

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 370*

*ISSN 1213-4198*



*Ing. Radim Blecha*

**Adaptivita průmyslových robotů  
při manipulačních  
a montážních operacích**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

**Ing. Radim Blecha**

**Adaptivita průmyslových robotů při manipulačních a montážních operacích**

**Adaptability of industrial robots in handling and assembly operations**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: Doc. Ing. Ivan Vavřík, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Juraj Smrček, Ph.D.  
Prof. Ing. Jiří Skařupa, CSc.  
Doc. Dr. Ing. Radek Knoflíček

Datum obhajoby: 26. 1. 2006

**KLÍČOVÁ SLOVA:**

Průmyslový robot, koncový efektor, adaptivita, montáž

**KEY WORDS**

Industrial robot, End-effector, adaptability, assembly

**MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně

## OBSAH

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 ÚVOD.....                                                             | 5  |
| 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....                               | 5  |
| 2.1 Koncové efekторы .....                                              | 5  |
| 2.2 Senzorické vybavení robotů .....                                    | 5  |
| 2.3 Přenos dat .....                                                    | 5  |
| 3 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....                                             | 5  |
| 4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE .....                 | 6  |
| 4.1 Kreativní, analytické a racionální techniky tvůrčí práce.....       | 6  |
| 4.2 Systémová analýza a syntéza .....                                   | 6  |
| 4.3 Metoda QSOFD.....                                                   | 6  |
| 5 NÁVRH ADAPTIVNÍCH KONCOVÝCH EFEKTORŮ.....                             | 7  |
| 5.1 Systémová analýza koncového efektoru .....                          | 7  |
| 5.2 Morfologická matice adaptivních koncových efektorů .....            | 9  |
| 5.3 Adaptivní KE pro rotační součásti .....                             | 10 |
| 5.3.1 Funkční a orgánová struktura KE pro rotační součásti .....        | 10 |
| 5.3.2 Stavební struktura KE pro rotační součásti .....                  | 11 |
| 5.4 Adaptivní KE pro ploché součásti.....                               | 12 |
| 5.4.1 Funkční a orgánová struktura KE pro ploché součásti.....          | 12 |
| 5.4.2 Stavební struktura KE pro ploché součásti .....                   | 13 |
| 5.5 Adaptivní KE pro montáž šroubů.....                                 | 14 |
| 5.5.1 Funkční a orgánová struktura KE pro montáž šroubů .....           | 14 |
| 5.5.2 Stavební struktura KE pro montáž šroubů .....                     | 15 |
| 5.6 Řešení adaptivity modelového modulárního bezobslužného pracoviště . | 16 |
| 5.6.1 Uspořádání bezobslužného pracoviště .....                         | 16 |
| 6 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE.....                                        | 17 |
| 7 ZÁVĚR.....                                                            | 17 |
| 8 LITERATURA .....                                                      | 18 |
| 9 CURRICULUM VITAE .....                                                | 19 |
| 10ABSTRACT .....                                                        | 20 |



# 1 ÚVOD

Hlavním prvkem automatizace výrobních procesů se stal průmyslový robot. Nejrozšířenější aplikací robotů v automatizované výrobě sice zůstává svařování a povrchové úpravy, ale díky vývoji senzorického vybavení a rozvoje počítačů se aplikace robotů začínají silně prosazovat i v automatizované montáži, která byla dosud nespolehlivá, poruchová a stále nedokonale vyřešena.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 2.1 KONCOVÉ EFEKTORY

Výzkum a vývoj KE je velmi rychlý a v některých robotizovaných procesech spěje ke složitým mechatronickým systémům vybavených vlastními pohony a senzorickými systémy.

### 2.2 SENZORICKÉ VYBAVENÍ ROBOTŮ

Inteligentní senzory představují zásadní vývojový trend v měřicí technice a jejich hlavní výhodou je, že z nich vystupuje ověřená a přesná informace o měřené veličině.

### 2.3 PŘENOS DAT

Mezi nejpoužívanější průmyslové komunikační sběrnice patří například CAN, M-BUS, ProfiBUS a DeviceNet.

## 3 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem předložené disertační práce s názvem *Adaptivita průmyslových robotů při manipulačních a montážních operacích* je návrh adaptivních koncových efektorů pro manipulační a montážní operace průmyslového robotu IRB 4400 v diskrétním montážním pracovišti vybudovaném na VUT FSI v Brně. Tyto koncové efekторы musí splňovat následující požadavky:

- vhodné pro automatickou výměnu
- dokáže se řídicímu systému identifikovat
- dokáže s řídicím systémem komunikovat
- přenášené informace musí být odolné proti rušení
- svou strukturou musí umožňovat připojení potřebných senzorických modulů
- umožní manipulační a montážní operace s plochými součástmi
- umožní manipulační operace s rotačními součástmi
- umožní montážní operace typu kolík - díra
- umožní montážní operace typu šroub – závit

## 4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

### 4.1 KREATIVNÍ, ANALYTICKÉ A RACIONÁLNÍ TECHNIKY TVŮRČÍ PRÁCE

*Kreativní (tvůrčí) myšlení* je charakteristické tím, že hledá odlišnosti, zkoumá i to nejméně pravděpodobné, přináší nové nápady, nové přístupy k řešení problémů, nové pohledy na věci, je nespojité a divergentní.

*Analytické (logické) myšlení* je konvergentní, pohybuje se tím nejpravděpodobnějším směrem od jedné relativní věci k druhé, z ní vyplývající.

### 4.2 SYSTÉMOVÁ ANALÝZA A SYNTÉZA

Systémová analýza a syntéza představuje soubor logických a formalizovaných postupů pro zkoumání struktury a chování složitých soustav. Je to metodologicko-aplikační disciplína pro řešení multikriteriálních problémů na strukturně a procesně složitých reálných nebo abstraktních objektech.

### 4.3 METODA QSOFD

Velmi významnou částí metody QSOFD je systémová analýza. S její pomocí lze získat přehled o struktuře navrhovaného výrobku a o interakcích jeho jednotlivých prvků. To umožňuje snáze odhalit potencionální nežádoucí stavy výrobku, chyby které k těmto stavům vedou a jejich možné příčiny. Při realizování systémové analýzy se nejprve sestaví blokový diagram navrhovaného výrobku, do nějž se zakreslí interakce jeho jednotlivých prvků. Po sestavení dostatečně zpřesněných blokových diagramů jsou s jejich využitím sepsány všechny provozní a nežádoucí stavy navrhovaného výrobku, potencionální příčiny, které k těmto stavům vedou a jejich možný původ. Dále se analýzou spojitostí příčin a následků daných nežádoucích stavů zkonstruuji Ishikawovy diagramy, které přehledným způsobem zobrazují potenciální chyby vedoucí k nežádoucímu stavu. Pomocí těchto diagramů se může následně naleznout první prvek zobecněného stromu chyb a v návaznosti na něj vyšetřovat jednotlivé prvky zobrazené v blokovém diagramu systému na jejich možné nežádoucí stavy a zakreslovat příčiny těchto stavů do modelu stromu chyb. Tím se obdrží obraz souvislostí vedoucích k nežádoucímu stavu, což umožňuje včas navrhnout vhodná preventivní opatření.

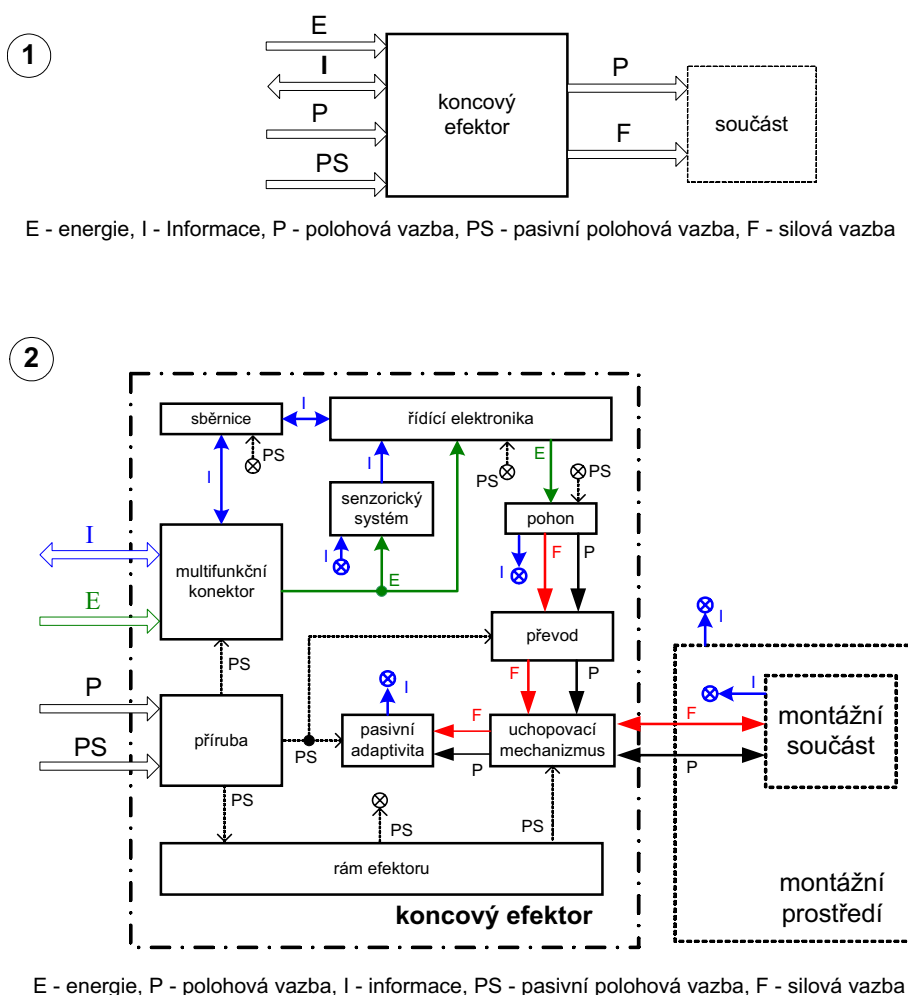
## 5 NÁVRH ADAPTIVNÍCH KONCOVÝCH EFEKTORŮ

V následujících kapitolách byl při návrhu adaptivních KE aplikován systémový přístup dle metody QSOFD.

### 5.1 SYSTÉMOVÁ ANALÝZA KONCOVÉHO EFEKTORU

Výsledkem systémové analýzy KE je blokový diagram obecného KE (Obr. 1.)

S využitím vytvořeného blokového diagramu byla sestavena přehledná tabulka, v které jsou sepsány možné potenciální nežádoucí stavy adaptivního KE a jejich příčiny (Tab. 1). Dále byl pro tento adaptivní KE sestaven Ishikawův diagram a zobecněný strom chyb. Tato tabulka a diagramy umožňují konstruktérovi včasné odhalení potenciálních konstrukčních chyb.



Obr. 1 blokový diagram obecného adaptivního koncového efektoru



**Tab. 1 nežádoucí stavy a jejich potenciální příčiny pro adaptivní KE**

| Provozní stavy      | Nežádoucí stavy                               | Potenciální příčina                     | Potenciální původ příčiny                                                      |
|---------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| manipulace a montáž | Neuchopená součást                            | Nevhodný tvar čelistí                   | Špatný konstrukční návrh čelistí                                               |
|                     |                                               |                                         | Mechanické poškození čelistí                                                   |
|                     |                                               | Nevhodný kinematický mechanismus KE     | Velké vůle nebo špatný rozsah pohybu                                           |
|                     |                                               |                                         | Nevhodné umístění uchopovací síly                                              |
|                     |                                               | Nevyhovující úchopná síla               | Mechanické poškození přívodu energie                                           |
|                     |                                               |                                         | Nedostatečně dimenzovaný pohon                                                 |
|                     |                                               |                                         | Síla uchopení je příliš velká (rozdrčená součást vypadne z čelistí)            |
|                     |                                               |                                         | Nevhodný materiál čelistí (koeficient tření)                                   |
|                     |                                               |                                         | Nevhodná pozice přísavky (nízký podtlak)                                       |
|                     |                                               |                                         | Zablokování mechanismu cizím tělesem                                           |
|                     |                                               | Špatné polohování a orientace KE        | Špatná informace o poloze                                                      |
|                     | Nevhodně uchopená součást                     | Nedostatečná úchopná síla               | Špatně dimenzovaný pohon                                                       |
|                     |                                               | Příliš velká úchopná síla               | Pohon je předdimenzovaný nebo neumožňuje seřízení uchopovací síly              |
|                     |                                               | Nevhodné umístění uchopovací síly       | Nedostatečná uchopovací síla (gravitace změni orientaci manipulované součásti) |
|                     | Předčasně upuštěná součást                    | Nedostatečná síla uchopení              | Síla není dimenzována na setrvačné účinky součásti                             |
|                     |                                               | Předčasný pokyn k uvolnění součásti     | Porucha řídicí jednotky KE                                                     |
|                     |                                               | Pokles uchopovací síly                  | Chyba v programu                                                               |
|                     |                                               |                                         | Porušení přívodu energie                                                       |
|                     | Špatné polohování a orientace KE              | Špatná informace o poloze               | Poškození uchopovacího mechanismu                                              |
|                     |                                               |                                         | Nevhodná pasivní adaptivita KE (průhyb nebo rozkmitání KE)                     |
|                     |                                               | Špatné vyhodnocení informace o poloze   | Chyba v odměřování KE (porucha senzoru)                                        |
|                     |                                               |                                         | Porucha řídicí jednotky KE                                                     |
|                     | Špatně provedená montáž                       | Špatný montážní pohyb                   | Chyba v programu                                                               |
|                     |                                               |                                         | Chyba v polohování součásti (kolize)                                           |
|                     |                                               |                                         | Chyba v orientaci součásti (vzpříčení)                                         |
|                     |                                               |                                         | Porucha řídicí jednotky KE                                                     |
|                     |                                               | Nedostatečná montážní síla              | Porucha odměřování                                                             |
|                     |                                               |                                         | Nevhodná uchopovací čelist KE                                                  |
| klidový stav        | Při odložení nedojde k uvolnění KE            | Porucha mechanismu KE                   | Poddimenzovaný pohon čelisti                                                   |
|                     |                                               |                                         | Špatné uchopení součásti                                                       |
|                     |                                               | Špatné vyhodnocení informace o uvolnění | Špatný konstrukční návrh (samosvornost)                                        |
|                     | KE v zásobníku změni polohu nebo orientaci    | Špatná konstrukce KE                    | Vzpříčení nebo zadření mechanismu                                              |
|                     |                                               |                                         | Porucha řídicí jednotky KE                                                     |
|                     |                                               | Lidský faktor                           | Porucha senzoru                                                                |
|                     | Nedojde ke správnému odebrání KE ze zásobníku | Špatné uchopení KE                      | Chyba v programu                                                               |
|                     |                                               |                                         | Mechanické poškození vodiče energie                                            |
|                     |                                               | Vzpříčení KE v zásobníku                | Poškození uvolňovacího mechanismu                                              |
|                     |                                               |                                         | Mechanické poškození přívodu energie                                           |
|                     |                                               |                                         | Podcenění statického působení (gravitace)                                      |
|                     | KE v zásobníku změni polohu nebo orientaci    | Špatná konstrukce KE                    | Zaměnitelnost KE                                                               |
|                     |                                               |                                         | Poškození mechanismu automatické výměny                                        |
|                     |                                               | Lidský faktor                           | Mechanické poškození přívodu energie                                           |
|                     | Nedojde ke správnému odebrání KE ze zásobníku | Špatné uchopení KE                      | nevhodný návrh KE / zásobník (tuhost)                                          |

## 5.2 MORFOLOGICKÁ MATICE ADAPTIVNÍCH KONCOVÝCH EFEKTORŮ

Tab. 2 ukázka struktury morfologické matice M popisující hrubou stavební strukturu adaptivního KE

| možnosti řešení                  |                           | 1                                                   | 2                                                       | 3                                                       | 4                                                 | 5                                         | 6                                         | 7                                        | 8                                        | 9                                         |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| komponenty                       |                           |                                                     |                                                         |                                                         |                                                   |                                           |                                           |                                          |                                          |                                           |
| Rozhraní robot – koncový efektor |                           |                                                     |                                                         |                                                         |                                                   |                                           |                                           |                                          |                                          |                                           |
| 1                                | výměna KE                 | ruční<br><div>M<sub>0101</sub></div>                | ruční<br>rychlovýměna<br><div>M<sub>0102</sub></div>    | automatická                                             |                                                   | efektor<br><div>M<sub>0105</sub></div>    | jiné<br><div>M<sub>0106</sub></div>       | <div>M<sub>0107</sub></div>              | <div>M<sub>0108</sub></div>              | <div>M<sub>0109</sub></div>               |
|                                  |                           |                                                     |                                                         | revolverový KE<br><div>M<sub>0103</sub></div>           | čelisti<br><div>M<sub>0104</sub></div>            |                                           |                                           |                                          |                                          |                                           |
| 2                                | připojení energie         | elektrický konektor<br><div>M<sub>0201</sub></div>  | pneumatická rychlospojka<br><div>M<sub>0202</sub></div> | hydraulická rychlospojka<br><div>M<sub>0203</sub></div> | <div>M<sub>0204</sub></div>                       | <div>M<sub>0205</sub></div>               | <div>M<sub>0206</sub></div>               | <div>M<sub>0207</sub></div>              | <div>M<sub>0208</sub></div>              | <div>M<sub>0209</sub></div>               |
|                                  |                           |                                                     |                                                         |                                                         |                                                   |                                           |                                           |                                          |                                          |                                           |
| Výkonový člen                    |                           |                                                     |                                                         |                                                         |                                                   |                                           |                                           |                                          |                                          |                                           |
| 3                                | elektrický                | stejnoseměrný                                       |                                                         | asynchronní                                             |                                                   | servomotor                                |                                           |                                          | krokový                                  |                                           |
|                                  |                           | komutátorový<br><div>M<sub>0301</sub></div>         | Ec motor<br><div>M<sub>0302</sub></div>                 | bez regulace<br><div>M<sub>0303</sub></div>             | s regulací<br><div>M<sub>0304</sub></div>         | rotační AC<br><div>M<sub>0305</sub></div> | rotační DC<br><div>M<sub>0306</sub></div> | přímočarý<br><div>M<sub>0307</sub></div> | rotační<br><div>M<sub>0308</sub></div>   | přímočarý<br><div>M<sub>0309</sub></div>  |
| 4                                | hydraulický               | válec                                               |                                                         | rotační                                                 |                                                   | kyvný                                     |                                           | kyvný                                    |                                          | <div>M<sub>0409</sub></div>               |
|                                  |                           | jednočinný<br><div>M<sub>0401</sub></div>           | dvojčinný<br><div>M<sub>0402</sub></div>                | axiální<br><div>M<sub>0404</sub></div>                  | radiální<br><div>M<sub>0405</sub></div>           | pístový<br><div>M<sub>0407</sub></div>    | lamelový<br><div>M<sub>0406</sub></div>   | lopatkový<br><div>M<sub>0408</sub></div> |                                          |                                           |
| 5                                | pneumatický               | Válec                                               |                                                         | rotační                                                 |                                                   | kyvný                                     |                                           | kyvný                                    |                                          | umělý sval<br><div>M<sub>0509</sub></div> |
|                                  |                           | jednočinný<br><div>M<sub>0501</sub></div>           | dvojčinný<br><div>M<sub>0502</sub></div>                | vícepolohový<br><div>M<sub>0503</sub></div>             | axiální<br><div>M<sub>0504</sub></div>            | radiální<br><div>M<sub>0505</sub></div>   | lamelový<br><div>M<sub>0506</sub></div>   | pístový<br><div>M<sub>0507</sub></div>   | lopatkový<br><div>M<sub>0508</sub></div> |                                           |
| 6                                | jiný                      | magnet<br><div>M<sub>0601</sub></div>               | elektromagnet<br><div>M<sub>0602</sub></div>            | pružina<br><div>M<sub>0603</sub></div>                  | ejektor<br><div>M<sub>0604</sub></div>            | jiné<br><div>M<sub>0605</sub></div>       | <div>M<sub>0606</sub></div>               | <div>M<sub>0607</sub></div>              | <div>M<sub>0608</sub></div>              | <div>M<sub>0609</sub></div>               |
|                                  |                           |                                                     |                                                         |                                                         |                                                   |                                           |                                           |                                          |                                          |                                           |
| 7                                | umístění výkonového členu | bez výkonového členu<br><div>M<sub>0701</sub></div> | integrován v efektoru<br><div>M<sub>0702</sub></div>    | oddělený od efektoru<br><div>M<sub>0703</sub></div>     | oddělený od robotu<br><div>M<sub>0704</sub></div> | jiné<br><div>M<sub>0705</sub></div>       | <div>M<sub>0706</sub></div>               | <div>M<sub>0707</sub></div>              | <div>M<sub>0708</sub></div>              | <div>M<sub>0709</sub></div>               |
|                                  |                           |                                                     |                                                         |                                                         |                                                   |                                           |                                           |                                          |                                          |                                           |

## 5.3 ADAPTIVNÍ KE PRO ROTAČNÍ SOUČÁSTI

### 5.3.1 Funkční a orgánová struktura KE pro rotační součásti

V následující tabulce jsou přehledným způsobem sestaveny požadované funkce KE a orgány, které je budou realizovat. Tím je vytvořena funkční a předpokládaná orgánová struktura navrhovaného KE.

**Tab. 3 funkční a orgánová struktura KE pro rotační součásti**

| FUNKCE |                                                                                                                                                                                           | ORGÁN                    |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----|
| 1      | <i>Vytvořit:</i> uchopovací prvek<br><i>Umožnit:</i> uchopení rotační součásti                                                                                                            | Mechanické čelisti       | MČ |
| 2      | <i>Vytvořit:</i> koncentrický uchopovací mechanismus<br><i>Zajistit:</i> stálou polohu osy uchopovaných součástí vůči KE                                                                  | Pákový převod            | PP |
| 3      | <i>Vytvořit:</i> zdroj uchopovací síly<br><i>Umožnit:</i> sevření čelistí                                                                                                                 | Pneumatický válec        | PV |
| 4      | <i>Zjistit:</i> informaci o velikosti stisku<br><i>Kontrolovat:</i> dostatečnou velikost uchopovací síly                                                                                  | Tlakový snímač           | TS |
| 5      | <i>Umožnit:</i> uchopení součásti i při malé nepřesnosti polohování robotu<br><i>Přizpůsobit:</i> polohu uchopovacího prvku                                                               | Pasivní adaptivita       | PA |
| 6      | <i>Umožnit:</i> uchopení součásti i při malé nepřesnosti orientace součásti<br><i>Přizpůsobit:</i> polohu uchopovacího prvku                                                              |                          |    |
| 8      | <i>Vytvořit:</i> spojení s kinematickou strukturou robotu<br><i>Přenést:</i> montážní pohyb                                                                                               | Upínací kužel            | UK |
| 9      | <i>Vytvořit:</i> připojení k pneumatickému obvodu průmyslového robotu<br><i>Přenést:</i> zdroj uchopovací síly                                                                            | Pneumatické rychlospojky | PR |
| 10     | <i>Vytvořit:</i> spojení zdroje uchopovací síly s pneumatickým obvodem průmyslového robotu<br><i>Realizovat:</i> funkce 3 a 9<br><i>Přenést:</i> pneumatickou energii pro uchopovací sílu | Hadice                   | H  |
| 11     | <i>Poskytnout:</i> informaci o typu KE<br><i>Umožnit:</i> kontrolu správného KE                                                                                                           | Řídící elektronika       | ŘE |
| 12     | <i>Vytvořit:</i> připojení k elektrickým obvodům průmyslového robotu<br><i>Přenést:</i> informaci o stisku do řídicího systému robotu                                                     | Elektrický konektor      | EK |
| 13     | <i>Vytvořit:</i> spojení tlakového snímače s elektrickým obvodem průmyslového robotu<br><i>Realizovat:</i> funkce 4 a 12<br><i>Přenést:</i> informaci z tlakového snímače                 | Kabel                    | K  |
| 14     | <i>Vytvořit:</i> tvarový prvek<br><i>Umožnit:</i> odložení KE do zásobníku KE                                                                                                             | Tvarový prvek            | TP |

### 5.3.2 Stavební struktura KE pro rotační součásti

Při zpřesňování orgánové struktury KE a vytváření jeho hrubé stavební struktury bylo dospěno k závěru, že se využije již na našem pracovišti vyvinutý KE s koncentrickým uchopováním součástí. Tento KE se od prvotního návrhu liší v principu koncentrického uchopování, který není po přímce, ale po kružnici. Musí být upraven pro automatickou výměnu, dovybaven pasivní adaptivitou a elektronikou zajišťující komunikaci s ŘS robotu a vhodnými senzory.

Na Obr. 2 je zobrazen již upravený koncentrický KE, na kterém je možno vidět upínací kužel automatické výměny (1) opatřený konektorem pro přenos elektrických signálů a pneumatickými rychlospojkami. Pneumatický válec (2) s tlakovými senzory (3) a mechanismus pro koncentrické uchopování součástí (4). Pasivní adaptivita byla zajištěna pružným uložením čelistí (5).

Tento KE bude ještě dodatečně vybaven elektronickým obvodem pro komunikaci s ŘS robotu.



Obr. 2 koncentrický KE po úpravě

## 5.4 ADAPTIVNÍ KE PRO PLOCHÉ SOUČÁSTI

### 5.4.1 Funkční a orgánová struktura KE pro ploché součásti

V následující tabulce jsou přehledným způsobem sestaveny požadované funkce KE a orgány, které je budou realizovat. Tím je vytvořena funkční a předpokládaná orgánová struktura navrhovaného KE.

**Tab. 4 ukázka funkční a orgánové struktury KE pro ploché součásti**

| FUNKCE |                                                                                                                                                   | ORGÁN                    |      |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------|
| 1      | <b>Vytvořit:</b> uchopovací prvek pro rovinné plochy<br><b>Přenést:</b> uchopovací sílu                                                           | Vakuové přísavky         | PŘ   |
| 2      | <b>Umožnit:</b> uchopení součásti za výškově rozdílné plochy<br><b>Zajistit:</b> působení uchopovacích sil v různých rovinách                     | Odpružené nástavce       | ON   |
| 3      | <b>Zjistit:</b> informaci o hodnotě vakua<br><b>Kontrola:</b> dostatečnou velikost uchopovací síly                                                | Vakuový snímač           | VS   |
| 4      | <b>Vytvořit:</b> ovládání uchopovací síly<br><b>Řídit:</b> velikost uchopovací síly                                                               | Pneumatický obvod        | PO   |
| 5      | <b>Umožnit:</b> změnu polohy uchopovacích prvků<br><b>Přízpůsobit:</b> polohu uchopovacích prvků rozměru součásti                                 | Vodící lišty             | VL   |
| 6      | <b>Vytvořit:</b> zdroj pohybu<br><b>Umožnit:</b> polohování uchopovacích prvků                                                                    | Krokový motor            | KM   |
| 7      | <b>Vytvořit:</b> transformační prvek<br><b>Transformovat:</b> rotační pohyb na translační                                                         | Posuvový šroub           | PŠ   |
| 8      | <b>Zajistit:</b> spojení mezi zdrojem pohybu a transformačním prvkem<br><b>Realizovat:</b> funkce 6 a 7                                           | Spojka                   | S    |
| 9      | <b>Umožnit:</b> natočení o požadovaný úhel<br><b>Nastavit:</b> požadovanou polohu uchopovacích prvků                                              | Krokový motor            | KM   |
| 10     | <b>Aretovat:</b> požadovaný úhel natočení<br><b>Udržet:</b> požadovanou polohu uchopovacích prvků                                                 |                          |      |
| 11     | <b>Umožnit:</b> současné polohování dvou uchopovacích prvků<br><b>Vytvořit:</b> současný protipohyb dvou upínacích prvků na jedné ose             | Šroub s levým stoupáním  | PŠ-L |
|        |                                                                                                                                                   | Šroub s pravým stoupáním | PŠ-P |
| 12     | <b>Vytvořit:</b> referenční polohu pro uchopovací prvky<br><b>Umožnit:</b> nastavení referenční polohy                                            | Koncový spínač           | KS   |
| 13     | <b>Vytvořit:</b> omezení pohybu uchopovacího prvku<br><b>Zabránit:</b> pohybu uchopovacího prvku mimo dovolený rozsah                             | Pevný doraz              | PD   |
| 14     | <b>Vytvořit:</b> výkonnou řídicí jednotku<br><b>Přenést:</b> informaci z řídicího systému na zdroj rotačního pohybu                               | Řídicí elektronika       | ŘE   |
| 15     | <b>Zjistit:</b> informaci o aktuální poloze uchopovacího prvku<br><b>Uložit:</b> informaci o aktuální poloze uchopovacího prvku do paměti         |                          |      |
| 16     | <b>Vytvořit:</b> otevřenou strukturu pro aplikaci rozšiřujících senzorických modulů<br><b>Umožnit:</b> připojení k distribuovanému způsobu řízení |                          |      |

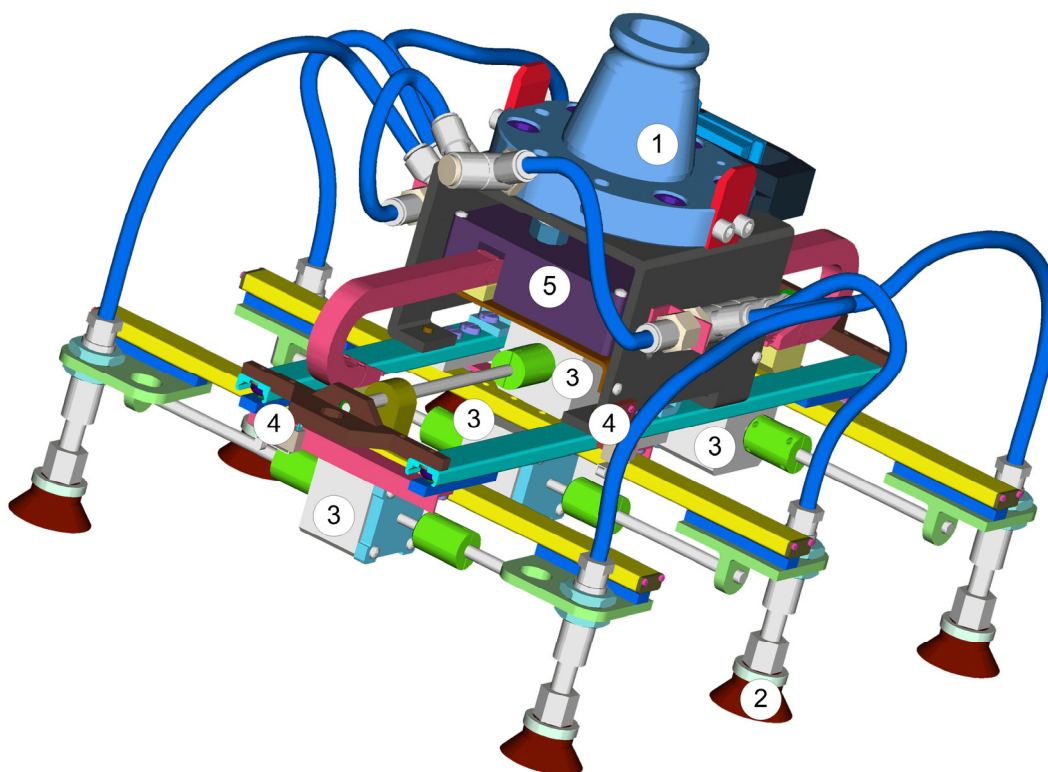
### 5.4.2 Stavební struktura KE pro ploché součásti

Funkční a orgánová struktura navrženého KE byla dále zpřesňována a transformována do jeho stavební struktury. Při tomto procesu byl brán zřetel na možnost využití dostupných stavebních prvků na trhu.

Vznikl tak návrh KE umožňující automatické nastavení poloh přísavek dle tvaru a členitosti manipulované součásti, což umožňuje dosažení maximální úchopné síly.

Adaptivní KE (Obr. 1) je tvořen kuzelem pro automatickou výměnu (1) s elektrickým konektorem a pneumatickými rychlospojkami, šesti odpruženými přísavkami (2) o průměru 40mm, čtyřmi krokovými motory (3) zajišťující polohování přísavek, referenčními spínači (4), a řídicí elektronikou (5) zajišťující ovládání krokových motorů a komunikaci s řídicím systémem.

Základem kinematického mechanismus jsou tři ramena. Prostřední rameno je uloženo fixně a dvě krajní ramena se mohou pomocí krokového motoru současně přibližovat, popřípadě oddalovat od prostředního ramene – naznačeno šedými šipkami. Na každém rameni jsou umístěny dvě přísavky s odpruženým držákem, které se mohou působením dalšího krokového motoru opět současně přibližovat, popřípadě oddalovat (na obr. naznačeno bílými šipkami). Poloha přísavek je ovládána vestavěnou elektronikou, která zajišťuje pohyb přísavek a komunikaci z nadřazeným řídicím systémem.



Obr. 1 stavební struktura KE pro ploché součásti - celkový pohled

## 5.5 ADAPTIVNÍ KE PRO MONTÁŽ ŠROUBŮ

### 5.5.1 Funkční a orgánová struktura KE pro montáž šroubů

V následující tabulce jsou přehledným způsobem sestaveny požadované funkce KE a orgány, které je budou realizovat. Tím je vytvořena funkční a předpokládaná orgánová struktura navrhovaného KE.

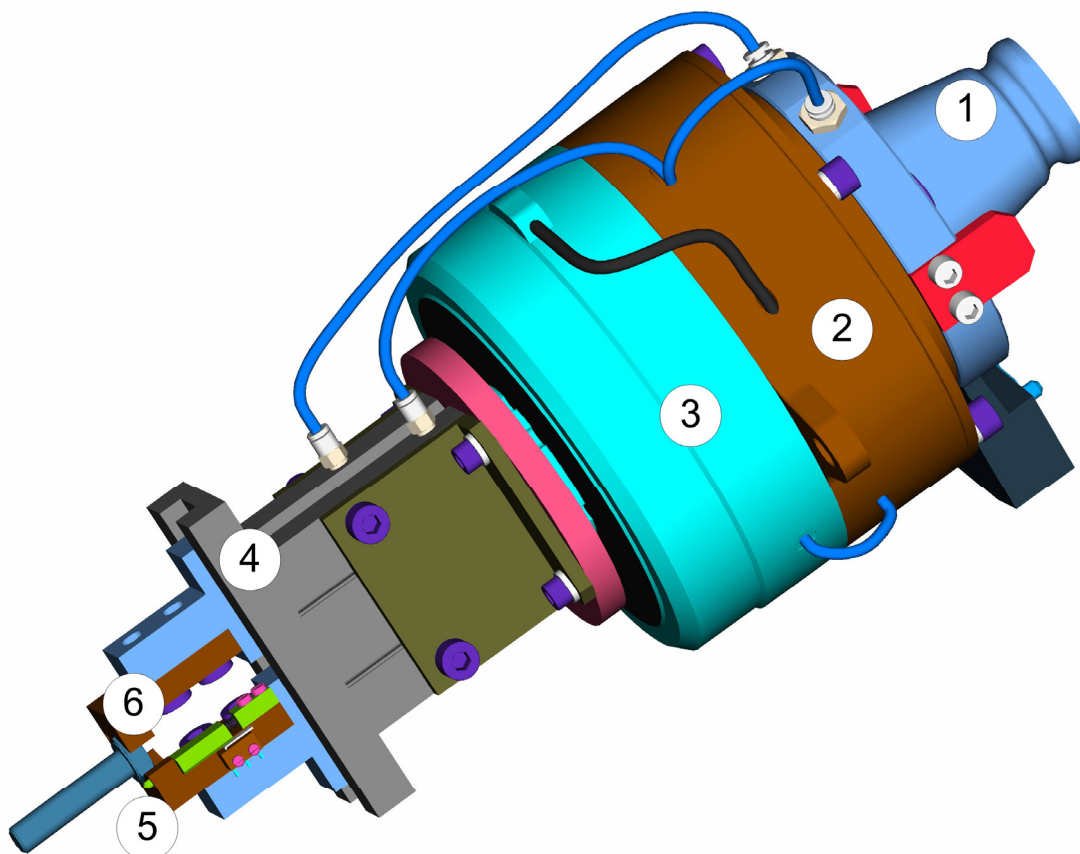
**Tab. 5 ukázka funkční a orgánové struktury KE pro montáž šroubů**

| FUNKCE |                                                                                                                                                              | ORGÁN                     |            |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------|
| 1      | <i>Vytvořit:</i> uchopovací prvek<br><i>Umožnit:</i> uchopení rotační součásti, nebo šroubu                                                                  | Mechanické čelisti        | MČ         |
| 2      | <i>Vytvořit:</i> uchopovací mechanismus<br><i>Přenést:</i> uchopovací sílu                                                                                   | Pákový převod             | PP         |
| 3      | <i>Vytvořit:</i> zdroj uchopovací síly<br><i>Umožnit:</i> sevření čelistí                                                                                    | Pneumatický válec         | PV         |
| 4      | <i>Zjistit:</i> informaci o velikosti stisku<br><i>Kontrolovat:</i> dostatečnou velikost uchopovací síly                                                     | Tlakový snímač            | TS         |
| 5      | <i>Umožnit:</i> změnu orientace součásti v závislosti na potřebách montáže<br><i>Přizpůsobit:</i> polohu a orientaci montážního dílu poloze a orientaci díry | Pasivní adaptivita        | PA         |
| 6      | <i>Umožnit:</i> změnu polohy uchopovacího prvku podél osy rotace<br><i>Přizpůsobit:</i> okamžitou potřebu výsuvu při šroubování                              |                           |            |
| 7      | <i>Umožnit:</i> získání informace o dotyku součásti s montážním dílem v ose z                                                                                | Silový senzor             | Fz         |
| 8      | <i>Umožnit:</i> získání informace o krouticím momentu v ose x                                                                                                | Momentový senzor<br>osa x | Mx         |
| 9      | <i>Umožnit:</i> získání informace o krouticím momentu v ose y                                                                                                | Momentový senzor<br>osa y | My         |
| 10     | <i>Umožnit:</i> zjistit informaci o krouticím momentu během montáže (osa z)<br><i>Kontrola:</i> utahovacího momentu                                          | Momentový senzor<br>osa z | Mz         |
| 11     | <i>Umožnit:</i> zjistit informaci o přiblížení hlavy šroubu k dosedací ploše<br><i>Zajistit:</i> ukončení montážního pohybu                                  | Dotyk                     | D          |
| 12     | <i>Získání:</i> informace o výchylce v ose x<br><i>Umožnit:</i> vystředění součásti v otvoru                                                                 | Dálkoměr<br>osa x         | $\Delta x$ |
| 13     | <i>Získání:</i> informace o výchylce v ose y<br><i>Umožnit:</i> vystředění součásti v otvoru                                                                 | Dálkoměr<br>osa y         | $\Delta y$ |
| 14     | <i>Získání:</i> informace o výchylce v ose z<br><i>Kontrola:</i> translačního montážního pohybu                                                              | Dálkoměr<br>osa z         | $\Delta z$ |
| 15     | <i>Umožnit:</i> získávání aktuálních informací ze senzorů<br><i>Přenést:</i> informace do řídicího systému                                                   | Řídící elektronika        | ŘE         |
| 16     | <i>Zajistit:</i> předzpracování naměřených hodnot ze senzorů<br><i>Přenést:</i> naměřené hodnoty do řídicího systému                                         |                           |            |

### 5.5.2 Stavební struktura KE pro montáž šroubů

Funkční a orgánová struktura navrženého KE byla dále zpřesňována a transformována do jeho stavební struktury. Při tomto procesu byl brán zřetel na možnost využití dostupných stavebních prvků na trhu.

Navržený adaptivní KE (Obr. 2) je tvořen kuželem pro automatickou výměnu (1) s elektrickým konektorem a pneumatickými rychlospojkami. Řídící elektronikou (2) zajišťující zpracování ze senzorického kompenzátoru (3) a komunikaci s řídicím systémem, uchopovacím mechanismem (4), senzorem přiblížení k součásti (5) a uchopovacími čelistmi (6).



Obr. 2 stavební struktura KE pro montáž šroubů - celkový pohled

Senzorický kompenzátor zde tvoří „Flexible Force-moment sensor FTC“ od firmy Schunk se šesti stupni volnosti.

Výhody tohoto kompenzátoru jsou:

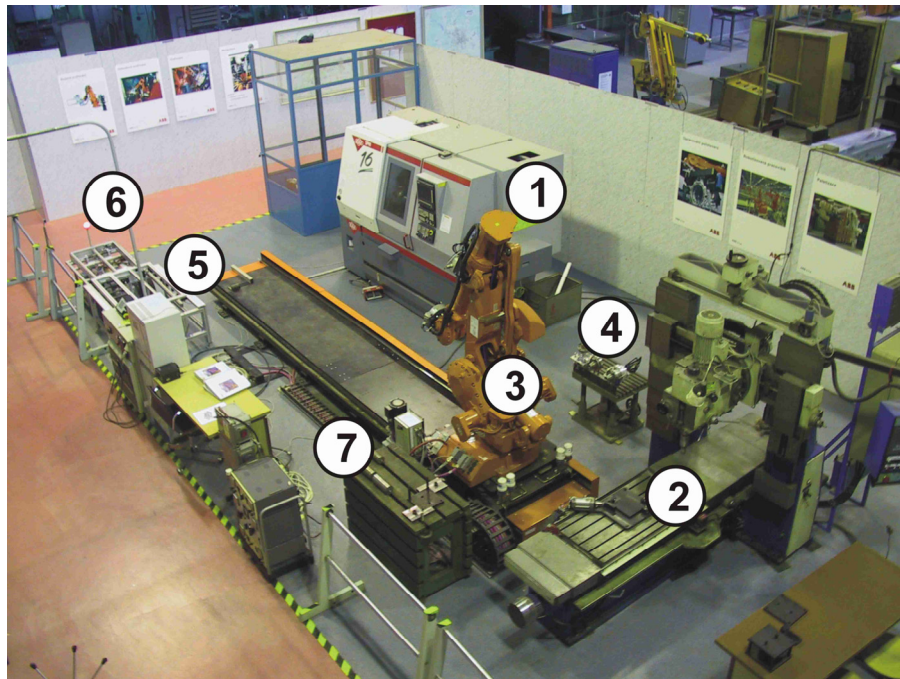
- Přesné měření sil a momentů ve všech 6-ti stupních volnosti
- Měření odchylky (mm, stupně) ve všech 6-ti stupních volnosti
- Jednoduché propojení s řídicí jednotkou
- Pasivní adaptivita umožňuje výchylky až do 1,4 mm a 1.4°
- Odolnost proti mechanickému přetížení



## 5.6 ŘEŠENÍ ADAPTIVITY MODELOVÉHO MODULÁRNÍHO BEZOBSLUŽNÉHO PRACOVISTĚ

### 5.6.1 Uspořádání bezobslužného pracoviště

Na Obr. 3 je vidět uspořádání pracoviště, na kterém byla aplikována robotická manipulace u nejběžnějších výrobních technologií, tj. soustružení, frézování a diskretní montáže.



Obr. 3 pohled na uspořádání bezobslužného pracoviště

Průmyslový robot (3) umístěný na pojezdu zde obsluhuje soustružnické centrum SPM 16 CNC (1) a frézku PORThOS (2). Protože musí manipulovat jak s rotačními, tak i plochými součástmi, je vybaven výše navrženými koncovými efekty, které jsou umístěny v zásobníku pro výměnu koncových efektorů (4). V zásobníku je umístěn KE pro rotační součásti a KE pro ploché součásti (KE pro operaci šroubování není prozatím vyroben). Pracoviště je dále vybaveno předávacím dokem (5) pro mobilní robot VUTBOT-2 (6), který přiváží nové polotovary a hotové součásti odváží.

## 6 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

Výsledkem této disertační práce s názvem „Adaptivita průmyslových robotů při manipulačních a montážních operacích“ je návrh řešení adaptivity modelového modulárního bezobslužného pracoviště, které bylo budováno ve Výzkumném centru automatické manipulace při Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky, Fakulty strojního inženýrství, Vysokého učení technického v Brně v rámci projektu Výzkumného centra pro strojírenskou výrobní techniku a technologii.

Autor v předložené práci provedl rešerši současného stavu řešené problematiky a poznatků vědeckého konstruování, které využil při návrhu řešení adaptivity výše uvedeného pracoviště. Pomocí systémového přístupu metody QSOFD sestavil blokový diagram obecného adaptivního koncového efektoru, sestavil tabulku nežádoucích stavů a jejich potenciálních příčin, Ishikawův diagram a zobecněný strom chyb. V návaznosti na provedenou systémovou analýzu sestavil autor morfologickou matici adaptivních koncových efektorů.

Mezi praktické výsledky této disertační práce patří návrh stavebních struktur adaptivních koncových efektorů pro manipulační a montážní operace s plochými a rotačními součástmi a adaptivního koncového efektoru pro montáž šroubů. Tyto tři adaptivní koncové efekторы jsou navrženy s ohledem na možnost jejich automatické výměny a jsou vybaveny elektronikou pro aplikaci distribuovaného řízení, což umožňuje tyto koncové efekторы vybavovat dle potřeby různými senzorickými systémy.

## 7 ZÁVĚR

Předložená disertační práce obsahuje návrh stavební struktury adaptivních koncových efektorů určených pro použití v modelovém modulárním bezobslužném pracovišti, při kterém byla využita systémová analýza a analýza rizik. Adaptivita průmyslového robotu IRB 4400 od firmy ABB je u tohoto pracoviště řešena adaptivním koncovým efektozem pro rotační součásti, adaptivním koncovým efektozem pro ploché součásti a adaptivním koncovým efektozem pro montáž šroubů. Koncový efektor pro montáž šroubů obsahuje z důvodu technologické povahy této montážní operace aktivní adaptivní člen ve formě multisenzorického systému FTC od firmy Schunk. Pro možnost využití distribuovaného řízení, jsou navržené efekторы vybaveny elektronikou, která umožňuje kromě zpracování informací z integrovaných senzorů v koncovém efektoru i připojení externích senzorických modulů (např. systém technického vidění) a připojení na komunikační sběrnici a tak komunikovat s ostatními moduly řízení.

## 8 LITERATURA

- [1] BLECHA, P.: Využití moderních metod řízení a zabezpečování jakosti při konstrukci obráběcích center, Ph.D. Thesis, VUT-FSI v Brně, Brno 2003
- [2] FUKUDA, T., HASEGAWA, Y.: Perspective of Robotics Technology, In *Proceeding of Robotics and Applications – IASTED International Conference RA 2004*, 23.-25.8.2004, Honolulu, Hawaii, USA 2004, Ed. M.Kamel, ISBN 0-88986-438-1
- [3] HOLUB, G. Průmyslová robotika na přelomu století. Technický týdeník 42/98 <http://www.techtydenik.cz/tt1998/tt42/panoram1.htm>
- [4] ISHIKAWA, K. Guide to Quality Control, 2nd Revised English Edition, Hong Kong, Nordica International Limited, 1991, Translated into English by the Asian Productivity Organization, Tokyo 1985, ISBN 92-833-1036-5
- [5] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E. Řešení problémů modelováním. Téměř nic o téměř všem. 1. vydání, Brno, Fakulta strojní VUT v Brně vydala v nakladatelství PC-DIR Real, 1998, 335 s., učební texty vysokých škol, ISBN 80-214-1233-X
- [6] KÁRNÍK, L., KNOFLÍČEK, R., NOVÁK-MARCINČIN, J. Mobilní roboty, Marfy Slezko 2000, ISBN 80-902746-2-5
- [7] KOLÍBAL, Z.: Průmyslové roboty I – Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů, březen 1993, nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, ISBN 80-214-0526-0
- [8] SKAŘUPA, J., MOSTÝN, V.: Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů, Vienaľa Košice 2002, ISBN 80-88922-55-0
- [9] SKAŘUPA, J., MOSTÝN, V.: Teorie průmyslových robotů, Vienaľa Košice 2000, ISBN 80-88922-35-6
- [10] SKAŘUPA, J., ZELINA, P.: Hlavice průmyslových robotů, Ostrava 1993, VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, ISBN 80-7078-210-2
- [11] SKAŘUPA, J., ZELINA, P. Navrhování a výpočty efektorů PRaM, Ostrava 1996, VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, ISBN 80-7078-304-4
- [12] SMRČEK, J., PALKO, A.: ROBOTIKA - Koncové efektory pre priemyselné a servisné roboty, Navrhovanie – konstrukcia – riešenia, Edícia vedeckej a technickej literatúry - SjF TU v Košiciach, ROKUS Prešov 2004, ISBN 80-8073-218-3
- [13] VAVŘÍK, I., BLECHA, P. Jakost II. Metody a nástroje zabezpečování jakosti. 1. vydání, Brno, ÚVSSaR, VUT - FS v Brně 1998, interní učební texty, 152 s.
- [14] ZEHNULA, K.: Čidla robotů, SNTL, Praha, 1990, 370 s.,

## 9 CURRICULUM VITAE

### Osobní data:

|                    |                                 |
|--------------------|---------------------------------|
| Jméno a příjmení   | Radim Blecha                    |
| Datum narození     | 5. prosince 1974                |
| Místo narození     | Brno                            |
| Státní příslušnost | Česká republika                 |
| Národnost          | česká                           |
| Stav               | ženatý                          |
| Rodiče             | Alois Blecha<br>Libuše Blechová |
| Sourozenci         | Ing. Petr Blecha, Ph.D.         |

### Vzdělání:

|                |                                                                                                                              |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1981 - 1989    | Základní škola Komenského v Kuřimi                                                                                           |
| 1989 - 1993    | SOU strojírenské v Kuřimi<br>obor: Mechanik NC strojů<br>Ukončené maturitou a výučním listem.                                |
| 1994 - 1998    | Magisterské studium na strojní fakultě VUT v Brně<br>Ukončené státní zkouškou a získáním akademického titulu strojní inženýr |
| 1998 - 2000    | Interní postgraduální doktorské studium na fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, obor Procesní a konstrukční inženýrství |
| 2000 - 2005    | Distanční forma postgraduálního doktorského studia na fakultě strojního inženýrství VUT v Brně                               |
| 29. dubna 2003 | Úspěšné složení státní doktorské zkoušky                                                                                     |

### Zaměstnání:

|                       |                                                                                   |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 10. 2000 – do dnes | Akademický pracovník Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky. FSI, VUT v Brně |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|

## 10 ABSTRACT

The presented PhD thesis „Adaptability of industrial robots in handling and assembly operations“ deals with the problem of automated robotic assembly. Its objective was to solve the adaptability of the model modular self-acting assembly workplace constructed in the Automatization Research Centre directed by Prof. Zdeněk Kolíbal. This centre works within the Institute of Production machines, Systems and Robotics, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology as a detached workplace of the Research Centre of Manufacturing Technology, Czech Technical University in Prague, under the leadership of Prof. Jaromír Houša.

The thesis includes a review of the present state of the solved topic and knowledge of the scientific design.

The practical result of the work is the proposal of construction of adaptable end-effectors for application in the model modular self-acting workplace. Adaptability of the industrial robot IRB 4400 from ABB company in this workplace is provided by adaptable end-effector for circular parts, adaptable end-effector for flat parts and adaptable end-effector for screwing operations. Thanks to the high repeatable accuracy of the IRB 4400 robot, the adaptability of the first two end-effectors is solved only with application of the elements of passive adaptability. The end-effector for screwing operations contains, due to the technological nature of this assembly operation, an active adaptable unit in the form of FTC multi-sensoric system from Schunk company and control electronics. The construction of all three end-effectors allows their automatic change. In order to provide the possibility of distributed control application, the designed effectors are equipped with electronics that enables, besides processing information from the sensors integrated into the end-effector, also connection of external sensoric modules (i.e. technical vision system) and connection to a bus allowing communication with other modules of control.

In order to assure the quality of the proposed solution and minimization of the potential failure modes, the system approach was applied through the QSOFD method. In relation to the performed system analysis, the morphological matrix of the adaptable end-effectors was constructed.

The author hopes that the result of this PhD thesis will contribute to the introduction of self-acting automatization into various fields of our industry, which will bring benefits in the form of reduced costs and therefore also higher competitiveness of the companies applying it.