky robota, která na základě instrukcí ovládá hodnotu napětí. Stejně jako u výstupu je vyšší hodnota napětí detekovaná přijímačem jako PRAVDA (1) a nižší hodnota jako NEPRAVDA (0). [55], [56]



Obr. 85: Komunikace robota a CMM pomocí digitálních signálů

Připojení digitálních vstupů a výstupů k robotu YuMi je možné pomocí konektorů umístěných na levé straně řídicí jednotky robota. Robot disponuje osmi digitálními vstupními signály a osmi digitálními výstupními signály se standardním rozsahem 0-24 V a maximálním proudem 3 A.



Obr. 86: Konektory pro připojení digitálních signálů na řídicí jednotce robota YuMi

Pro kompletní komunikaci mezi robotem a CMM byly použity celkem čtyři kontrolní signály, konkrétně jeden digitální výstup (custom\_DO\_2) a tři digitální vstupy (custom\_DI\_0, custom\_DI\_1 a custom\_DI\_2). V našem případě bylo nutné, aby robot zastával hlavní řídicí funkci nad CMM DuraMax. K tomuto účelu byl využit jediný digitální výstup custom\_DO\_2. Tento výstupní signál spouštěl a vypínal automatický cyklus měření CMM DuraMax. Nastavením digitálního výstupu na vysokou hodnotu napětí 24 V (1/PRAVDA) byl automatický cyklus měření spuštěn a při nízké hodnotě



0 V (0/NEPRAVDA) byl cyklus okamžitě zastaven. Díky tomu bylo možné pomocí programových instrukcí jednoduše ovládat činnost a nečinnost CMM.

Digitálních vstupů pro předání všech potřebných informací bylo potřeba více. Prvním vstupním signálem byl custom\_DI\_2, který předával informaci o pozici snímací hlavy CMM DuraMax. Po každém cyklu měření najel CMM snímací hlavou do bezpečné pozice. Pokud se snímací hlava nacházela právě v této pozici, byla hodnota tohoto signálu 1. Při vzdálení z bezpečné pozice byla hodnota signálu 0. Tato informace byla zásadní z pohledu zajištění bezpečnosti CMM. Robot po založení předmětu kontroly spustil automatický cyklus CMM a čekal na hodnotu signálu 1, po kterém ihned pomocí výše popsaného výstupu zastavil činnost CMM.

Další dva signály custom\_DI\_0 a custom\_DI\_1 sloužily pro předání informace o výsledku kontroly kvality. O výsledku rozhodoval software Calypso na základě stanovených tolerancí programu, které nesměly být překročeny. Informace ze softwaru Calypso byla přenášena pomocí speciálního zařízení, které zajistila a zprovoznila společnost Carl Zeiss spol. s.r.o. Před začátkem každého měření byly hodnoty obou těchto vstupních signálů zařízením resetovány na 0. Podle výsledků měření byl poté jeden z těchto signálů nastaven na hodnotu 1. V případě, kdy byl zařízením na hodnotu 1 nastaven signál custom\_DI\_0, robot zakládá předměty kontroly do zelené přepravy (vyhovující). V opačném případě byly předměty kontroly založeny do červené přepravy.

Po aplikaci všech programových instrukcí obsahující všechny čtyři digitální signály, byl celý program otestován a ověřen. Použití jednotlivých instrukcí se signály bylo během dalšího programování mnohokrát změněno, a proto je jejich použití zobrazeno až na finálních variantách jednotlivých rutin, které jsou na Obr. 87 a Obr. 88.

## 7.4 Odladění programu robota

Program robota byl sice plně funkční, ale nevhodný pro využití v reálném procesu. Důvodem byla nízká flexibilita vůči změnám procesu způsobených člověkem a zbytečnému najíždění do prázdných pozic v přepravce. Na základě všech identifikovaných překážek, které by zbytečně zpomalovaly automatický proces kontroly kvality, byl program kompletně odladěn.

Do všech rutin, kde dochází k odebrání předmětu kontroly, byl implementován podmíněný příkaz IF-ELSE. Kvůli tomu musela být vytvořena dvě možná zakončení rutin pro případ, kde předmět kontroly kvality chyběl a kde se předmět kontroly kvality nacházel na dané pozici. Tento příkaz nebyl použit pouze u rutin pro odebrání z přípravku na pracovním stole CMM. V dané rutině byl příkaz zbytečný, protože se nepředpokládá, že by předmět kontroly byl odebrán během automatického cyklu měření. Během implementace byly také doladěny všechny zbývající pohybové trajektorie pomocí drobných úprav pozic targetů do finální podoby.

Hlavní částí odladění programu robota bylo přidání několika datových jednotek k uchování informací (proměnných), které byly datového typu num (číslo) nebo bool (PRAVDA/NEPRAVDA). Všechny proměnné byly použity pro zápis informace o počtu předmětů kontroly, které byly odebrány z (resp. uloženy do) jednotlivých přepravek. Správným použitím proměnných bylo možné určit, které pozice v přeprávkách jsou obsazené a robot tak zbytečně nejezdil na prázdné pozice v přeprávkách.

Celkově bylo použito sedm proměnných typu num a dvě proměnné typu bool. První proměnná zakl (num) započítávala každou projetou pozici ve vstupní přepravce a při hodnotě patnáct změnila hodnoty proměnných typu bool. Tím došlo k ukončení smyčky v hlavní rutině programu a následovalo vrácení předmětů kontroly zpět. Proměnná msv\_pzalR (num) sloužila k započtení všech založených předmětů kontroly do přípravku. Proměnné pzel a pcerv (obě num) započítávaly počet předmětů kontroly umístěných do zelené (pzel) a červené (pcerv) přepravy. Proměnné poutzel a poutcerv (obě num) počítaly počet předmětů kontroly vrácených zpět do šedé vstupní přepravy. Právě použitím posledních čtyř zmíněných proměnných bylo eliminováno najíždění do prázdných pozic v zelených a červených přeprávkách. Použitím rovnosti při známém počtu založených (pzel/pcerv) a počtu vrácených (poutzel/potcerv), byly pomocí podmíněného příkazu zbývající prázdné pozice v přepravce (rutiny) přeskočeny. Poslední proměnnou typu num byla proměnná msvhot, která počítala celkový počet vrácených předmětů kontroly. Při chybějícím předmětu byla tato proměnná dále využita pro ukázkou využití integrované kamery. Obě proměnné typu bool byly použity pro programové smyčky (While) v hlavních rutinách, které byly při změně těchto

proměnných ukončeny a robot se posunul na další část hlavní rutiny. V závislosti na použití proměnných bylo v programu použito několik dalších podmíněných příkazů IF-ELSE a cyklů WHILE, které bylo nutné doplnit pro funkčnost celého programu robota.

Odladěný program byl poté několikrát otestován, aby byla ověřena jeho funkčnost i při neobvyklých situacích, které by mohla způsobit obsluha. Jediným odhaleným problémem byla situace, která by nastala v případě, že by obsluha záměrně přemísťovala předměty kontroly na pozice, které by měly být prázdné. Vzhledem k tomu, že situace pravděpodobně nenastane, nebyla tato nedokonalost programu dále řešena. Pokud by situace přece jen nastala, obsluha by jednoduše jeden předmět kontroly z pozice odstranila a pozastavený program spustila na stejném programovém řádku. Řešením bylo například snímání všech pozic v přepravkách pomocí externí kamery, která ovšem nebyla k dispozici. Automatický cyklus pracoviště kontroly kvality byl kompletní a bylo možné jeho okamžité využití v praxi na reálném pracovišti kontroly kvality.

Celková délka hotového programu pro obě robotická ramena je téměř 3450 programových řádků. Kvůli výrazné délce programu bylo pro ukázkou vybráno pouze několik rutin, které jsou zobrazeny na Obr. 87 a Obr. 88. Kompletní moduly programu pro levé i pravé robotické rameno jsou poté uvedeny jako součást Přílohy 2.

```
PROC main()
msv_L_ini_uklid:=FALSE;
msv_R_p15_konec:=FALSE;
pzel:=0;
pcerv:=0;
g_SetForce 4;
WHILE msv_R_p15_konec=FALSE DO
  WaitSyncTask msv5, task_msv;
  WHILE custom_DI_2=0 DO
    tanecl;
    WaitDI custom_DI_2,1;
  ENDWHILE
  WaitSyncTask msv3_zacatek, task_msv;
  WHILE custom_DI_2=0 DO
    WaitDI custom_DI_2,1;
  ENDWHILE
  IF custom_DI_2=1 AND msv_R_p15_konec<>TRUE THEN
    WaitTime 2;
    IF custom_DI_0=1 THEN
      skladani_do_zel_msvL;
      pzel:=pzel+1;
    ENDIF
    IF custom_DI_1=1 THEN
      skladani_do_cerv_msvL;
      pcerv:=pcerv+1;
    ENDIF
  ENDIF
ENDWHILE
WaitSyncTask msv3_zacatek, task_msv;
msv_L_ini_uklid:=TRUE;
uklizeni_msvL;
ENDPROC
```

```
PROC main()
SetDO custom_DO_2, 0;
zakl1 := 1;
msv_R_p15_konec:=FALSE;
msv_L_ini_uklid:=FALSE;
msv_pzalR:=0;
g_SetForce 4;
WHILE msv_L_ini_uklid=FALSE DO
  MoveJ homeR, v1000, z50, GripperR;
  zakladani1;
  IF msv_R_p15_konec=TRUE THEN
    WaitSyncTask msv3_zacatek, task_msv;
  ENDIF
ENDWHILE
IF msv_L_ini_uklid=TRUE THEN
  uklizeni_msvR;
ENDIF
SetDO custom_DO_2, 0;
IF msvhot=14 THEN
  MoveJ homeR, v1000, z50, GripperR;
ELSE
  MoveToDetectedObject;
ENDIF
ENDPROC
```

Obr. 87: Kompletní hlavní rutiny pro levé (nalevo) a pravé (vpravo) robotické rameno

```

PROC Routine1msvL()
MoveJ HomeL, v1000, z50, GripperL;
g_GripOut;
MoveJ msv10, v1000, z50, GripperL;
MoveJ msv20, v1000, z50, GripperL;
IF custom_DI_2=1 THEN
WZDisable wz_msv_temp;
ELSE
WZEnable wz_msv_temp;
ENDIF
MoveJ msv30, v1000, z50, GripperL;
MoveJ msv40, v1000, z50, GripperL;
MoveJ msv_pripavek_above, v1000, z50, GripperL;
MoveL msv_pripavek_odber, v1000, fine, GripperL;
g_GripIn\holdForce:=10;
MoveL msv_pripavek_above, v1000, fine, GripperL;
WaitSyncTask msv4_odebr, task_msv;
MoveJ msv40, v1000, z50, GripperL;
MoveJ msv30, v1000, z50, GripperL;
MoveJ msv50, v1000, z50, GripperL;
WZEnable wz_msv_temp;
MoveJ Offs(zelena_above,0,0,0), v1000, z50, GripperL;
MoveL Offs(zelena_odber,0,0,0), v1000, fine, GripperL;
g_MoveTo 17;
MoveL Offs(zelena_above,0,0,0), v1000, fine, GripperL;
MoveJ msv50, v1000, z50, GripperL;
MoveJ msv60, v1000, z50, GripperL;
MoveJ msv70, v1000, z50, GripperL;
MoveJ HomeL, v1000, z50, GripperL;
ENDPROC

PROC Routine1msvR()
g_MoveTo 17;
MoveJ msv10, v1000, z50, GripperR;
MoveJ msv20, v1000, z50, GripperR;
MoveJ Offs(msv_seda_above,0,0,0), v1000, z50, GripperR;
MoveL Offs(msv_seda_odber,0,0,0), v1000, fine, GripperR;
g_GripIn\holdForce:=6;
IF g_GetPos() < 5 THEN
MoveL Offs(msv_seda_above,0,0,0), v1000, fine, GripperR;
MoveJ msv20, v1000, z50, GripperR;
MoveJ msv10, v1000, z50, GripperR;
ELSE
MoveL Offs(msv_seda_above,0,0,0), v1000, fine, GripperR;
MoveJ msv30, v1000, z50, GripperR;
IF custom_DI_2=1 THEN
WZDisable wz_msv_temp;
ELSE
WZEnable wz_msv_temp;
ENDIF
MoveJ msv40, v1000, z50, GripperR;
MoveJ msv50, v1000, z50, GripperR;
MoveJ msv_pripavek_above, v1000, z50, GripperR;
MoveL msv_pripavek, v1000, fine, GripperR;
g_GripOut;
msv_pzalR:=msv_pzalR+1;
MoveL msv_pripavek_above, v1000, fine, GripperR;
g_GripIn\holdForce:=6;
MoveL msv_pripavek_contL_above, v1000, fine, GripperR;
ContactL msv_pripavek_contL, v20\Zone:=fine, GripperR;
ContactL msv_pripavek_contL_above, v100\Zone:=fine, GripperR;
MoveL msv_pripavek_above, v1000, fine, GripperR;
MoveJ msv50, v1000, z50, GripperR;
MoveJ msv60, v1000, z50, GripperR;
MoveJ msv70, v1000, z50, GripperR;
WZEnable wz_msv_temp;
MoveJ msv10, v1000, z50, GripperR;
MoveJ HomeR, v1000, z50, GripperR;
SetDO custom_DO_2, 1;
WaitTime 2;
WaitSyncTask msv5, task_msv;
WaitDI custom_DI_2, 1;
SetDO custom_DO_2, 0;
WaitSyncTask msv3_zacatek, task_msv;
WaitSyncTask msv4_odebr, task_msv;
ENDIF
zakl1 := zakl1 + 1;
ENDPROC

```

Obr. 88: Základní rutiny pro založení (vpravo) a odebrání (vlevo) prvního předmětu kontroly

## 7.5 Další vylepšení programu

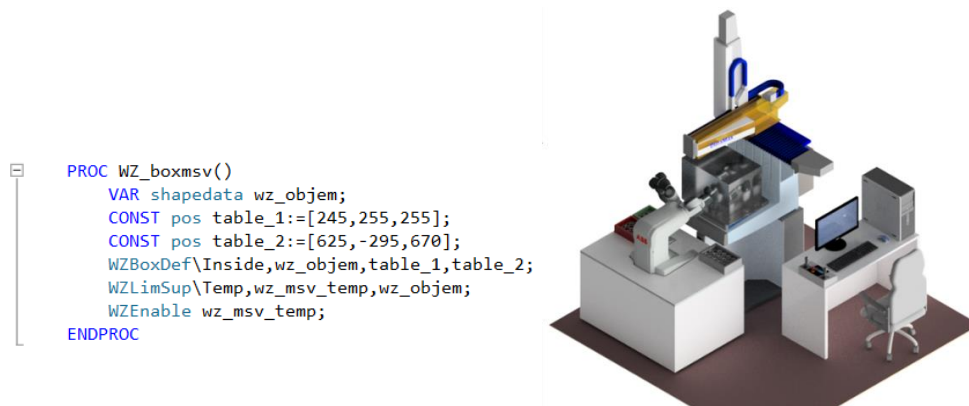
V této kapitole jsou popsány další změny již hotového a odladěného programu robota, které zajistily větší bezpečnost pro snímací hlavu CMM a vylepšily program pro účely expozice pracoviště.

### 7.5.1 Zajištění bezpečnosti

Zřejmě nejzásadnější změnou bylo přidání druhé úrovně ochrany snímací hlavy CMM DuraMax, která je velice nákladná a při kolizi s robotickým ramenem by mohla být trvale poškozena. První úroveň ochrany CMM byla zajištěna použitím digitálního výstupu custom\_DO\_2, pomocí kterého robot ovládal automatický cyklus měření CMM Duramax (viz 7.3). Druhou úrovní ochrany bylo přidání dočasné světové zóny, která poskytovala bezpečnost pomocí jiného digitálního vstupního signálu custom\_DI\_2. Světová zóna je vymezený bezpečný 3D prostor v základním souřadném systému world, který je možné pomocí programových instrukcí libovolně zapínat a vypínat. Pokud je světová zóna

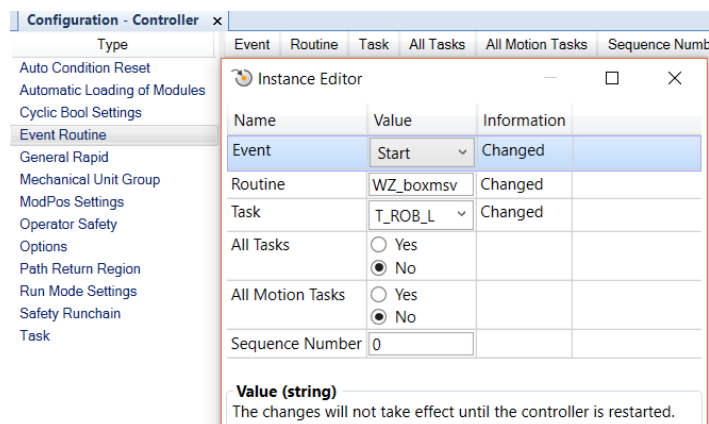
aktivní (povolena) a robot se jakoukoli částí robotického ramene dostane do této oblasti, dojde k jeho okamžitému zastavení.

Vytvoření a automatické spouštění dočasné světové zóny bylo pro obě robotická ramena zajištěno pomocí rutin v systémových modulech robota. Zvoleným tvarem zóny byl kvádr, který byl definován pomocí dvou bodů v prostoru. Oba body ležely v rozích na tělesové úhlopříčce vytvořeného kvádru. Zóna musela být dočasná, aby mohla být při zakládání do přípravku deaktivována. Posledním řádkem rutiny byla tato dočasná zóna aktivována. Celá rutina pro aktivaci zóny a ukázka umístění zóny na pracovním stole CMM je zobrazena na Obr. 89.



Obr. 89: Programová rutina pro aktivaci bezpečnostní zóny (vlevo) a její zobrazení (vpravo)

Pro automatickou aktivaci zóny při spuštění robota byla vytvořena nová rutina události (Event routine), která byla nastavena tak, aby byla spuštěna pouze jednou při startu programu robota. Rutina byla díky tomu provedena pouze jednou při spuštění a nemusela být provedena na začátku každého automatického cyklu programu.

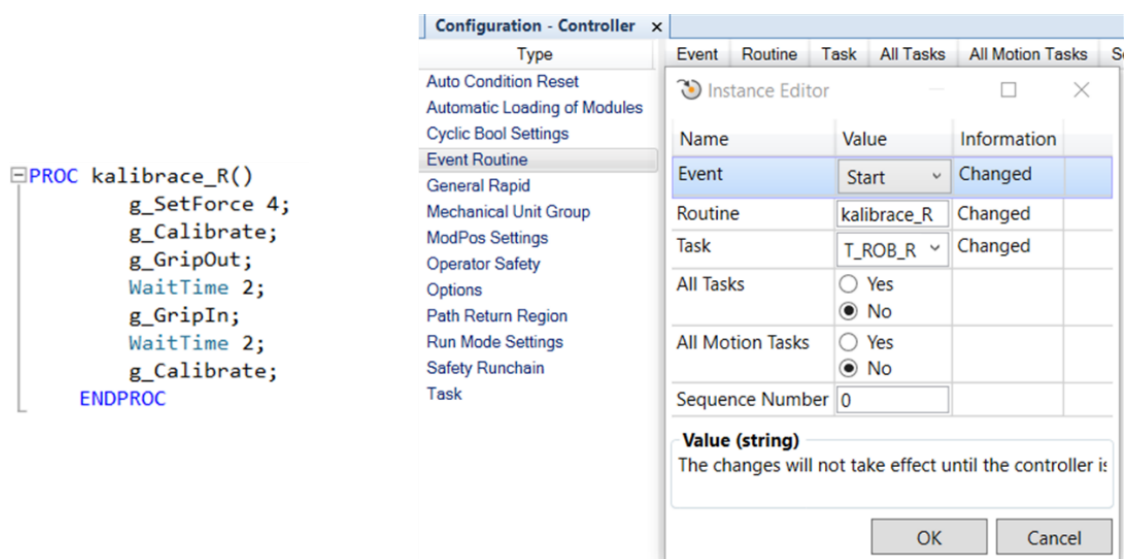


Obr. 90: Nastavení rutiny události bezpečnostní zóny

Samotná bezpečnost s použitím této zóny byla zajištěna pomocí signálu custom\_DI\_2. Těsně před každým vstupem robota do bezpečnostní zóny byla ověřena hodnota tohoto signálu. Pokud byla hodnota signálu 1, tedy pozice snímací hlavy byla na správném místě, dočasná zóna byla deaktivována a robot mohl založit/odebrat předmět kontroly. V opačném případě zóna zůstala aktivovaná a robot se zastavil na jejím okraji. Při opuštění pracovního prostoru CMM byla zóna ihned znovu aktivována. Během programování se nestalo, že by výstupní signál custom\_DO\_2 selhal, a proto situace pro ověření funkce bezpečnostní zóny musela být úmyslně vytvořena zásahem do programu. Bezpečnostní zóna byla vytvořena správně a fungovala přesně podle očekávání.

## 7.5.2 Automatická kalibrace nástroje robota

Jelikož po každém zapnutí robota bylo nutné kalibrovat oba nástroje, byla pro tuto činnost také vytvořena automatická rutina. Původně byla tato rutina na začátku každého cyklu programu, kde její použití bylo ovšem zbytečné. Nebylo totiž potřeba kalibrovat paralelní prsty po každém programovém cyklu, ale pouze jednou po zapnutí robota. Stejně jako u bezpečnostní zóny byla vytvořena systémová rutina s názvem kalibrace pro každé robotické rameno, která byla provedena pouze jednou pomocí rutiny události při spuštění programu robota. Vytvořená rutina pro kalibraci a její nastavení pomocí rutiny události je na Obr. 91.



Obr. 91: Kalibrační rutina (vlevo) a nastavení rutiny události pro kalibraci (vpravo)

### 7.5.3 Dotlačení předmětu kontroly do přípravku

Pro zajištění přesné pozice předmětu kontroly v přípravku byly navíc do základních rutin pravého robotického ramene přidány programové instrukce ContactL pro dotlačení předmětu kontroly do určené pozice. Instrukce ContactL slouží pro lineární posuv nástroje robota, který umožňuje kontakt s okolními předměty bez hlášení kolize. ContactL může být omezen argumentem s maximálním definovaným momentem síly. Teprve při překročení maximálního momentu nastane kolize. Ukázka dotlačení předmětu kontroly do přípravku s využitím instrukce ContactL je uvedena na Obr. 92.



Obr. 92: Použití instrukce ContactL pro dotlačení předmětu kontroly do přípravku

### 7.5.4 Použití integrované kamery

Za účelem expozice pracoviště byla do programu zakomponována rutina s využitím integrované kamery robota. V případě chybějícího předmětu kontroly v přepravce se robot na konci celého cyklu přemístil nad vymezený prostor a pomocí kamery pořídil snímek. Na základě podobnosti předmětu ve vymezeném prostoru byl chybějící předmět kontroly odebrán a zařazen zpět na volnou pozici ve vstupní přepravce. Kompletní nastavení kamery a vytvoření rutiny bylo provedeno pomocí kombinace offline a online programování.

Prvním krokem bylo vytvoření programu kamery (job). Tato část obsahovala kalibraci kamery podle kalibračního listu, nastavení času expozice snímku (ovlivňuje množství světla na snímku), nastavení přisvícení kamery nebo také vytvoření souřadného systému



kamery (osy X a Y) uprostřed kalibračního listu. Druhým krokem bylo vytvoření pracovního objektu (work object), který byl využit pro vytvoření souřadného systému uprostřed kalibračního se stejně orientovanými osami X a Y jako při kalibraci kamery. Pracovní objekt byl sestaven přestavením robotického ramene a uložením 3 krajních bodů na kalibračním listu. Díky tomu byl souřadný systém kamery a pracovního objektu robota stejný a robot věděl jakým směrem se musí posunout pro správné odebrání předmětu kontroly. Třetím krokem bylo vytvoření a nastavení vzoru (pattern), který bude robot vyhledávat. Vzorem byl předmět kontroly a vyhodnocovaným vstupem na snímku bylo jeho posunutí v osách X a Y ve vytvořeném souřadném systému uprostřed kalibračního listu. Vzhledem ke tvaru předmětu kontroly nebyly žádné další vstupy jako například rotace předmětu potřeba. Po vytvoření vzoru následovalo vytvoření programové rutiny. Pro zjednodušení byla využita funkce Snippet, která vložila předdefinovanou rutinu pro odebrání předmětu na základě kamery. Rutina obsahuje poměrně srozumitelný návod postupu úpravy, podle kterého byla rutina kompletně sestavena. Finální vytvořená rutina pro odebrání předmětu kontroly kvality s využitím kamery je uvedena na Obr. 93.

```
PROC MoveToDetectedObject()
  MoveJ homer,v1000,z50,GripperR;
  g_GripOut;
  MoveJ foto_msv, v500, z50, GripperR;

  CamSetProgramMode mycamera;
  CamLoadJob mycamera, myjob;
  CamSetRunMode mycamera;

  CamReqImage mycamera;
  CamGetResult mycamera, mycameratarget\MaxTime:=2;
  wobj_cam_msv.oframe := mycameratarget.cframe;

  MoveJ [[-105.90,-375.62,377.64],[0.128288,-0.721651,0.677123,-0.0653242],[0,1,1,4],[-145.334,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]], v100, fine, GripperR;
  MoveJ Offs(myrobtarget,0,0,90), v100, fine, GripperR\WObj:=wobj_cam_msv;
  MoveL myrobtarget, v100, fine, GripperR \WObj:=wobj_cam_msv;
  g_GripIn\holdForce:=6;
  MoveJ Offs(myrobtarget,0,0,90), v100, fine, GripperR\WObj:=wobj_cam_msv;
  MoveJ c10, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ c20, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ c40, v1000, z50, GripperR;
  MoveL c30, v1000, fine, GripperR;
  g_MoveTo 17;
  MoveL c40, v1000, fine, GripperR;
  MoveJ c50, v1000, z50, GripperR;
  MoveJ homer,v1000,z50,GripperR;

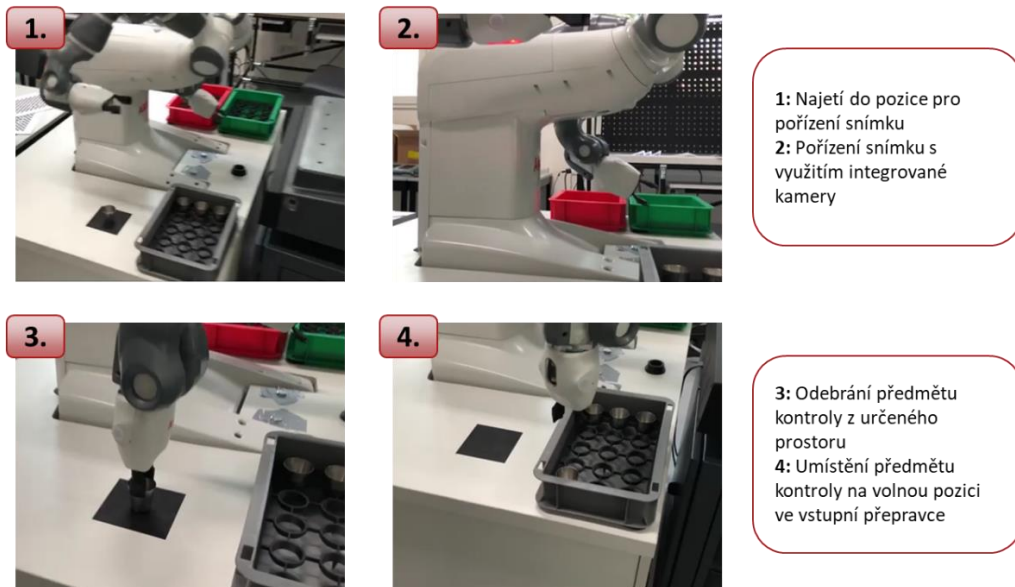
  ERROR
  IF ERRNO=ERR_CAM_MAXTIME THEN
  MoveJ homer,v100,fine,GripperR;
  RETURN;
  ENDF
ENDPROC
```

Obr. 93: Kompletní rutina pro odebrání předmětu kontroly s využitím kamery

Pro dokončení nastavení kamery bylo nutné při prvním spuštění ještě upravit pozici targetu k odebrání předmětu kontroly. Na základě úpravy targetu při prvním spuštění bylo robotu určeno, jak odebírat předměty kontroly. Tím byl celý proces nastavení kamery a vytvoření rutiny dokončen a byl plně funkční. Na závěr byla ještě vytvořena



funkce pro přeskočení chybového hlášení (ERROR HANDLER), které vyskočilo při nenalezení předmětu kontroly a program robota se kvůli tomu zastavil. Kamera byla nastavena správně a odebírání předmětů kontroly a jejich umístění zpět do vstupní přepravky s využitím kamery fungovalo. Proces odebrání předmětu kontroly s využitím kamery je zobrazen na Obr. 94.



Obr. 94: Odebrání předmětu kontroly s využitím kamery

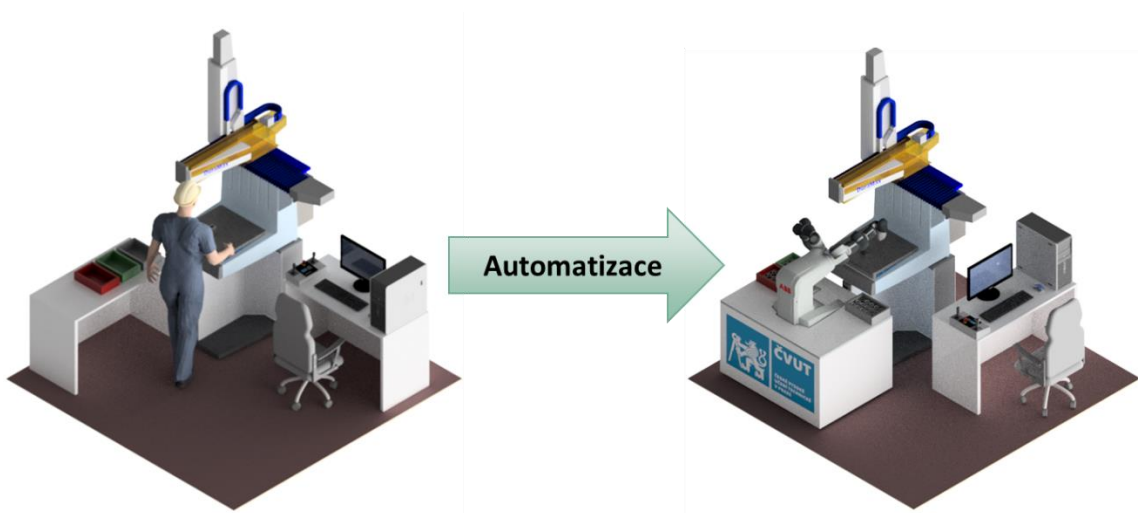
### 7.5.5 Doplnění činnosti robota během cyklu měření

Posledním přidaným vylepšením programu bylo vyplnění prostoru doby měření, kdy robot zůstával pozastaven a čekal na digitální signál, který informoval o dokončení měření. Cílem doplnění této rutiny do programu robota bylo demonstrovat možné využití robota i během cyklu měření. Robot nemusí pouze stát a čekat na signál od CMM. Tato rutina byla vytvořena pouze za účelem expozice pracoviště. Rutina se skládala z několika jednoduchých pohybových instrukcí, které byly sestaveny tak, aby napodobily činnost zamávání lidské ruky. Kompletní rutina pro zamávání během automatického cyklu měření je zobrazena na Obr. 95.



## 8 Technicko-ekonomické zhodnocení

V diplomové práci bylo navrženo a zrealizováno automatizované pracoviště kontroly kvality s využitím kolaborativního robota. Tato kapitola se věnuje porovnání navržené automatizované varianty pracoviště a původní varianty, kde řídicí činnost CMM byla vykonávána kvalifikovanou obsluhou bez použití robota. Postupně byly zhodnoceny hlavní technicko-ekonomické dopady na výsledný optimalizovaný proces. Pro ilustraci byla vytvořena jednoduchá varianta neautomatizovaného pracoviště, která byla porovnávána s finálním automatizovaným pracovištěm kontroly kvality (viz Obr. 96). K porovnání byla použita finální varianta pouze s částečnou automatizací procesu bez úprav programu, které byly vytvořeny pro účely expozice pracoviště. Z důvodu možného srovnání obou variant tedy robot nepřekládal předměty zpět do vstupní přepravy, nepoužíval integrovanou kameru a během chodu CMM neprováděl zbytečné pohyby.



Obr. 96: Ilustrativní zobrazení porovnávaných variant pracoviště

### 8.1 Zhodnocení technických dopadů navržené varianty

Zavedení automatizace na pracoviště kontroly kvality bude mít několik přínosů, které jsou dostatečným důvodem pro provedení navržené automatizace s využitím kolaborativního robota. Jednoznačným přínosem je eliminace člověka z procesu, která povede k úsporám drahé lidské práce, lepšímu vytížení CMM, zvýšení produktivity a rychlosti kontroly kvality nebo také dosažení lepší stability procesu.

Prvním technickým opatřením je zlepšení zakládání předmětů kontroly do přípravku. Použitím robotického ramene a programové instrukce pro dotlačení je zaručeno téměř totožné uložení předmětu do přípravku se zaručenou maximální opakovatelností 0,02 mm. Člověk by takové opakovatelné přesnosti nejspíše nedosáhl a předmět kontroly by do přípravku založil pokaždé trochu jinak. Bylo proto nutné řešit pracoviště tak, aby se eliminovala chyba obsluhy, což je současnou praxí.

Použitím kolaborativního robota by se částečně zvýšila rychlost a produktivita. Čas manipulace předmětu kontroly je ovšem v tomto případě několikanásobně kratší než čas samotného automatického cyklu měření CMM. Automatický cyklus měření jednoho předmětu kontroly trval přibližně 51 sekund. U původní varianty bez kolaborativního robota doba vedlejšího času, kdy CMM neprovádí měření, nebyla známá, a proto bylo nutné tuto hodnotu určit. K tomu bylo využito normování práce pomocí stanovení normálního manuálního výkonu. Normální výkon, co se týče pohybů a jejich koordinace, je obzvláště harmonický, přirozený a vyrovnaný výkon, který připadá zkušenému pozorovateli normální. [57]

Určení normálního výkonu bylo provedeno pro obvyklou činnost obsluhy na pracovišti kontroly kvality. Tato činnost začínala po automatickém cyklu měření CMM kontrolou výsledku měření na monitoru počítače. Na základě vyhodnocení měření následovalo umístění předmětu kontroly do příslušné přepravy a založení dalšího předmětu kontroly ze vstupní přepravy do přípravku na pracovní desce CMM. Poté obsluha spustila další cyklus měření. Tato souvislá činnost byla provedena celkem desetkrát a pro každý pokus byl pořízen videozáznam. Na základě videozáznamu byla jako normální výkon posouzena doba 20 sekund, při které se prováděný pohyb zdál nejvíce přirozený a harmonický. Vedlejší čas u automatizovaného pracoviště, kdy CMM neprováděl žádné měření a robot manipuloval s předmětem kontroly, byl automatizací zkrácen na konečných 8 sekund. Výsledná doba kontroly jednoho předmětu na automatizovaném pracovišti byla 59 sekund a za předpokladu času jedné směny 450 minut by se za směnu zkontrolovalo přibližně 457 kusů. Na neautomatizovaném pracovišti vycházela celková doba kontroly na 71 sekund a za stejně dlouhou směnu by se zkontrolovalo přibližně 380 kusů. Automatizací pracoviště by tedy došlo ke zvýšení produktivity kontroly kvality

o 20,3 %. Pro přesnější určení produktivity neautomatizovaného pracoviště by bylo vhodné kvantifikovat další ztrátové časy obsluhy jako například osobní ztráty, čas na jídlo a oddech, nebo čas na přirozené potřeby a hygienu člověka. To ovšem nebylo předmětem této práce, a proto další porovnání pracovišť z tohoto hlediska nebylo provedeno. Pro účely této práce bylo zásadní, že použitím automatizace dojde ke zvýšení celkové produktivity pracoviště.

Důležitým přínosem byla eliminace potřeby kvalifikované obsluhy CMM. V oblasti metrologie je spíše nedostatek způsobilých zaměstnanců, který by byl použitím robota vyřešen. Přínosem eliminace kvalifikované obsluhy je snížení provozních nákladů v podobě úspory mzdy na kvalifikovanou obsluhu pracoviště. S eliminací člověka z procesu částečně souvisí i všechny další zmíněné technicko-ekonomické dopady na pracoviště. V reálném procesu by činností člověka zůstalo pouze zásobování pracoviště s nezkontrolovanými předměty kontroly. Zásobování pracoviště bylo provedeno celkem třikrát za směnu a každých 14,75 minuty po uplynutí cyklu kontroly celé vstupní přepravy byly v rozmezí 51 sekund (během kontroly posledního předmětu v přepravce) vyměněny všechny tři přepravy na pracovišti. Pro reálné využití v praxi by bylo vhodnější použití větších přepravek, aby se prodloužil cyklus kontroly jedné vstupní přepravy.

Odstraněním lidské práce se zároveň zamezilo vzniku možných chyb, které by člověk během práce mohl snadno způsobit. Zatímco robot žádné chyby nedělá a celý program provede pokaždé naprosto stejně v rámci zaručené maximální opakovatelnosti pohybu 0,02 mm. Nemůže se tak stát, že by si robot spletl přepravku a založil nevyhovující předmět do přepravy s vyhovujícími. Nemůže dojít ke spuštění automatického cyklu bez předmětu kontroly. Založení předmětu kontroly bude mít výrazně menší, nebo žádný vliv na výsledky měření. Robotovi se nestane, že by provedl měření jednoho kusu omylem vícekrát, ani nezpůsobí žádné jiné drobné chyby, které ve výsledku snižují produktivitu nebo stabilitu celého procesu.

Naopak nevýhodou může být horší flexibilita procesu, způsobena nástrojem robota a speciálními přípravky, které bude nutné přizpůsobovat jednotlivým předmětům kontroly. V našem případě bylo ovšem uvažováno použití pracoviště pouze pro zvolený

předmět kontroly ve dvousměnném provozu. Druhou nevýhodou je větší zastavěná plocha pracoviště, která je rozšířena o nový stůl s robotem YuMi.

Na základě technického zhodnocení se automatizací pracoviště zvýší produktivita kontroly kvality o 20,3 %, eliminuje se vliv člověka na výsledky kontroly měření, sníží se potřeba kvalifikovaných zaměstnanců pro obsluhu CMM a zvýší se celková stabilita procesu. Nasazení automatizace je plánované pro sériovou výrobu, a proto je horší flexibilita pracoviště přijatelnou nevýhodou z důvodu velkého množství předmětů kontroly. Většina přínosů převyšuje zmíněné nevýhody automatizovaného pracoviště, a proto na základě technického hodnocení je nová varianta pro sériovou výrobu vhodnější. Nejdůležitějším parametrem zhodnocení obou variant je potenciální ekonomický přínos a snížení provozních nákladů, kterému se věnuje kapitola 8.2.

## 8.2 Zhodnocení ekonomických dopadů navržené varianty

Cílem zhodnocení ekonomických dopadů je zjištění, jestli se vyšší počáteční investice do automatizace vyplatí. Automatizovaná varianta pracoviště by měla mít nižší provozní náklady a po určité době by měla vykazovat ekonomický přínos. Důvodem k automatizaci ovšem může být i výrazné zlepšení technické stránky pracoviště s přijatelnou ztrátou. Předpokladem pro zhodnocení ekonomických dopadů je, že původní varianta pracoviště byla již vytvořena a uvažuje se investice do automatizace pracoviště. Pro obě varianty byly určeny zjednodušené provozní náklady pouze s položkami, kterými se obě pracoviště liší. Investiční náklady byly vyjádřeny jen pro novou variantu automatizované kontroly kvality. Do investičních nákladů (viz Tabulka 8) tedy nebyl započítán stůl pro počítač CMM DuraMax, ani přípravek na pracovní desce stroje, protože tyto položky jsou pro obě varianty stejné.

Tabulka 8: Odhad investičních nákladů na automatizaci pracoviště

ODHAD INVESTIČNÍCH NÁKLADŮ NA REALIZACI PRACOVIŠTĚ	
POLOŽKA	NÁKUPNÍ CENA POLOŽKY [Kč]
Robot YUMI	1 000 000
100 kusů barevných přepravek	10 000
Speciální stůl pro robota	20 000

Odhad celkové ceny 3D tisku přípravků	75 000
Jednorázová platba za realizaci pracoviště (Integrátor robotů)	200 000
<b>CELKOVÉ NÁKLADY</b>	<b>1 305 000</b>

Stejně jako u investičních nákladů se pro zjednodušení počítalo pouze s rozdílnými provozními náklady na pracoviště. Velikost hospodářského výsledku byla poté určena jako zdaněný rozdíl provozních nákladů bez odpisů, a proto se stejné položky provozních nákladů nemusely uvádět. Stejně položky se totiž odečetly a neměly na výsledek žádný vliv. Jako první bylo provedeno sestavení odhadu ročních provozních nákladů původního neautomatizovaného pracoviště (viz Tabulka 9), kde řídicí činnost vykonával člověk. Obsluha v tomto případě řídila celý proces kontroly měření, zakládala a vhodně umísťovala předměty do přípravku na stole CMM, zapínala cyklus měření a zajišťovala zásobování pracoviště. Pracovník se věnoval výhradně tomuto pracovišti.

*Tabulka 9: Odhad rozdílných položek provozních nákladů neautomatizovaného pracoviště*

<b>ROČNÍ PROVOZNÍ NÁKLADY NEAUTOMATIZOVANÉHO PRACOVIŠTĚ</b>	
<b>POLOŽKA</b>	<b>ROČNÍ CENA POLOŽKY [Kč]</b>
Superhrubá mzda dvou zaměstnanců (100 % mzdy)	804 000
<b>CELKOVÉ NÁKLADY</b>	<b>804 000</b>

Druhé v pořadí byly sestaveny rozdílné položky ročních provozních nákladů automatizovaného pracoviště (viz Tabulka 10) kontroly kvality. Místo obsluhy pracoval robot a předměty kontroly byly na pracoviště dopravovány třikrát za směnu příslušným pracovníkem. Tento pracovník, kromě zásobování, jednou za 14,75 minuty vyměnil všechny tři přepravky a zbytek pracovní doby prováděl jinou zadanou pracovní činnost. Celková doba zásobování pracoviště (3x za směnu) a doba výměn tří přepravek (30x za směnu) byla odhadnuta na 55 minut za jednu směnu. Poměrem byly určeny mzdy zaměstnancům, které byly přibližně 12,5 % z celkového platu, protože zásobování tohoto pracoviště zabralo pouze 55 minut z celého času směny 450 minut.

Tabulka 10: Odhad rozdílných položek provozních nákladů automatizovaného pracoviště

ROČNÍ PROVOZNÍ NÁKLADY AUTOMATIZOVANÉHO PRACOVISTĚ	
POLOŽKA	ROČNÍ CENA POLOŽKY [Kč]
Superhrubá mzda dvou zásobovačů (pouze 12,5 % ze mzdy)	100 500
Superhrubá mzda programátora (pouze 5 % ze mzdy)	24 200
Náklady na údržbu robota	14 000
Spotřeba elektřiny (pouze robot)	5 300
Náklady na obnovu 3D tisknutých součástí	8 000
<b>CELKOVÉ NÁKLADY</b>	<b>152 000</b>

Po vytvoření přehledu investičních a provozních nákladů byl vypočten výsledek hospodaření, odpisy a cash flow (peněžní tok, zkráceně CF) v jednotlivých letech po celou dobu životnosti investice (viz Tabulka 11). Předpokládaná životnost investice robotizovaného pracoviště je odhadnuta na 9 let při dvousměnném provozu. Investice je odepsána během prvních pěti let a velikost odpisů je pro zjednodušení v tomto období statická.

Tabulka 11: Výpočet hospodářského výsledku, odpisů a cash flow v jednotlivých letech

ROKY	Investice do pracoviště	
Roční cash flow v letech 2019 až 2023	Hospodářský výsledek	308 890 Kč
	Odpisy	261 000 Kč
	Cash flow	569 890 Kč
Roční cash flow v letech 2024 až 2027	Hospodářský výsledek	515 080 Kč
	Odpisy (vše odepsáno)	0 Kč
	Cash flow	515 080 Kč
<b>Celkem 2019-2027 (9 let)</b>	<b>Hospodářský výsledek</b>	<b>3 604 770 Kč</b>
	<b>Odpisy</b>	<b>1 305 000 Kč</b>
	<b>Cash flow</b>	<b>4 909 770 Kč</b>

Pro přesnější výpočet čisté současné hodnoty (ČSH) a doby návratnosti investice byly vypočteny diskontované cash flow při diskontní sazbě 9 %. Tato diskontní sazba byla



zvolena, protože investice do automatizace pracoviště nepodléhá vysoké míře rizika. Čistá současná hodnota je generované množství peněz, které investice doposud přinesla. Hodnota ČSH pro každý rok byla vypočtena jako rozdíl kumulovaného cash flow a původní investice. Z diskontovaných cash flow a investice byla poté určena výsledná doba návratnosti, která při této diskontní míře bude přibližně 2,7 roku.

Tabulka 12: Výpočet kumulované cash flow a odhad doby návratnosti při diskontní míře 9 %

ČSH PŘI DISKONTNÍ SAZBĚ 9 %					
ROK	INVESTICE	DFi	CFi	Kumulované CF	ČSH
2019	1 305 000 Kč	0,917	522 589 Kč	522 589 Kč	-782 411 Kč
<b>2020</b>		0,842	479 847 Kč	1 002 437 Kč	-302 563 Kč
2021		0,772	439 955 Kč	<b>1 442 392 Kč</b>	<b>137 392 Kč</b>
2022		0,708	403 482 Kč	1 845 874 Kč	540 874 Kč
2023		0,650	370 429 Kč	2 216 302 Kč	911 302 Kč
2024		0,596	306 987 Kč	2 523 290 Kč	1 218 290 Kč
2025		0,547	281 748 Kč	2 805 039 Kč	1 500 039 Kč
2026		0,502	258 570 Kč	3 063 609 Kč	1 758 609 Kč
2027		0,460	236 936 Kč	3 300 546 Kč	1 995 546 Kč

Na základě ekonomického zhodnocení obou variant pracoviště byla vypočtena přibližná doba návratnosti vysoké vstupní investice 2,7 roku. Zásadní rozdíl a výhoda automatizovaného pracoviště je výrazná minimalizace ročních provozních nákladů. Náklady byly sníženy především eliminací drahé lidské práce, která byla z největší části nahrazena kolaborativním robotem. Automatizace pracoviště by v tomto případě na základě ekonomického, ale i technického zhodnocení byla jednoznačně přínosná. Technicko-ekonomické zhodnocení je platné pouze pro uvedené pracoviště se sériovou výrobou. Pokud by se cokoli změnilo, je nutné celé zhodnocení provést znovu od začátku.

## 9 Realizace pracoviště

První krokem pro realizaci bylo určení vhodného pracoviště pro automatizaci. Na základě rešerše bylo pro automatizaci pomocí kolaborativního robota vybráno pracoviště zabývající se kontrolou kvality. Nejprve byl určen předmět kontroly kvality (kalíšek) společně s vhodnými stroji, které byly vyhovující pro kontrolu kvality daného předmětu a zároveň byly dostupné. Za tímto účelem byl vybrán CMM DuraMax, který byl využit pro měření kuželovitosti pomocí tří řezů a rovinnosti dna předmětu kontroly. Automatický program měření pro CMM DuraMax byl vytvořen v softwaru Calypso od Carl Zeiss spol. s.r.o. Druhým vybraným strojem byl kolaborativní robot YuMi, který v procesu nahradil kvalifikovanou obsluhu, zakládal a odebíral předměty kvality a zastával řídicí činnost nad CMM DuraMax. Podle zvoleného předmětu kontroly kvality a příslušných strojů byl poté proveden návrh vhodného vybavení pracoviště. Byly navrženy a na zakázku vyrobeny dva pracovní stoly s tím, že byl využit původní ocelový nosný stůl pod robotem YuMi. Dále bylo navrženo a na 3D tiskárně vytisknuto několik komponent a přípravků pro předmět kontroly. Byly objednány barevné přepravky a z oceli byl obroben přípravek na pracovní stůl CMM. Finálním uspořádáním pracoviště byla zvolena navržená varianta 5 (viz 5.5.5), která se od zrealizovaného pracoviště lišila jen v drobných detailech, jak je vidět na Obr. 97, Obr. 98 a Obr. 99. Nebyly tedy provedeny žádné zásadní úpravy rozměrů ani změny vzdáleností obou strojů, které by se lišily od finální varianty. Spíše minimální korektury uspořádání a pozice pomocného pracoviště se stolním počítačem pro DuraMax, která na automatizované pracoviště kontroly kvality nemá žádný vliv.

Důležitým krokem před zakoupením, vyrobením, nebo zapůjčením všech součástí pracoviště bylo ověření jeho funkčnosti s využitím softwaru RobotStudio. V tomto programu byla vytvořena zjednodušená simulace základních pohybů, které byly zásadní pro proces kontroly kvality. Ověřena byla především možnost přímočarého zasunutí a odebrání předmětů kontroly z přípravku na pracovním stole CMM DuraMax, protože základní pracovní rovina robota byla výrazně níže než pracovní rovina CMM. Postupně byly vytvořeny čtyři základní pohybové rutiny, které ověřily funkčnost navržené varianty s využitím kolaborativního robota YuMi. Díky vytvořené fungující simulaci pohybu

robota řízeného pomocí virtuální řídicí jednotky v RobotStudios bylo následně rozhodnuto, že navržená varianta pracoviště je uskutečnitelná a je možné začít realizovat vybavení pracoviště. Celé pracoviště bylo sestaveno podle určeného uspořádání ve finální variantě.

Posledním, ale nejzásadnějším krokem realizace pracoviště bylo programování robota. Při programování bylo vytvořeno 90 základních pohybových rutin, které byly synchronizovány pomocí příslušných programových instrukcí. Pro komunikaci robota s CMM DuraMax byly použity čtyři digitální signály, které zajistily především správný chod automatické kontroly kvality, ale i vzájemnou bezpečnost obou strojů. Celý program byl podrobně otestován, odladěn a doplněn tak, aby automatický cyklus byl co nejkratší, a kromě doplnění přepravek s předměty kontroly nevyžadoval v žádném případě přítomnost obsluhy. Pro účely expozice bylo pracoviště kompletně automatizováno a nevyžadovalo ani doplňování přepravek s dalšími předměty kontroly. Použitím výsledného programu robot postupně vkládal nezkontrolované předměty kontroly do přípravku a spouštěl automatickou kontrolu CMM. Na základě výsledku kontroly (digitálního signálu) ze softwaru Calypso robot odebral předmět kontroly a vložil předmět do jedné z přepravek. Při chybějícím předmětu kontroly robot automaticky přešel do další pozice a nezakládá „vzduch“. Po dokončení měření robot pomocí proměnných věděl, jaké pozice v přeprávkách jsou obsazené a s využitím překládacího přípravku přeložil všechny předměty kontroly zpět do vstupní přepravy. Při programování byla také využita integrovaná kamera pro odebrání chybějících předmětů kontroly, nebo například dočasná bezpečnostní zóna, která sloužila jako druhá úroveň ochrany snímací hlavy CMM DuraMax. Kompletní program obou robotických ramen měl téměř 3450 programových řádků.

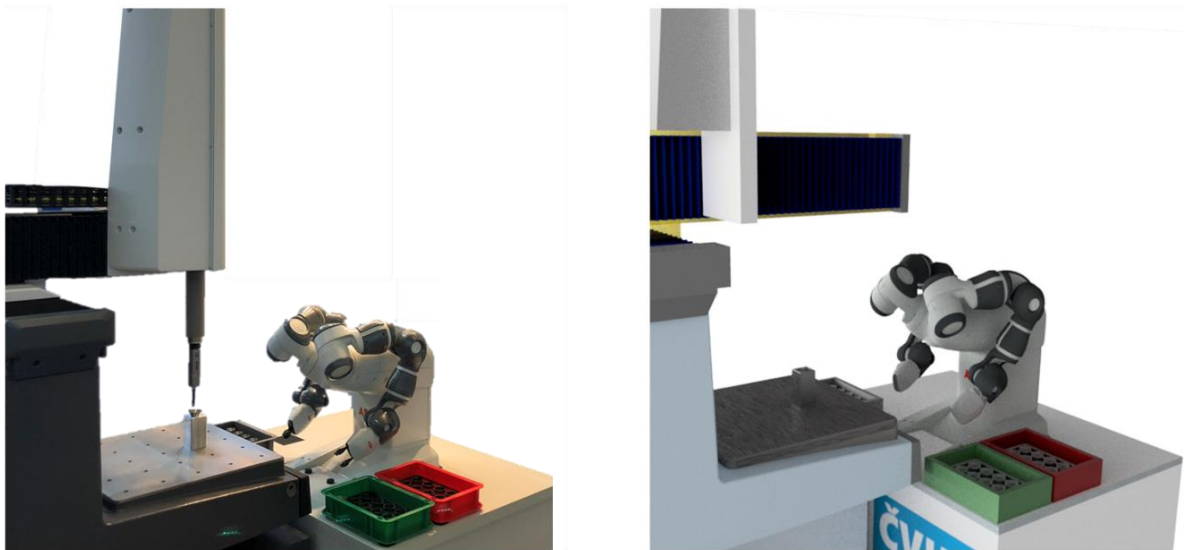
Dokončením programování bylo pracoviště hotové a kompletně zrealizované. Realizace pracoviště byla provedena ve školních laboratořích ústavu 12134 skupiny technologického projektování, odkud bylo poté celé pracoviště převezeno na prezentaci. Před transportem bylo pracoviště ověřeno několikadenním provozem, který však neodhalil žádné nedostatky. Zrealizované pracoviště automatické kontroly kvality v porovnání s modelem finální varianty je zobrazeno na Obr. 97, Obr. 98 a Obr. 99.



Obr. 97: Pohled zprava na zrealizované pracoviště (vlevo) a porovnání s modelem (vpravo)



Obr. 98: Pohled zezadu na zrealizované pracoviště (vlevo) a porovnání s modelem (vpravo)



*Obr. 99: Pohled zleva na zrealizované pracoviště (vlevo) a porovnání s modelem (vpravo)*

Pracoviště bylo zcela funkční a nevyžadovalo žádné další úpravy. Automatizované pracoviště kontroly kvality s využitím kolaborativního robota mohlo být snadno implementováno do reálného procesu v praxi. Vrcholem realizace byla veřejná prezentace automatizovaného pracoviště kontroly kvality na Mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně 2018.

## 10 Závěr

Předmětem diplomové práce bylo navrhnout a zrealizovat automatizaci procesu pro pracoviště kontroly kvality. V úvodní části práce byla zpracována rešerše problematiky automatizace a robotizace a byly popsány základy kolaborativní robotiky a bezpečnosti na pracovištích s využitím těchto robotů. Zjištěné poznatky v oblasti bezpečnosti kolaborativních robotů byly využity pro komplexní návrh automatizovaného pracoviště.

V praktické části byl popsán komplexní návrh automatizace pracoviště kontroly, který byl zpracován na základě získaných poznatků z rešerše. Nejprve byl vybrán předmět kontroly, který byl vhodný k prezentaci pro ukázkou automatizované kontroly s využitím robota. Tímto předmětem byl zvolen kalíšek s vygravírovaným znakem ČVUT. Podle předmětu kontroly byly dále vybrány vhodné stroje pro provádění kontroly (CMM), manipulaci s předmětem (robot) a řídicí činnost (robot). Na základě zmíněných vstupních parametrů (předmět a stroje) bylo komplexně navrženo ostatní vybavení a rozmístění pracoviště. Výsledkem návrhu automatizace bylo pět variant pracoviště. Nejvhodnější variantou byla zvolena varianta z hlediska nejlepšího dosahu robota na pracovní stůl a nejmenších omezení při programování.

Finální varianta byla poté ověřena a simulována v softwaru RobotStudio. V RobotStudiu byly vytvořeny základní pohybové trajektorie robota, které ověřily dostatečný dosah robota na pracovní desku stolu CMM.

Ověřené pracoviště bylo poté sestaveno v laboratořích, kde byl postupně pomocí kombinace offline a online programování vytvořen celý program robota. Celkově bylo vytvořeno 90 základních rutin pro obě robotická ramena. Obě ramena byla synchronizována pomocí programových instrukcí a díky digitálním signálům ovládala celý proces kontroly kvality. Díky tomu byly předměty kontroly podle hodnoty vstupního signálu zakládány do zelené (vyhovující) a červené (nevyhovující) přepravky. Celý program byl odladěn a doplněn o řadu dalších vylepšení, která například snížila vedlejší časy, kdy stroj neměří, nebo zvýšila ochranu proti vzájemné kolizi obou strojů. Zrealizované pracoviště bylo poté otestováno několikadenním provozem, který neodhalil žádné nedostatky.

V závěru práce byly zhodnoceny technicko-ekonomické dopady navržené automatizace na pracoviště. Odhadovaná doba návratnosti investice je 2,7 roku a technické přínosy převyšují vzniklé nevýhody.



## 11 Seznam použité literatury

- [1] LACKO, Branislav, Pavel BENEŠ, Ladislav MAIXNER a Ladislav ŠMEJKAL. *Automatizace a automatizační technika: Systémové pojetí automatizace*. První. Praha: Computer Press, 2000. Všechny cesty k informacím. ISBN 80-722-6246-7.
- [2] GROOVER, Mikell. *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*. Fourth edition. Boston: Pearson, 2015. ISBN 978-0-13-349961-2.
- [3] WAGNEROVÁ, Renata a Jiří TŮMA. *Základy automatizace*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1523-7.
- [4] OPLATEK, František, Miloš LUNER, Jiří OSOBA, Karel SVOBODA a Ladislav ŠMEJKAL. *Automatizace a automatizační technika: Automatické systémy*. První. Praha: Computer Press, 2000. Všechny cesty k informacím. ISBN 80-722-6249-1.
- [5] VAŇKOVÁ, Radka. TOP 10 výrobců robotů na světě: Kolik instalovali robotů?. *Factory Automation* [online]. 2017 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/top-10-vyrobcu-robotu-na-svete-kolik-instalovali-robotu/>
- [6] SMELÍK, Lukáš. Roboty17 aneb současné trendy v robotizaci i automatizaci. *Control Engineering* [online]. 2017 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/roboty17-aneb-soucasne-trendy-v-robotizaci-i-automatizaci/>
- [7] GURGUL, Michał. *Industrial robots and cobots: Everything you need to know about your future co-worker* [online]. 2018 [cit. 2019-05-07]. ISBN 978-83-952513-0-6. Dostupné z: <https://play.google.com/books/reader?id=n-2BDwAAQBAJ&hl=cs&pg=GBS.PP1>
- [8] MILLER, Rex. *Robots and robotics: principles, systems, and industrial applications*. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2017. ISBN 978-1-259-85978-6.
- [9] SIMPSON, Colin. *Introduction to ROBOTICS*. Logic Design Publishing, 2008. ISBN 978-0-9686860-2-7.
- [10] ČECH, Vladimír. *Základy robotizácie: Rozdělení robotů a manipulátorů* [online]. In: . Trenčín, 2013 [cit. 2019-05-07].
- [11] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. První. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [12] FORMÁNEK, Josef. *Podklady k uspořádání řídicím systémům i řízení manipulátorů a robotů: výukové texty* [online]. In: . b.r., s. 13 [cit. 2019-05-07].

- [13] *PODAVAČ DRÁTU 4RA 4X4 24V PROFI* [online]. In: . b.r. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.naraditechnik.cz/prislusenstvi/260-podavac-dratu-4ra-4x4-24v-profi>
- [14] TALASAZ, Ali. *Haptics-Enabled Teleoperation for Robotics-Assisted Minimally Invasive Surgery* [online]. 2012 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Haptics-Enabled-Teleoperation-for-Robotics-Assisted-Talasaz/1806b15dacfd709108f5f6dc5988b03bbc0a6e89#paper-header>
- [15] PAGÁČ, Marek. Čtyřicet let mezi průkopníky průmyslové robotiky. *Konstrukter.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/ctyricet-let-mezi-prukopniky-prumyslove-robotiky/>
- [16] Spot: Takes a Kicking and Keeps on Ticking. *Boston Dynamics* [online]. 2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.bostondynamics.com/spot-classic>
- [17] Asimo. *Robots.nu* [online]. b.r. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://robots.nu/nl/robot/Asimo>
- [18] Roboty a manipulátory. In: *Edumat* [online]. b.r. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: [http://www.edumat.cz/texty/Roboty\\_manipulatory.pdf](http://www.edumat.cz/texty/Roboty_manipulatory.pdf)
- [19] ABB: Industrial robots. *ABB* [online]. b.r. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots>
- [20] WILLIAMS, Bob. *An Introduction to Robotics* [online]. In: . b.r., s. 24 [cit. 2019-05-09].
- [21] COLLINS, Danielle. What is a Cartesian robot?. *Linear Motion Tips* [online]. b.r. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/what-is-a-cartesian-robot/>
- [22] SMUTNÝ, Vladimír. *Kinematika robotů* [online]. In: . b.r. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: [https://cw.fel.cvut.cz/old/\\_media/courses/a3b99ro/robotismutnycz.pdf](https://cw.fel.cvut.cz/old/_media/courses/a3b99ro/robotismutnycz.pdf)
- [23] Robot Tower TR300. *Wobit* [online]. b.r. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <http://www.wobit.com.pl/en/produkt/10753/roboty-przemyslowe-tower/robot-tower-tr300/>
- [24] Mitsubishi Electric: Factory Automation. *Expo21xx* [online]. b.r. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: [https://www.expo21xx.com/automation21xx/15419\\_st3\\_control-equipment/default\\_old\\_abstract.htm](https://www.expo21xx.com/automation21xx/15419_st3_control-equipment/default_old_abstract.htm)
- [25] BARTOŠÍK, Petr. Bezpečnost kolaborativních robotů. *Automa* [online]. b.r., **2017**, 3 [cit. 2019-06-08]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: [http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/11040.pdf](http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/11040.pdf)

- [26] BJÖRN, Matthias. *Industrial Safety Requirements for Collaborative Robots and Applications: ERF 2014 – Workshop: Workspace Safety in Industrial Robotics: trends, integration and standards* [online]. In: . 2014, s. 46 [cit. 2019-06-08].
- [27] BÉLANGER-BARRETTE, Mathieu. *COLLABORATIVE ROBOTS: RISK ASSESSMENT, AN INTRODUCTION* [online]. In: . 2016, s. 20 [cit. 2019-06-08].
- [28] NELSON SHEA, Roberta. *Collaborative Robot Technical Specification ISO/TS 15066 Update* [online]. In: . b.r., s. 35 [cit. 2019-06-08].
- [29] ISO/TS 15066:2016. *Robots and robotic devices — Collaborative robots*. První. 2016.
- [30] Úvod do ISO/TS 15066. *Atp journal* [online]. 2017 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: [https://www.atpjournalsk.com/rubriky/prehľadove-clanky/uvod-do-iso-ts-15066.html?page\\_id=24990](https://www.atpjournalsk.com/rubriky/prehľadove-clanky/uvod-do-iso-ts-15066.html?page_id=24990)
- [31] PLr and PL. *Keyence* [online]. b.r. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/safetyknowledge/performance/level/>
- [32] What Does Collaborative Robot Mean ?. *Robotiq* [online]. 2015 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/what-does-collaborative-robot-mean>
- [33] HAVLE, Otto. *Kolaborativní robotika: Dočasná móda, nebo trvalý trend?* [online]. b.r. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: [http://www.controlengcesko.com/index.php?id=47&no\\_cache=1&tx\\_ttnews%5bt\\_news%5d=6755&cHash=544e46c0f9&type=98](http://www.controlengcesko.com/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews%5bt_news%5d=6755&cHash=544e46c0f9&type=98)
- [34] *Nové přístupy k bezpečnosti robotů* [online]. 2016, (06) [cit. 2019-03-31]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: [http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/54876.pdf](http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/54876.pdf)
- [35] KOUKKARI, Timo. *COLLABORATIVE ROBOTICS: Human-robot collaboration in heavy manufacturing tasks* [online]. 2016, , 12 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: [http://roboyhd.fi/wp-content/uploads/2016/12/Timo\\_Koukkari\\_HRC\\_SeAMK.pdf](http://roboyhd.fi/wp-content/uploads/2016/12/Timo_Koukkari_HRC_SeAMK.pdf)
- [36] ROBOTIQ. *COBOTS EBOOK: Collaborative Robots Buyer's Guide* [online]. 7th. b.r., 66 s. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/hubfs/COBOT%20EBOOK%20FINAL.pdf>
- [37] DUCHOSLAV, Petr. Co je to kolaborativní robot? 5 věcí, které byste o něm měli vědět. *Factory Automation* [online]. 2017 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/co-je-to-kolaborativni-robot-5-veci-ktere-byste-o-nem-meli-vedet/>
- [38] VACULÍKOVÁ, Eva. Robot nebo kobot? V čem se liší?. *Talentica* [online]. 2018 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://www.talentica.cz/robot-nebo-kobot/>
- [39] ABB: *YUMI* [online]. b.r. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/yumi>

- [40] *ABB: Technical data IRB 14000 YuMi* [online]. b.r. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-14000-yumi/irb-14000-yumi-data>
- [41] *Cobots guide: Meet the Cobots* [online]. 2017 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://cobotsguide.com/cobots/>
- [42] *AURA: Collaborative Robots. Comau* [online]. b.r. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://www.comau.com/EN/our-competences/robotics/automation-products/CollaborativeRobotsAura>
- [43] *Aura: Advanced Use Robotic Arm. Comau* [online]. Turín, 2018 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: [https://www.comau.com/Download/our-competences/robotics/Automation\\_Products/Folder\\_Aura%20Doppie.pdf](https://www.comau.com/Download/our-competences/robotics/Automation_Products/Folder_Aura%20Doppie.pdf)
- [44] *Fanuc: CR-35iA* [online]. b.r. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/spolupracuj%C3%ADc%C3%AD-roboty/collaborative-cr35ia>
- [45] *KAWADA Robotics: NEXTAGE* [online]. b.r. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://nextage.kawada.jp/en/specification/#specHontaiTable>
- [46] *KUKA: Sensitive robotics\_LBR iiwa. KUKA* [online]. 2017 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/pr%C5%AFmyslov%C3%A9-roboty/lbr%C2%A0iiwa/>
- [47] *RobotWorx: KUKA LBR IIWA 7 R800* [online]. 2019 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.robots.com/robots/lbr-iiwa-7-r800>
- [48] *Rethink robotics: Sawyer* [online]. b.r. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.rethinkrobotics.com/sawyer/>
- [49] *Shaltz automation: Rethink Robotics* [online]. 2018 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://www.shaltzautomation.com/Rethinkrobotics.html>
- [50] *Universal Robots: UNIVERSAL ROBOT UR3/UR3E* [online]. 2019 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/cs/produkty/robot-ur3/>
- [51] *Universal Robots: Budoucnost je kolaborativní* [online]. 2017, , 11 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: [https://www.universal-robots.com/media/1801267/cz\\_199915\\_ur\\_main-product-brochure\\_web\\_1.pdf](https://www.universal-robots.com/media/1801267/cz_199915_ur_main-product-brochure_web_1.pdf)
- [52] *ZEISS DuraMax: Průmyslová metrologie. Zeiss* [online]. b.r. [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/production-cmms/duramax.html>
- [53] *Souřadnicové měřicí stroje. Katedra výrobních systémů a automatizace - TUL* [online]. b.r. [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>

- [54] PETŘKOVSKÁ, Lenka. *TECHNICKÁ MĚŘENÍ A METROLOGIE TEORETICKÝ ZÁKLAD: Souřadnicové měřící stroje* [online]. 2013 [cit. 2019-06-30]. ISBN 978-80-248-3035-3. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_025/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad\\_13.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_025/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad_13.pdf)
- [55] *PLC AUTOMATIZACE: PLC - Programovatelné logické automaty* [online]. b.r. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <http://plc-automatizace.cz/knihovna/periferie/digitalni/digitalni-vstupy.htm>
- [56] *ITP Physical Computing: Digital Input & Output* [online]. 2014 [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <https://itp.nyu.edu/physcomp/lessons/microcontrollers/digital-input-output/>
- [57] *Základy normování práce: Sdružení MTM pro Českou a Slovenskou republiku, z.s. tř. Václava Klementa 869, Mladá Boleslav 293 01*. 2016.

## 12 Seznam obrázků

Obr. 1: Důvody automatizace [1].....	8
Obr. 2: Tři typy automatizace rozdělené na základě objemu výroby a variability produktů [2] .....	10
Obr. 3: Hlavní části kompletního průmyslového robota .....	12
Obr. 4: Schéma rozdělení PRaM na základě řízení a programování [11] .....	13
Obr. 5: Jednoučelový podavač drátu pro svářečky MIG/MAG [13].....	14
Obr. 6: Teleoperátor da Vinci [14] .....	14
Obr. 7: Průmyslové roboty [15] .....	15
Obr. 8: Adaptivní robot Spot od společnosti Boston Dynamics [16] .....	15
Obr. 9: Kognitivní robot Asimo od společnosti Honda [17].....	16
Obr. 10: Šest stupňů volnosti tuhého tělesa v prostoru [7] .....	17
Obr. 11: Rozdělení průmyslových robotů podle stupňů volnosti (DoF) [11].....	18
Obr. 12: Číslování os sedmiosého robota .....	18
Obr. 13: Klasifikace robotů na základě kinematické struktury řetězce [11].....	19
Obr. 14: Ukázka sériového robota (vlevo) a paralelního robota (vpravo) [19] .....	19
Obr. 15: Pohybový systém robota na základě souřadnicového systému [11] .....	20
Obr. 16: Kartézský robot [21], [22] .....	20
Obr. 17: Cylindrický robot [22], [23] .....	21
Obr. 18: Sférický robot [22] .....	22
Obr. 19: Angulární robot [19], [22] .....	22
Obr. 20: Pracovní obálky robotů IRB 4400 (vlevo) a IRB 760 (vpravo) od ABB s.r.o. [19] .....	23
Obr. 21: SCARA robot [19], [24].....	23
Obr. 22: Pracovní obálka robota IRB 910SC (SCARA) při pohledu shora [19] .....	23
Obr. 23: Vymezení vhodné oblasti použití kolaborativní robotiky [26] .....	24
Obr. 24: Soustava bezpečnostních norem [25] .....	25
Obr. 25: Druhy kontaktů člověka a robota na kolaborativním pracovišti [29].....	26
Obr. 26: Proces posouzení rizik [27] .....	27
Obr. 27: Zjednodušený princip určení požadované úrovně vlastností (PLr) [31].....	28
Obr. 28: Zjednodušený princip určení dosažené úrovně vlastností PL [31] .....	29
Obr. 29: Bezpečnostní monitorované zastavení.....	31
Obr. 30: Ruční navádění.....	31
Obr. 31: Sledování rychlosti a vzdálenosti.....	32
Obr. 32: Omezení síly a výkonu .....	33
Obr. 33: Kolaborativní robot YUMI [41].....	35
Obr. 34: Kolaborativní robot Aura [42].....	36
Obr. 35: Kolaborativní robot CR35iA [36] .....	36
Obr. 36: Kolaborativní robot NEXTAGE [36], [41].....	37
Obr. 37: Kolaborativní robot LBR iiwa 14 R820 [41].....	38
Obr. 38: Kolaborativní robot Sawyer [36], [49] .....	39
Obr. 39: Kolaborativní robot UR3 [41].....	40
Obr. 40: CMM DuraMax od společnosti Carl Zeiss spol. s.r.o. ....	44
Obr. 41: Předmět kontroly kvality .....	45

Obr. 42: Barevné přepravky určené předmětům kontroly kvality .....	46
Obr. 43: Zarážky pro zaručení přesné pozice přepravky na stole.....	47
Obr. 44: Přípravek pro určení přesné pozice předmětů kontroly kvality v přepravce ...	47
Obr. 45: Přípravek na pracovní stůl CMM .....	48
Obr. 46: Přípravek pro překládání předmětů kontroly kvality .....	48
Obr. 47: První varianta paralelních prstů robota.....	49
Obr. 48: Finální varianta paralelních prstů robota (vlevo) a zaoblená finální varianta (vpravo).....	49
Obr. 49: Hlavní stůl, který byl připojen pomocí šroubů k původnímu ocelovému stolu robota .....	50
Obr. 50: Pomocný stůl pro pracoviště CMM DuraMax .....	51
Obr. 51: Kryt na šrouby .....	51
Obr. 52: První varianta návrhu pracoviště (robot naproti CMM).....	52
Obr. 53: Druhá varianta návrhu pracoviště (robot bokem k CMM) .....	53
Obr. 54: Třetí varianta návrhu pracoviště (robot naproti CMM) .....	53
Obr. 55: Čtvrtá varianta návrhu pracoviště (robot z boku CMM) .....	54
Obr. 56: Pátá (finální) varianta návrhu pracoviště (robot naproti CMM) .....	55
Obr. 57: Vytvořená stanice s robotem YuMi (IRB 14000).....	57
Obr. 58: Kompletní pracoviště v softwaru RobotStudio.....	57
Obr. 59: Tvorba targetů pro pravé robotické rameno.....	58
Obr. 60: Tvorba targetů na předmětu kontroly kvality .....	58
Obr. 61: Editace targetu pro odebírací pozici.....	59
Obr. 62: Zobrazení nástroje robota ve všech vytvořených targetech .....	59
Obr. 63: Vizualizace trajektorie pohybu pro první předmět kontroly .....	60
Obr. 64: Vizualizace trajektorie pohybu pro druhý předmět kontroly.....	60
Obr. 65: Vizualizace trajektorie pohybu pro zakládání do zelené přepravky.....	61
Obr. 66: Vizualizace trajektorie pohybu pro zakládání do červené přepravky .....	61
Obr. 67: Kolize během simulace v RobotStudiu .....	62
Obr. 68: Definice tasklistu a syncidentu pro funkci WaitSyncTask.....	62
Obr. 69: Synchronizace programových rutin pomocí instrukce WaitSyncTask.....	63
Obr. 70: Založení virtuálního signálu v RobotStudiu .....	65
Obr. 71: Modifikace mechanismu nástroje z knihovny .....	65
Obr. 72: Vytvoření událostí pro signály v Event Manageru.....	66
Obr. 73: Ukázka vygenerovaného programu levého robotického ramene .....	67
Obr. 74: Zjednodušená vizualizace procesu v softwaru RobotStudio .....	68
Obr. 75: Zjednodušené schéma programu robota .....	69
Obr. 76: Číslování pozic předmětů kontroly v přepravce .....	70
Obr. 77: Základní rutina pro založení prvního předmětu kontroly do přípravku .....	72
Obr. 78: Použití funkce offset pro zkopírované rutiny .....	72
Obr. 79: Ukázka zkopírovaných a upravených rutin (2 a 6).....	73
Obr. 80: Schéma procesu vracení předmětů kontroly do vstupní přepravky .....	74
Obr. 81: Rutiny pro vracení předmětů kontroly do vstupní přepravky .....	74
Obr. 82: Ukázka synchronizovaných rutin pomocí instrukce WaitSyncTask .....	76
Obr. 83: Podoba synchronizovaných rutin pro vracení předmětů kontroly do vstupní přepravky .....	77
Obr. 84: Hlavní rutiny pro překládání předmětů kontroly zpět do vstupní přepravky ..	77



Obr. 85: Komunikace robota a CMM pomocí digitálních signálů.....	79
Obr. 86: Konektory pro připojení digitálních signálů na řídicí jednotce robota YuMi ...	79
Obr. 87: Kompletní hlavní rutiny pro levé (nalevo) a pravé (vpravo) robotické rameno.....	82
Obr. 88: Základní rutiny pro založení (vpravo) a odebrání (vlevo) prvního předmětu kontroly.....	83
Obr. 89: Programová rutina pro aktivaci bezpečnostní zóny (vlevo) a její zobrazení (vpravo).....	84
Obr. 90: Nastavení rutiny události bezpečnostní zóny.....	84
Obr. 91: Kalibrační rutina (vlevo) a nastavení rutiny události pro kalibraci (vpravo) ....	85
Obr. 92: Použití instrukce ContactL pro dotlačení předmětu kontroly do přípravku.....	86
Obr. 93: Kompletní rutina pro odebrání předmětu kontroly s využitím kamery .....	87
Obr. 94: Odebrání předmětu kontroly s využitím kamery .....	88
Obr. 95: Kompletní rutina využitá během cyklu kontroly kvality .....	89
Obr. 96: Ilustrativní zobrazení porovnávaných variant pracoviště.....	90
Obr. 97: Pohled zprava na zrealizované pracoviště (vlevo) a porovnání s modelem (vpravo).....	99
Obr. 98: Pohled zezadu na zrealizované pracoviště (vlevo) a porovnání s modelem (vpravo).....	99
Obr. 99: Pohled zleva na zrealizované pracoviště (vlevo) a porovnání s modelem (vpravo).....	100

## 13 Seznam tabulek

Tabulka 1: Technické specifikace robota YuMi [36], [39], [40] .....	35
Tabulka 2: Technické specifikace robota Aura [36], [43].....	35
Tabulka 3: Technické specifikace robota CR 35iA [36], [44].....	36
Tabulka 4: Technické specifikace robota NEXTAGE [36], [45] .....	37
Tabulka 5: Technické specifikace robota LBR iiwa 14 R820 [36], [46].....	38
Tabulka 6: Technické specifikace robota Sawyer [36], [48].....	39
Tabulka 7: Technické specifikace robota UR3 [36], [51] .....	40
Tabulka 8: Odhad investičních nákladů na automatizaci pracoviště.....	93
Tabulka 9: Odhad rozdílných položek provozních nákladů neautomatizovaného pracoviště.....	94
Tabulka 10: Odhad rozdílných položek provozních nákladů automatizovaného pracoviště.....	95
Tabulka 11: Výpočet hospodářského výsledku, odpisů a cash flow v jednotlivých letech .....	95
Tabulka 12: Výpočet kumulované cash flow a odhad doby návratnosti při diskontní míře 9 % .....	96

## 14 Seznam použitých zkratek a pojmů

<b>Zkratka</b>	<b>Význam zkratky</b>
CMM	Coordinate Measuring Machine
3D	Three - Dimensional
ISO	International Organization for Standardization
TS	Technical Specification
PL	Performance Level
PLr	Required Performance Level
DC	Diagnostic Coverage
MTTFd	Mean Time To Dangerous Failure
CCF	Common Cause Failure
CNC	Computer Numerical Control
TCP	Tool Center Point
DI	Digital Input
DO	Digital Output
CF	Cash Flow
ČSH	Čistá Současná Hodnota
<b>Pojem</b>	<b>Význam pojmu</b>
TTT	Tři translační (posuvné) kinematické dvojice
RTT	Jedna rotační a dvě translační kinematické dvojice
RRT	Dvě rotační a jedna translační kinematická dvojice
RRR	Tři rotační kinematické dvojice
RAPID	Programovací jazyk vysoké úrovně pro řízení robotů ABB