

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 391*

*ISSN 1213-4198*

*thesis* IS

*Ing. Michal Valný*

**Optimalizace řízení a stavby  
6-ti osých robotů**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

**Ing. Michal Valný**

**Optimalizace řízení a stavby 6-ti osých robotů**

Optimization of 6 axes robot control and design

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: Doc. Ing. Pavel Bělohoubek, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Jiří Skalický, CSc.  
Ing. Jiří Mácha, Ph.D.

Datum obhajoby: 29. 6. 2006

**Klíčová slova:**

Robot, konstrukce, řídicí systém, software, vývoj.

**Key words:**

Robot, design, control system, software, development.

**Místo uložení práce:**

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně

# OBSAH

<b>OBSAH .....</b>	<b>3</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>4</b>
<b>2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>5</b>
2.1 STAVBA VÍCEOSÝCH PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ A JEJICH OPTIMALIZACE .....	5
2.2 POČÍTAČOVÝ ŘÍDICÍ SYSTÉM, JEHO NÁVRH A OPTIMALIZACE .....	5
2.3 OPTIMALIZACE STAVBY A ŘÍZENÍ – MECHATRONICKÝ PŘÍSTUP .....	5
2.4 OVĚŘENÍ V PRAXI .....	5
2.5 ZOBECNĚNÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ PRO ROZVOJ OBLASTI STAVBY A ŘÍZENÍ VÍCEOSÝCH ÚČELOVÝCH PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ .....	5
<b>3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>6</b>
<i>Počítačová podpora vývoje výrobku.....</i>	<i>7</i>
<i>Metody optimalizace konstrukce a vývoje výrobku .....</i>	<i>7</i>
3.1 ŘÍDICÍ SYSTÉMY – ANALÝZY .....	8
<i>Analýzy dle funkčních parametrů .....</i>	<i>8</i>
<b>4 REALIZACE PRÁCE.....</b>	<b>9</b>
4.1 ŘEŠENÍ MODULÁRNÍCH JEDNOTEK PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ ALR 4.1 A COBALT AR-20 .....	9
4.2 NÁVRH PROCESU KONSTRUKCE PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU COBALT AR-20 .....	11
<i>Optimalizace stavby robotu Cobalt AR-20.....</i>	<i>14</i>
<i>Ověření parametrů robotu Cobalt AR-20.....</i>	<i>15</i>
<i>Shrnutí poznatků z vývoje robotu ALR 4.1 a Cobalt AR-20.....</i>	<i>16</i>
4.3 POČÍTAČOVÝ ŘÍDICÍ SYSTÉM A JEHO OPTIMALIZACE .....	17
<i>Struktura řídicího systému.....</i>	<i>17</i>
<i>Technologie adaptování systému řízenému mechanismu.....</i>	<i>18</i>
<i>Princip výpočtů interpolací víceosých mechanismů.....</i>	<i>18</i>
<i>Softwarová řešení řídicího systému.....</i>	<i>23</i>
<b>DOSAŽENÉ VÝSLEDKY A PŘÍNOSY PRÁCE .....</b>	<b>25</b>
<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>26</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>27</b>
<b>7 PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY:.....</b>	<b>28</b>
<b>8 INTERNETOVÉ ODKAZY .....</b>	<b>30</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>30</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>31</b>
<b>9 ŽIVOTOPIS AUTORA.....</b>	<b>31</b>
<b>10 ABSTRACT .....</b>	<b>32</b>

# 1 ÚVOD

Cílem této práce je vývoj technologií pro řízení robotických mechanismů z hlediska jejich optimalizace a součinnosti s vývojem a stavbou mechanismů samotných. Stavba, tedy konstrukce mechanismu a jeho řízení, tedy ovládací software by měly být řešeny ve vzájemné spolupráci. Často aplikovaný přístup, kdy se vyvíjí řídicí software na již hotový mechanismus je sice logickým postupem, ale nikoliv jediným nutným. Již ve stádiu CAD návrhu stroje je možné testovat jeho parametry z hlediska řízení a zpětně CAD návrh ovlivňovat. Samotný proces řízení (provozu) stroje je tak možné provádět již na virtuálním prototypu (CAD datech) a ještě před vyrobením fyzického prototypu sladit požadavky konstrukce a řízení.

Tato práce ukáže přístup existence řídicího software před existencí mechanismu. I v takovém případě je však nutná součinnost znalostí z oblasti konstrukce a vývoje software. Proto v rámci disertační práce byl realizován také projekt vývoje šestiosého robotu a provedena jeho optimalizace z hlediska řízení a z hlediska současného trendu vývoje robotů. Poznatky z tohoto vývoje pak posloužily pro vývoj a testování software.

Disertační práce je výsledkem několikaletého výzkumu a vývoje spolu s aplikací výsledků v praxi, neboť je důležité synchronizovat výzkum s běžnými požadavky praktických aplikací.

Do vývoje byla zapojena komerční firma TG drives Brno [i11], která se zabývá dodávkami hardware pro řízení strojů, konkrétně dodávkami synchronních servomotorů a digitálních servozesilovačů. Tato firma má bohaté zkušenosti z oblasti řízení mechanismů a širokou zákaznickou klientelu. Výběr této firmy proběhl na základě jejich vlastních invencí a představ o jejich vlastním vývoji.

Jako jedna z mála firem projevila zájem o spolupráci nikoliv formou vyřešení jejich současných problémů, ale formou aplikace našich nových vyvinutých věcí do jejich projektů, samozřejmě s nutností dotáhnout některé věci do prakticky aplikovatelné podoby.

## **2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE**

### **2.1 STAVBA VÍCEOSÝCH PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ A JEJICH OPTIMALIZACE**

1. Analýzy a modelování.
2. Optimalizace stavby účelových průmyslových robotů.
3. Optimalizace konstrukce 6-ti osého průmyslového robotu ALR 4.1.
4. Vývoj 6-ti osého robotu Cobalt o nosnosti 20 kg. Jako součást optimalizace stavby 6-ti osých robotů provést vývoj moderního průmyslového robotu.
5. Algoritmizace návrhu robotu. Vytvořit metodiku návrhové a výpočetní části vývoje průmyslového robotu.
6. Technická, technologická a ekonomická optimalizace robotu.
7. Zobecnění dosažených poznatků.

### **2.2 POČÍTAČOVÝ ŘÍDICÍ SYSTÉM, JEHO NÁVRH A OPTIMALIZACE**

1. Analýzy a modelování počítačového řízení víceosých robotů.
2. Vývoj technologií adaptivního řídicího systému. Provést návrh a softwarovou realizaci software.
3. Návrh a optimalizace výpočetního jádra řídicích systémů.
4. Návrh a optimalizace uživatelského prostředí grafického intuitivního řídicího systému využívajícího výpočetní jádro. Vytvořit intuitivní uživatelské rozhraní řídicího systému ad.1).

### **2.3 OPTIMALIZACE STAVBY A ŘÍZENÍ – MECHATRONICKÝ PŘÍSTUP**

1. Ověření kinematiky stroje v řídicím software
2. Simulace běhu stroje.

### **2.4 OVĚŘENÍ V PRAXI**

1. Na stavbě a řízení robotu ALR-4.1
2. Na průmyslové aplikaci robot Cobalt

### **2.5 ZOBECNĚNÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ PRO ROZVOJ OBLASTI STAVBY A ŘÍZENÍ VÍCEOSÝCH ÚČELOVÝCH PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ**

### 3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Problematika vývoje průmyslových robotů jak v oblasti konstrukce, tak v oblasti řízení se neustále vyvíjí. Tento vývoj je ovlivňován mnoha faktory, mimo jiné i vzájemným působením těchto oblastí – mechatronickým vývojem.

Výraznými omezujícími faktory jsou **nosnost** a **velikost pracovního prostoru**. Existují samozřejmě i další faktory (např. dynamika a typ pohonu určující nasazení robotů ve výbušném, vlhkém, či jiném prostředí, typ konstrukce určující typ jejich pracovního prostoru atd.). Odstranění faktorů omezující univerzálnost robotů jsou téměř ve všech firmách vyvíjejících roboty řešeny modelovými řadami.

Shrnutí výhod a nedostatků modelové řady robotů:

#### Výrobce:

- Pokrytí širokého spektra požadavků na zařízení (+)
- Vysoké náklady (-)
  - vývoj modelové řady
  - výroba modelové řady
  - servis a údržba modelové řady
  - řídící systém modelové řady

#### Zákazník:

- Cílené nasazení robotu - robot splňuje požadavky konkrétního zadání, byť s určitou tolerancí (+)
- Náklady na robot - jsou lépe využity díky splnění bodu a) (neplatíme příliš funkcí navíc) (+/-)
- Flexibilita adaptování se pracovnímu prostředí - velmi úzká flexibilita, pouze v rámci možností jednoho typu robotu (-)

Odstranění nevýhod typové řady je více, či méně úspěšně řešeno modulární koncepcí konstrukce robotů. Modulem se rozumí samostatná mechanická jednotka, která dokáže pracovat nezávisle na ostatních jednotkách [6]. Typickým znakem modulu je tedy „pracovní nezávislost“. Každý modul je tvořen typovou řadou, podobně jako u typové řady robotů [8].

Obecné požadavky na průmyslový robot:

- Pokrytí širokého spektra pracovních parametrů (nosnost, přesnost, rozsah pohybu atd.).
- Dosažení kvalitních pracovních parametrů (vysoká nosnost, přesnost, dynamika atd.) [8].

- Nízká cena.
- Nízké provozní náklady.
- Vysoká životnost.
- Spolehlivost.

## Počítačová podpora vývoje výrobku

Pro rychlý a efektivní návrh stroje je možné využít počítačovou podporu vývoje výrobku, v jejímž rámci by měl vlastní konstrukční návrh probíhat [2]:

- 1) Počítačová podpora konstruování:
  - a) CAD (Computer Aided Design).
    - i) Základní obecný CAD systém.
    - ii) Moduly rozšiřující CAD systém (návrh plechových dílů, rozvody trubek, rozvody kabeláží, FEM moduly atd.)
    - iii) Databáze rozšiřující CAD systém (databáze normalizovaných dílů, podnikové databáze a další.).
  - b) FEM (Finite Elements Method).
  - c) Dynamic motion systems – systémy pro analýzu kinematiky a dynamiky.
  - d) Další speciální systémy.
  
- 2) Počítačová podpora výroby
  - a) CAM (Computer Aided Manufacturing).
    - i) Základní obecný CAM systém.
    - ii) Moduly rozšiřující CAM systém (optimalizace pohybu stroje, tvorba pyhybových plánů, optimalizace efektivity výroby atd. ).
  
  - b) NC a CNC off-line systémy strojů.
  
- 3) Počítačová podpora managementu výroby.
  - a) CAI (Computer Aided Information) Informační systém podniku a na něj navazující moduly
  - b) CAPP (Computer Aided Process Planning).
  - c) CAT (Computer Aided Testing)
  - d) CAE (Computer Aided Engineering)
  - e) CAQ (Computer Quality)

## Metody optimalizace konstrukce a vývoje výrobku

Optimalizace je nezbytnou součástí vývoje výrobku. Principem optimalizace je nalézt takové vstupní parametry procesu (vývoj výrobku, konstrukční proces,



výrobní proces atd.) aby bylo dosaženo takové výstupní veličiny, která se co nejvíce přiblíží, či shodne s požadovanou výstupní veličinou.

Používají se následující metody optimalizace (viz. také [3]):

- i. Optimalizace porovnáním – jednoduchým srovnáním výsledků dvou, či více řešení lze stanovit rozdíl vstupních parametrů a směr jejich úpravy.
- ii. Lineární optimalizace. Problém se popíše pomocí podmínek minima a maxima – maximální zisk, minimální cena, maximální využití stroje, minimální ztráty obrábění atd..  
Řešení lze provést pro dva parametry graficky, pro více parametrů pak numericky.
- iii. Dynamická optimalizace. Průběh procesu je dynamicky upravován v jeho průběhu podle aktuálního stavu parametrů (minimální cena, minimální čas atd.)
- iv. Heuristická optimalizace.
- v. Využití klasifikačního systému.
- vi. Využití databázové podpory.
- vii. SPC (Statistical process control).

Pro správnou aplikaci optimalizace například konstrukce mechanismu je třeba postupovat následovně:

1. Stanovit skupinu vstupních parametrů (podmínek) – použitý materiál, použité motory, rozměrové parametry součástí, hmotnostní parametry součástí.  
Některé vstupní parametry jsou na sobě závislé, například rozměry součástí, hmotnosti a použitý materiál jsou vzájemně závislé.
2. Stanovit skupinu výstupních podmínek – např. nosnost robotu, dosah, rychlost pohybu v osách, přesnost polohování atd.
3. Zvolit způsob optimalizace a provést několik samostatných řešení, na jejichž základě lze stanovit hodnoty vstupních a jim odpovídající hodnoty výstupních parametrů.

### **3.1 ŘÍDICÍ SYSTÉMY – ANALÝZY**

#### **Analýzy dle funkčních parametrů**

Řídicí systém je tvořen hardwarem a softwarem a je nedílnou součástí stroje, na kterou jsou a budou kladeny stále vyšší požadavky. Podrobnější informace o rozdělení řídicích systémů lze nalézt v literatuře [8] a [9]. Pochopitelně volba typu

řídícího systému je závislá na aplikaci (stroji který bude řízen), čemuž pak odpovídají také náklady na realizaci.

### ***Řídicí systém by měl být:***

- Inteligentní – schopnost řídit složité víceosé mechanismy.
- Adaptabilní – schopnost přizpůsobit se požadovanému problému.
- Intuitivní – snadné ovládání.
- Modulární – umožnit použití (konfiguraci) pouze těch modulů, které jsou v dané chvíli potřeba.
- Levný – cenově dostupný.

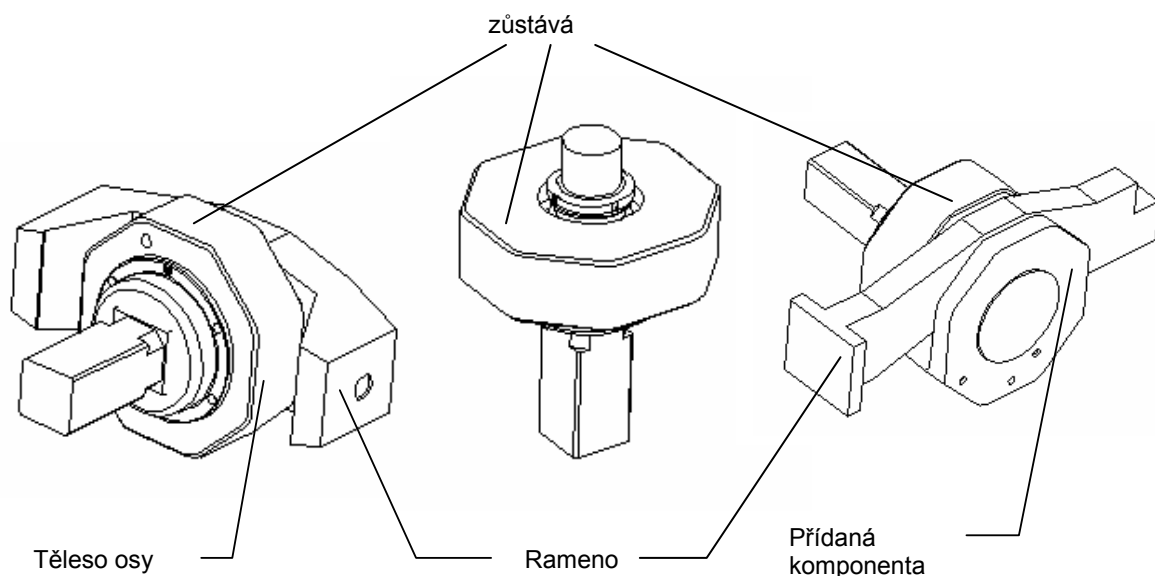
## **4 REALIZACE PRÁCE**

### **4.1 ŘEŠENÍ MODULÁRNÍCH JEDNOTEK PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ ALR 4.1 A COBALT AR-20**

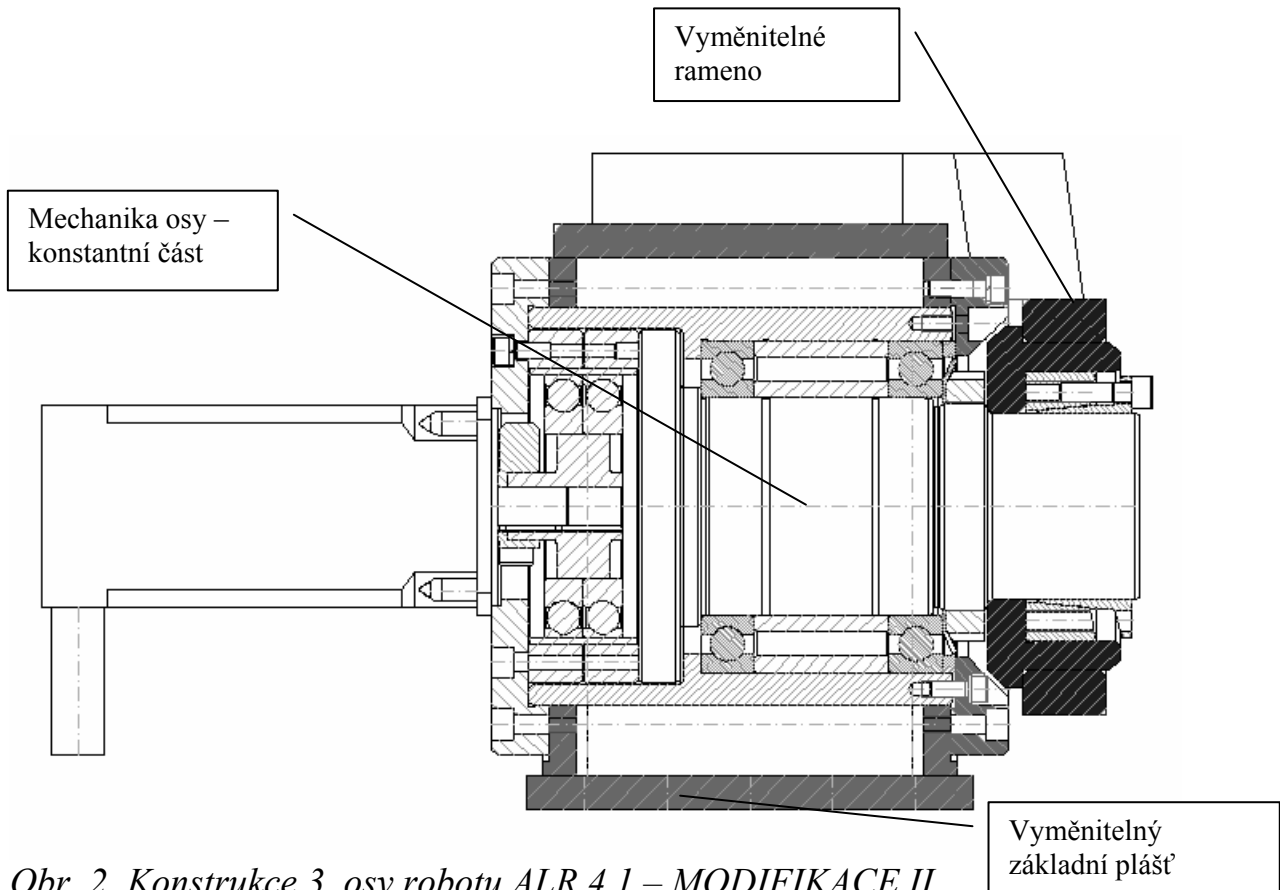
#### ***Modulární koncepce***

Při řešení problematiky modulární koncepce byly navrženy dvě modifikace modulární jednotky a to:

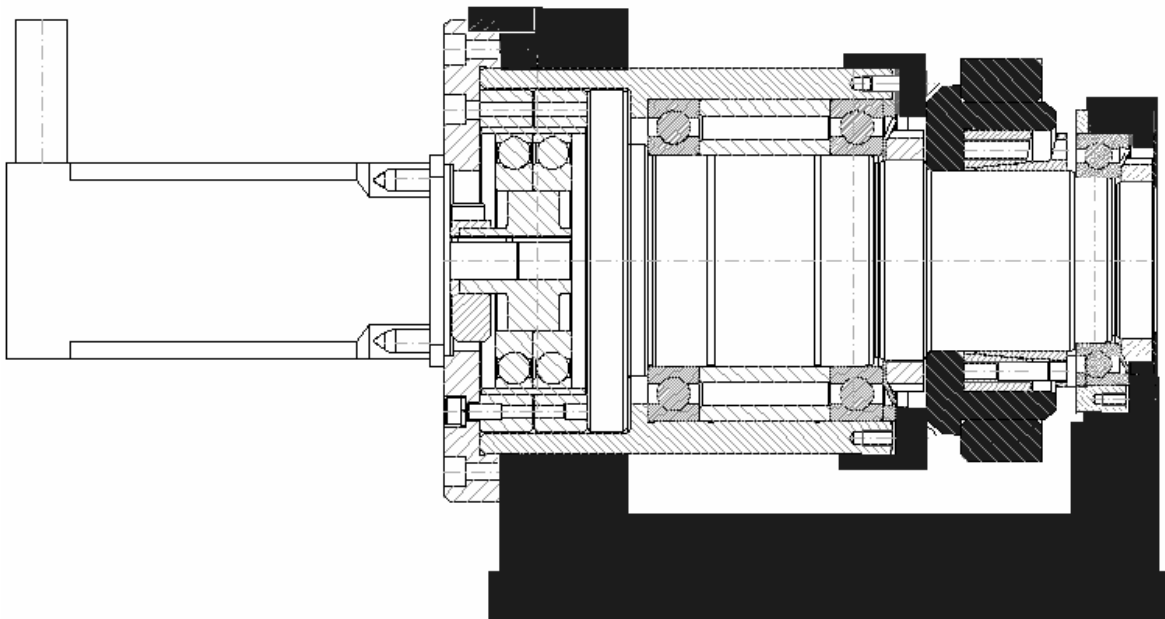
- Kloub s vyměnitelnými komponentami ([c2], [c3] a [c9]).
- Adaptivní kloub.



*Obr. 1 Kloub s vyměnitelnými komponentami, III. osa robotu ALR 4.1  
a) letmé uložení ramene, b) kloub se svislou osou, c) kloub pro větší nosnosti.*



Obr. 2 Konstrukce 3. osy robotu ALR 4.1 – MODIFIKACE II  
(návrh Ing. Trenz)



Obr. 3 Konstrukce 3. osy robotu ALR 4.1 – MODIFIKACE III. Varianta s pláštěm  
pro vyšší zatížení

### ***Kloub s vyměnitelnými komponentami – parametrický kloub***

Klasická modulární koncepce předpokládá že, pokud dojde ke změně pracovního prostředí, vymění se jeden modul za druhý. Firma aplikující robot tak musí zakoupit pro každý modul celou rozměrovou řadu za předpokladu, že dopředu nezná možnosti změny pracovního prostředí robotu. Tímto však již vznikají určité finanční ztráty.

Problém modulové řady řeší právě parametrický modul. V tomto případě se nemění celý modul za jiný, ale pouze jeho část. Lze přitom rozlišit, zda je to část:

- vlastní mechaniky - motor, převodovka, ložiska atd.
- okolní nečinné součásti – plášť úchyty atd.

V obou případech, nebo při jejich kombinacích lze minimalizovat náklady na celou koncepci. Jako parametrický modul byla řešena 3-tí osa robotu ALR 4.1. Pro technologie svařování a montáže je možné modifikovat parametrický kloub dle Obr. 1.



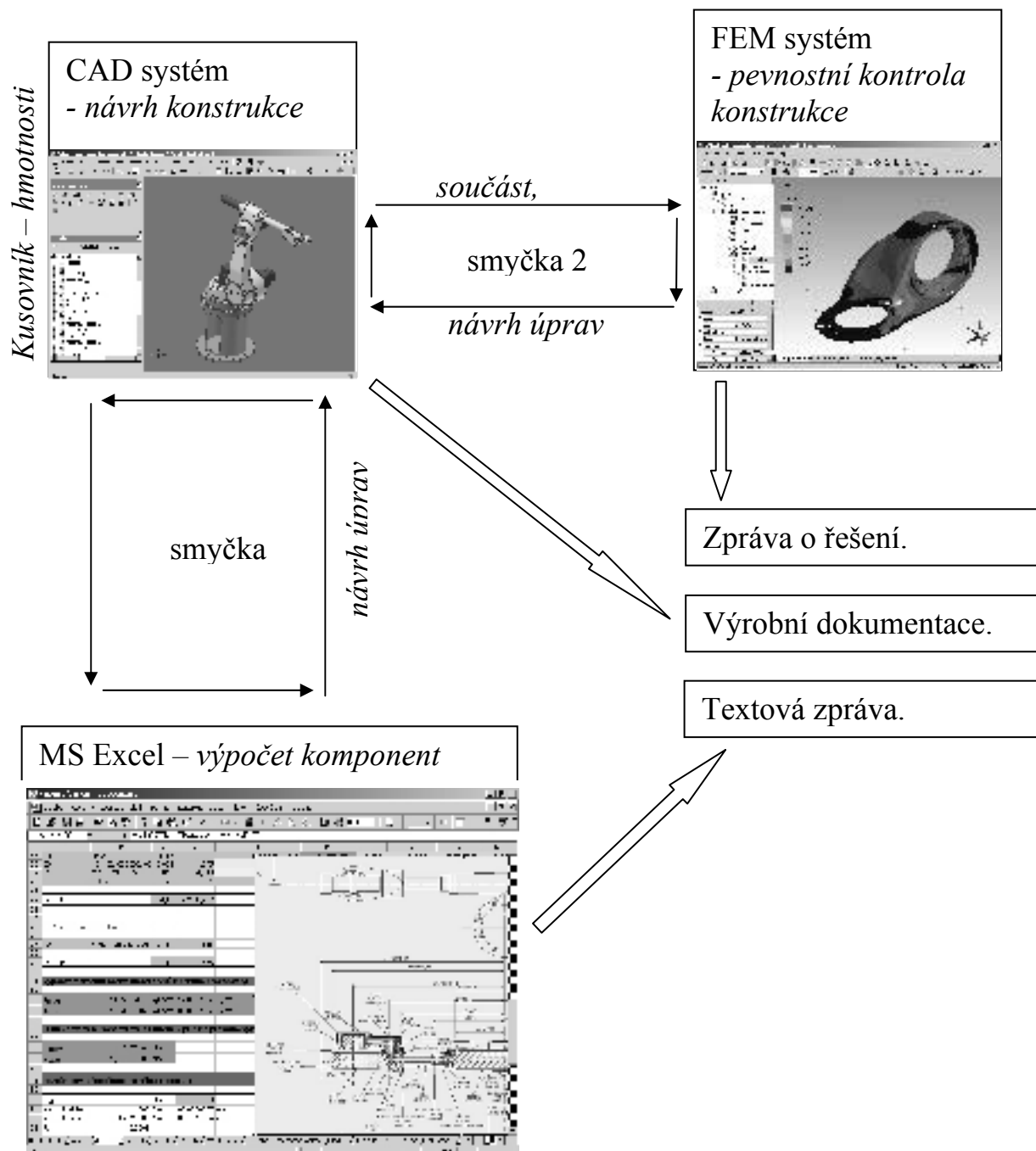
*Obr. 4 Realizovaný prototyp robotu ALR 4.1.*

## **4.2 NÁVRH PROCESU KONSTRUKCE PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU COBALT AR-20**

Robot Cobalt byl vyvinut pro aplikaci ve středních a malých firmách a jeho koncepce využívá modulární jednotky. Disertační práce řeší princip konstrukčního návrhu robotu a jeho algoritmizaci v rámci tří vývojových procesů:

- A - proces CAD systému: Konstruktor pracující v CAD systému typickým způsobem.
- B - proces výpočtu silového působení: Využití speciální výpočetní aplikace naprogramované v MS Excel.
- C - proces FEM: Kontrola dílů metodou konečných prvků.

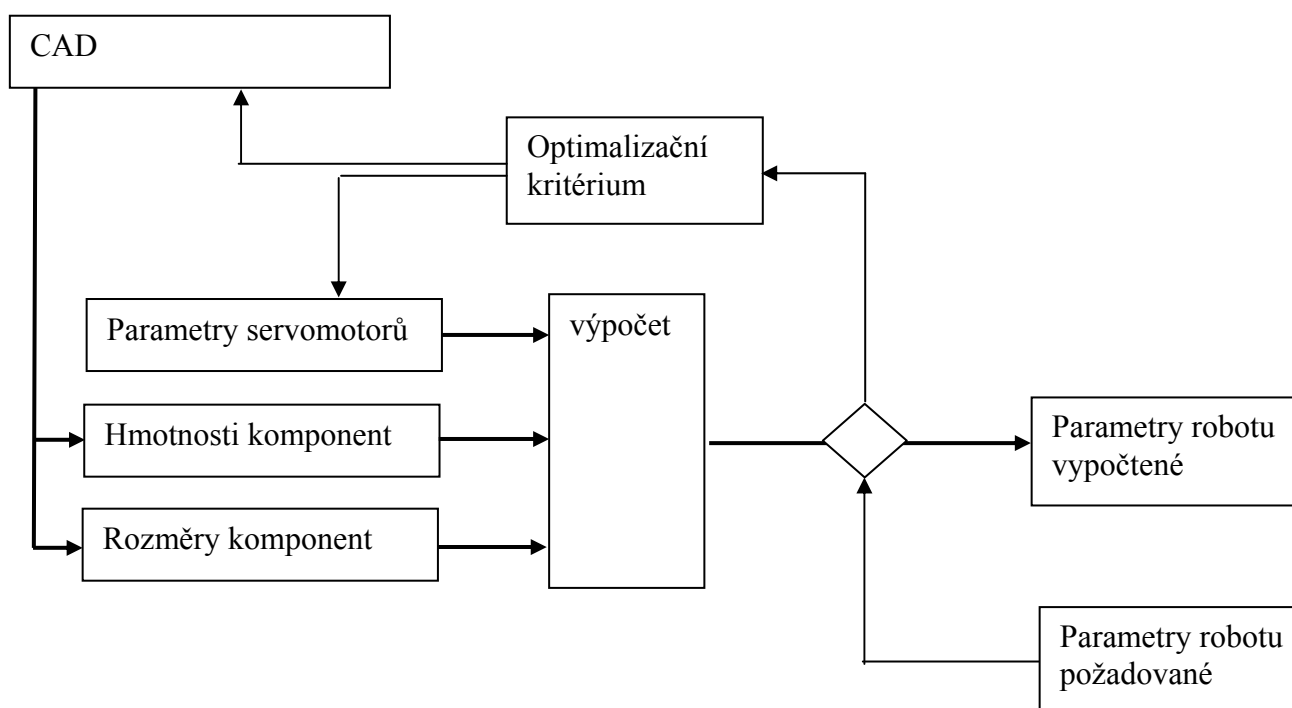
Na Obr. 5 je schéma celého vývojového procesu robotu. Kromě vlastního návrhu dílů v CAD systému probíhá jejich průběžná kontrola ve FEM systému – smyčka B. Ta však potřebuje parametry vyplývající z výpočtů dynamiky – smyčka A. Obě smyčky jsou schopny fungovat nezávisle na sobě. CAD systém a FEM systém byly pro vývoj zapůjčeny, výpočet komponent byl vyvinut v MS Excelu.



Obr. 5 Smyčka konstrukčního procesu výroby

### Postup výpočtu:

Postup výpočtu Obr. 6 spočívá v tom, že na základě vstupních hodnot parametrů servopohonů a hmotností dílů je vypočteno silové působení koncového efektoru na součást (na obrázku tučně). Po provedení výpočtu dojde ke kontrole vypočtených parametrů robotu s požadovanými parametry. Pokud se neshodují, případně je jejich rozdíl zásadní jsou podle různých optimalizačních kritérií modifikovány vstupní parametry. Je provedena změna použitých servomotorů, případně je požadována změna konstrukčního návrhu v CAD systému. Po provedení změn probíhá výpočet znovu a případně v několika dalších smyčkách.



*Obr. 6 Optimalizační smyčka výpočtů parametrů robotu*

### Technická realizace výpočtu:

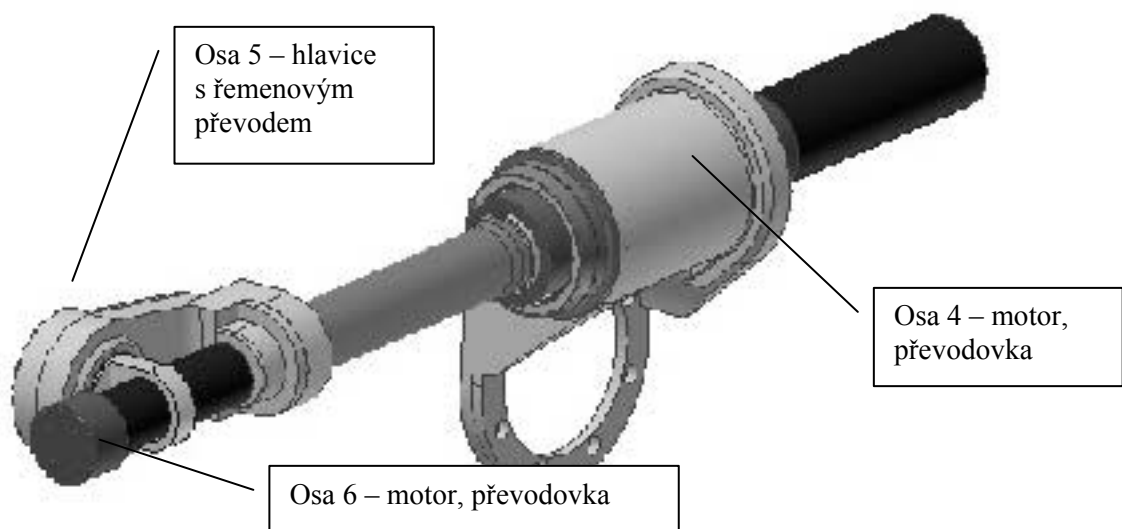
Technická realizace výpočtu je založena na běžných výpočtech dynamických parametrů. Podrobný rozbor je uveden v příloze [p6]. Optimalizační smyčka je realizována v Excelu dle schématu uvedeného na Obr. 6 .

### Modifikace výpočtu:

Výpočet je asociativní s modely v CAD systému Autodesk Inventor [i19]. Změnou jakéhokoliv dílu se změní jeho hmotnost, či moment setrvačnosti a tím se automaticky přepočítá celý výpočet. Po každé změně je okamžitě vidět případná změna parametrů robotu.

### ***Konstrukčního řešení – výsledek konstrukčních procesů***

- a) Celoduralová konstrukce, vyjma základny robotu, která je z oceli. Bezložiskovou koncepcí. Jednotlivé osy jsou uloženy na cykloidních samonosných převodovkách.
- b) Modulární koncepcí, která umožní při poruše stroje vyměnit celý modul – motor, převodovku, rameno.
- c) Bezpřevodovou koncepcí. Vyjma jediného ozubeného a řemenového převodu osy 5 nejsou za převodovkami žádné další převody.
- d) Titanové skořepinové rameno. Rameno 2 osy je řešeno jako tenkostěnný svarek z titanu. Jeho výhodou je velmi malá hmotnost při stejné únosnosti v porovnání s durallem a ocelí.



*Obr. 7 Modulární koncepce orientačního řetězce robotu Cobalt AR-20*

## **Optimalizace stavby robotu Cobalt AR-20**

### ***Konstrukční optimalizace***

Konstrukční optimalizace je založena na metodě „Optimalizace porovnáním“ a spočívá tedy ve znalosti několika různých řešení a schopnosti jejich porovnání z více technických hledisek. Tuto optimalizaci by měl být schopen provést sám konstruktér, případně ve spolupráci s celým vývojovým týmem [c21].

### ***Technologická optimalizace***

Jde o úpravu návrhu z hlediska jeho vyrobiteľnosti. Většinou už samotný konstruktér ví, jestli je díl vyrobiteľný, či nikoliv a zda je vyrobiteľný na strojích v jeho firmě. Jiná situace samozřejmě nastane, pokud se výroba řeší zakázkovou formou.

Technologickou optimalizací by měl projít každý díl a měl by se jednoznačně stanovit způsob výroby a jeho cena. Současně se hledá případný jiný ekonomicky výhodnější způsob výroby. Výsledkem tedy může být návrh určitých konstrukčních úprav, případně jiné konstrukční řešení součásti, či skupiny součástí.

Metodou použitou při této optimalizaci může být Lineární optimalizace, případně Dynamická optimalizace.

### ***Ekonomická optimalizace***

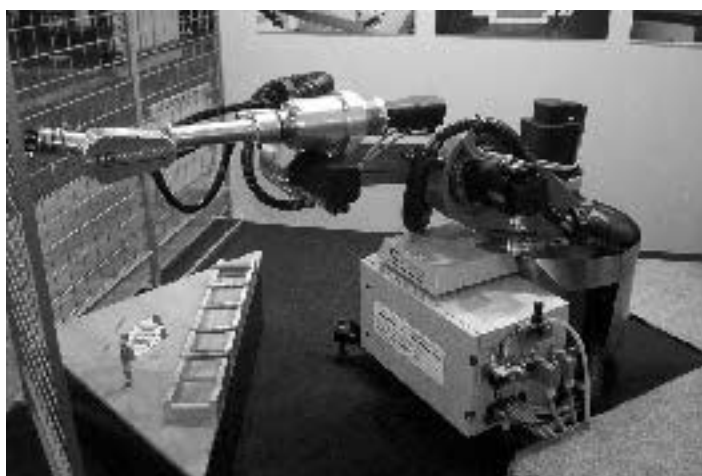
Tento typ optimalizace je samozřejmě na místě po určení nákladů na výrobu.

Každopádně měl by se provádět průběžně v několika okamžicích vývoje zařízení:

- a) před zahájením vývoje při volbě komponent
- b) v průběhu vývoje současně s technologickou optimalizací
- c) na závěr po dokončení virtuálního prototypu

Příkladem ekonomické optimalizace je řešení orientačního řetězce robotu, která byl původně řešen jako integrovaný celistvý řetězec s využitím ozubených kol. Na základě vysokých nákladů na výrobu ozubení, jeho montáž a seřízení bylo rozhodnuto o modifikaci tohoto řetězce na modulární.

### **Ověření parametrů robotu Cobalt AR-20**



*Obr. 8 Prototyp robotu Cobalt AR-20 vystavený na MSV v Brně v září 2004*



Prototyp robotu Cobalt byl testován ve spolupráci s obráběcím strojem v rámci prezentace robotu na MSV v Brně v roce 2004. I přes určitá omezení ze strany betaverze řídicího systému byly provedeny základní testy:

1. **Celková hmotnost robotu.**

Hmotnost bez kabeláže 365 kg.

2. **Opakovaná přesnost polohování.**

Pohybový proces zadaný programem naváděl koncový efektor robotu do určité polohy v počtu cyklů 450. Během této doby byla zaznamenána délková dilatace ramene ve směru jeho prodloužení o hodnotu 1,2 mm. Přesnost polohování byla naměřena  $\pm 0,07$  mm.

3. **Nosnost.**

Maximální nosnost robotu byla stanovena na 25 kg. Zkoušení proběhlo postupným přidáváním zátěže pro jeden cyklus programu. Tato maximální nosnost je nosnost, kdy je zaručena pohyblivost všech os, byť s velmi omezenou dynamikou. Rameno robotu je schopno manipulovat s touto hmotností v jakékoliv poloze. Doporučená maximální hmotnost byla stanovena na 20 kg. Při hmotnosti jsou dosaženy teoretické hodnoty uvedené v tabulce 6.

4. **Pohybové parametry jednotlivých os.**

V tabulce 6 jsou teoretické hodnoty vypočtené z konstrukčního návrhu stroje. Při testech bylo potvrzeno, že tyto hodnoty byly splněny s maximální odchylkou 6% od naměřených hodnot. V tabulce 2 jsou pak uvedeny výsledné hodnoty, které budou uvedeny v katalogovém listu stroje.

5. **Pracovní prostor robotu.**

Je dán konstrukčním návrhem s případným omezením daným rozvodem kabeláží.

## **Shrnutí poznatků z vývoje robotu ALR 4.1 a Cobalt AR-20**

Vývoj robotů ALR 4.1 a Cobalt AR-20 přinesl řadu poznatků pro další vývoj průmyslových robotů:

- a) Zpracovány parametry výběru CAD systému a FEM systému jako počítačová podpora konstrukčního procesu.
- b) Navržena metodika vývoje průmyslového robotu spolu s její algoritmicizací v programu MS Excel.
- c) Konstrukční řešení, optimalizace a ověření modulárních jednotek. Primární řešení v projektu ALR 4.1, jeho modifikace a následná optimalizace v projektu robotu Cobalt AR-20.
- d) Konstrukční řešení mechaniky robotu Cobalt AR-20 podle navržené metodiky vývoje průmyslového robotu

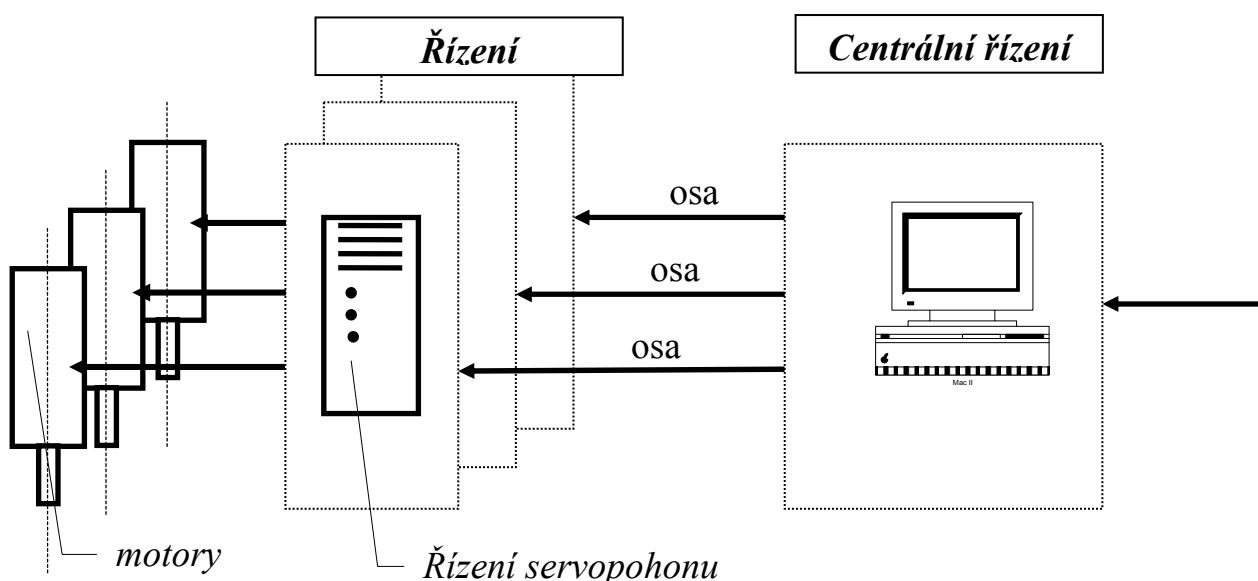
- e) Optimalizace konstrukčního řešení mechaniky robotu Cobalt AR-20 podle několika hledisek.
- f) Získání nových konstrukčních řešení v rámci konstrukce robotu Cobalt AR-20.
- g) Úspěšné ověření mechaniky robotu Cobalt AR-20.

## 4.3 POČÍTAČOVÝ ŘÍDICÍ SYSTÉM A JEHO OPTIMALIZACE

### Struktura řídicího systému

Každý řídicí systém robotu pro spojitě řízení se skládá z těchto částí:

- Řízení pohybu servopohonu. Řízení, které dle požadavků na motor zajišťuje jeho skutečný pohyb pomocí rychlostní, polohové, či rychlostně polohové zpětné vazby.
- Centrální řízení robotu. Výpočet interpolací, které slouží jako vstupy do předchozího řízení pohybu robotu. Periferní části řízení (PLC logika, síťová komunikace a další).



Obr. 9 Schéma dvou úrovní řízení

Disertační práce se zabývá vývojem centrálního řízení na bázi průmyslového počítače.

Výhodou této koncepce je unifikace, kdy lze řídicí systém sestavit z libovolných typů obou úrovní řízení, dokonce z typů od různých výrobců. Např. pro řízení motorů využít Atlas DMC, Control Technique, atd., pro řízení robotu SPARK, MTS software atd.

## Technologie adaptování systému řízenému mechanismu

Adaptování řídicího systému řízenému mechanismu znamená, že řídicí systém se přizpůsobí (adaptuje) stroji, který má řídit. Tato adaptivita může být na takové úrovni, že řídicí systém je schopen pracovat se zcela libovolným mechanismem. Je schopen řídit jak tříosý pravoúhlý robot, tak šestiosý robot s rotačními osami, anebo zcela obecný mechanismus.

### *Základní parametry adaptivní technologie vyvinuté v této disertační práci:*

- Schopnost pracovat s maximálně 10 osami. To je současné omezení, ale teoreticky lze počet zvýšit.
- Tyto osy mohou být všechny rotační, všechny translační, anebo jejich libovolná kombinace, tedy některé osy rotační a některé translační.
- Rozměry mechanismu a poloha jednotlivých osy mohou být v prostoru zcela libovolně orientovány. Mechanismus tak může mít obecnou kinematiku.

Adaptivita je v disertační práci řešena pomocí využití CAD dat řízeného stroje.

## Princip výpočtů interpolací víceosých mechanismů

Úlohu výpočtů kinematiky lze rozdělit na:

- Přímá úloha kinematiky – je známé natočení os, počítá se poloha koncového efektoru.
- Inverzní úloha kinematiky – je známá poloha koncového efektoru, počítá se natočení os.
  - s řízením PTP (Point To Point)
  - s řízením CP (Continuous Point)

### *Definice trajektorie a rychlostního profilu*

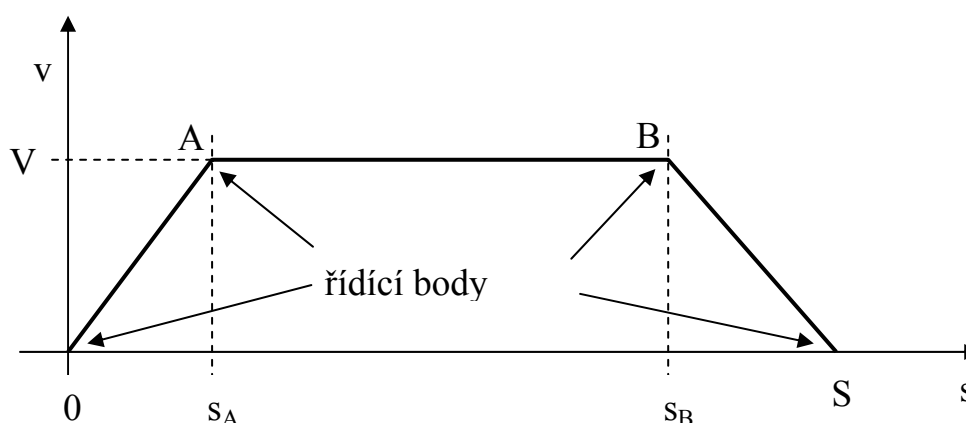
Trajektorie může být definována libovolnými geometrickými křivkami. Jejich vytvoření je dáno matematickým popisem křivky viz. [9].

Po délce křivky je vytvořen rychlostní profil. Princip řízení servopohonů spočívá v tom, že v určitých časových intervalech jsou jim zasílány informace o poloze, případně rychlosti motoru. Tento interval je řádově od 2 – 20 milisek. a jednotlivé servopohony se okamžitě do požadované polohy nastavují (jde o rychlostně-polohové řízení servopohonů) s přímkovou interpolací viz. [9]. Je tedy třeba řízení realizovat jako **časově synchronizované**. Zadáním úlohy je tedy délka trajektorie  $S$  a tvar rychlostního profilu po této délce daný uzlovými body A a B.

Byl odvozen vztah pro výpočet doby projetí trajektorie:

$$T = \frac{2 \cdot s_A}{V} + \frac{s_A - s_B}{V} + \frac{2 \cdot (S - s_B)}{V}$$

kde  $T$  [sec] – celkový čas,  $S$  [mm] – délka dráhy,  $s_B$  [mm] – délka dráhy odpovídající poloze uzlového bodu B,  $V$  [mm/sec] – maximální rychlost profilu.



Obr. 10 Základní rychlostní průběh na definovaném úseku trajektorie.

n [počet]	$t_n$ [absolutní čas]	$v_n$ [absolutní rychlost]	$s_n$ [absolutní poloha]
1	...	...	...
2	$t_2$	$v_2$	$s_2$
3	$t_3$	$v_3$	$s_3$
....	...	...	...
nT	T	0	S

Tab. 1: Tabulka pole vektorů  $\vec{p}_n$ .

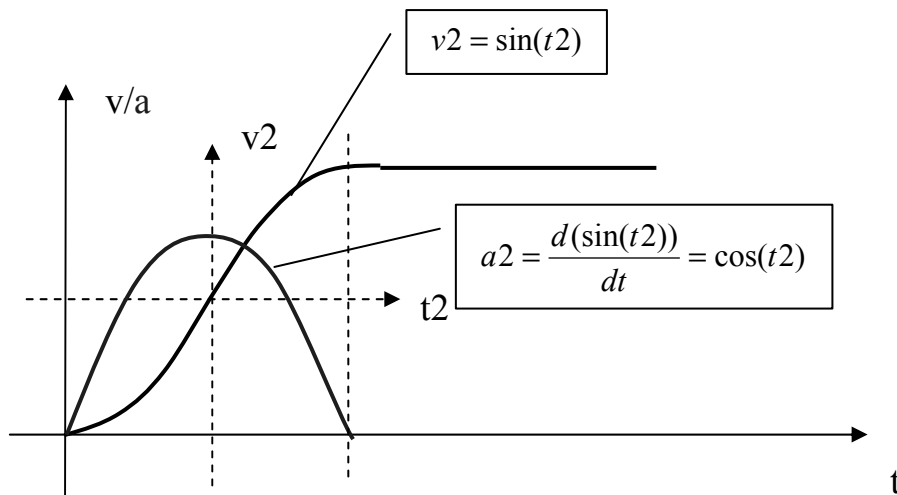
Časové kvantum je rozděleno na pravidelné intervaly (inkrementy)  $dT$ . Pro každý inkrement je stanoven trojrozměrný vektor  $\vec{p}_n = [s_n; v_n; t_n]$ , kde  $s$  [mm] je dráha měřená po trajektorii  $v$  [mm/sec] je rychlost na trajektorii a  $t$  [sec] čas. Jak tedy ukazuje tabulka 8, je třeba v časových intervalech  $dT$ , respektive v absolutních časových okamžicích  $t_n$  posunovat koncový efektor robotu po trajektorii do absolutních vzdáleností  $s_n$  od počátku trajektorie.

Problematika tvaru rampy se zabývá vhodným tvarem rychlostního profilu. Jako vhodný tvar rychlostní rampy lze uvažovat takový průběh rychlosti po trajektorii který:

- neobsahuje skokové změny rychlosti
- neobsahuje skokové změny zrychlení

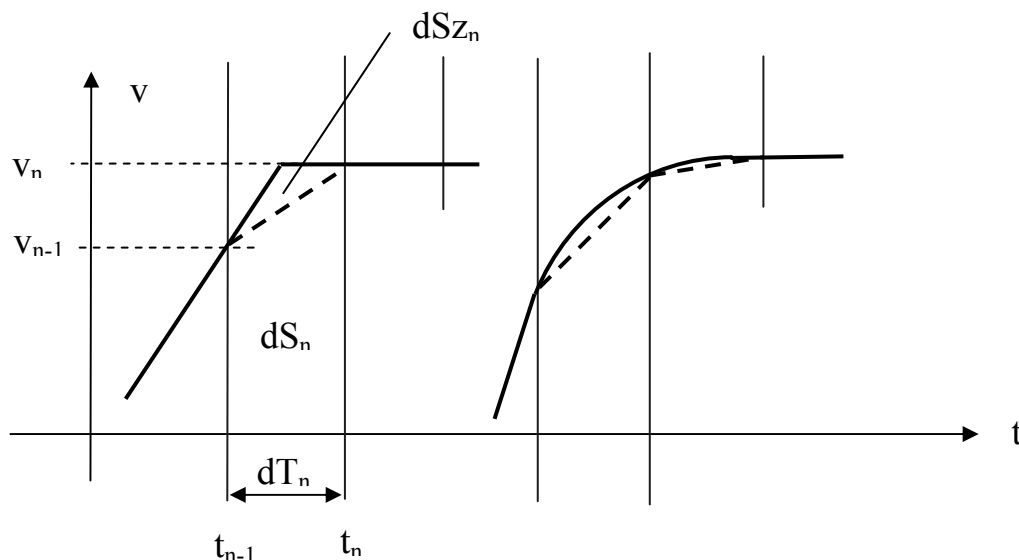
Na Obr.11 je pak tvar který splňuje podmínky kontinuálnosti 1. a 2. derivace a tímto tvarem je sinusoida, nebo cosinusoida.

**Problematika tvaru rampy**



Obr. 11 Vhodný tvar náběžové rampy.  $t_2$  [sec]- čas přepočtený do grafu  $v_2/t_2$  znázorněného čárkovan , rychlost  $v$  [mm/sec], zrychlení  $a$  [mm/sec<sup>2</sup>].

**Problematika diskretizace hodnot rampového grafu a řešení korekcí.**



Obr. 12 Ztráta dráhy vlivem diskretizace průběhu rychlostního profilu

Diskretizace tvaru rampového grafu se zabývá problémem korekce chyby způsobené diskrétním odečítáním z rampového grafu.

## Výpočet natočení jednotlivých os

Pro finální zjištění hodnot natočení jednotlivých os (motorů) je nutné provést posunování koncového efektoru po trajektorii a tím zjistit pro každou polohu koncového bodu, natočení jednotlivých os mechanismu.

Rozebrány jsou metody:

- Analytická – metoda spočívá v přesném analytickém výpočtu, který lze navrhnout pro maximálně 6 polohových os (to odpovídá 6-ti stupňům volnosti).
- Heuristická – metoda spočívá v řešení iterací na principu fuzzy logiky. Metodu lze využít pro více jak 6 os, rychlost řešení je však vzhledem k řešení iteračních cyklů pomalejší.

## Analytické řešení 6-ti osého robotu Cobalt AR-20

Analytické řešení je možné realizovat třemi způsoby:

- Pomocí transformačních matic viz. [9] .
- Pomocí trigonometrických vztahů viz. [1] .
- Hybridní způsob využívající obou předchozích – kombinace trigonometrického postupu s transformačními maticemi.

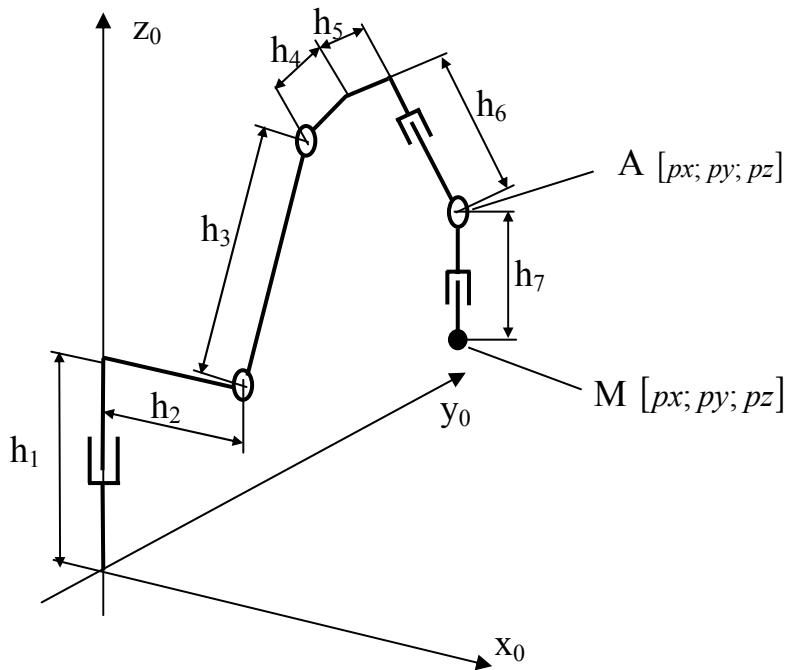
Výpočet úhlů  $\varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$  byl demonstrován s využitím trigonometrického řešení, výpočet úhlů  $\varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$  s využitím transformačních matic jednotlivých os (souřadných systémů os). Pro natočení orientačního řetězce byla stanovena transformační matice.

$$O_M = (C_{\tau_0})^{-1} \cdot O_M^6, \text{ kde } O_M^6 = \begin{bmatrix} Nx & Sx & Ax \\ Ny & Sy & Ay \\ Nz & Sz & Az \end{bmatrix}$$

Transformační matice jednotlivých souřadných systémů (pro zjednodušení popisů je zavedeno:  $c1$  namísto  $\cos(\varphi_1)$ ,  $s1$  namísto  $\sin(\varphi_1)$ , atd.) :

$$C_{10} = \begin{bmatrix} c1 & -s1 & 0 \\ s1 & c1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; C_{21} = \begin{bmatrix} c2 & 0 & s2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s2 & 0 & c2 \end{bmatrix}; C_{32} = \begin{bmatrix} c3 & 0 & s3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s3 & 0 & c3 \end{bmatrix}; C_{\tau_3} = \begin{bmatrix} c\tau & 0 & s\tau \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\tau & 0 & c\tau \end{bmatrix}$$

Výsledná transformace:  $C_{\tau_0} = C_{\tau_3} \cdot C_{32} \cdot C_{21} \cdot C_{10}$



Obr. 13 Kinematické schéma mechanismu s rozměrovými parametry

### Heuristické řešení

Heuristické řešení využívá iterační princip hledání řešení dané úlohy. Principem fuzzy přístupu je zhodnocení množiny variant a následný výběr takové varianty, která nejlépe vyhovuje požadovanému řešení. Řešení bylo zjednodušeno na 2D situaci a posléze aplikováno na 3D model. Princip je založen na postupném natáčení jednotlivých ramen tak, aby se koncový efektor přiblížil požadované poloze v prostoru. Matematický algoritmus natočení osy byl realizován pomocí tzv. Ortogonální transformace, kdy je třeba zjistit vyjádření bodu M v souřadném systému  $O_1$  za předpokladu, že jsou známy jeho souřadnice v systému  $O_2$ .

Bod M v souřadném systému  $O_1$ :  $M_1 = [x_1 \ y_1 \ z_1]$ ;  $\vec{r}_1 = x_1 \vec{i}_1 + y_1 \vec{j}_1 + z_1 \vec{k}_1$ ;

Bod M v souřadném systému  $O_2$ :  $M_2 = [x_2 \ y_2 \ z_2]$ ;  $\vec{r}_2 = x_2 \vec{i}_2 + y_2 \vec{j}_2 + z_2 \vec{k}_2$ ;

Byl odvozen vztah:  $r_1^M = C_{21} \cdot r_2^M$ ;

$$\text{Kde: } C_{21} = \begin{bmatrix} \cos \xi_1 & \cos \xi_2 & \cos \xi_3 \\ \cos \eta_1 & \cos \eta_2 & \cos \eta_3 \\ \cos \zeta_1 & \cos \zeta_2 & \cos \zeta_3 \end{bmatrix};$$

Disertační práce se dále zabývá analýzou praktického využití heuristického algoritmu a dochází k výsledkům:

Algoritmus má následující výhody:

- Dokáže řešit víceosé mechanismy s libovolnou kinematickou strukturou.
- Dokáže pracovat s nepřesnostmi při výrobě.
- Dokáže se adaptovat změnám kinematiky v průběhu řešení.

Nevýhody jsou následující:

- Algoritmus není analytický (nemá jednoznačné řešení), a je řešen postupnými iteracemi, kdy nelze dopředu říci, kolik iterací (kolik času) bude k dosažení výsledku potřeba.
- Jednotlivé výpočty poloh mechanismu mohou trvat různě dlouho, vzniká „nebezpečný prostor“ (poloha manipulátoru kde výpočty poloh trvají neúměrně dlouho). To způsobuje, že algoritmus je nevyhovující pro real-time výpočet.
- Těžko a nejednoznačně se ošetřují krizové stavy

## Softwarová řešení řídicího systému

Uvedené řešení interpolací řízení víceosých robotů bylo prakticky aplikováno v modulárním software řídicího systému.

V rámci disertační práce a vývoje v oblasti řízení robotů byly disertantem vyvinuty tyto softwarové moduly:

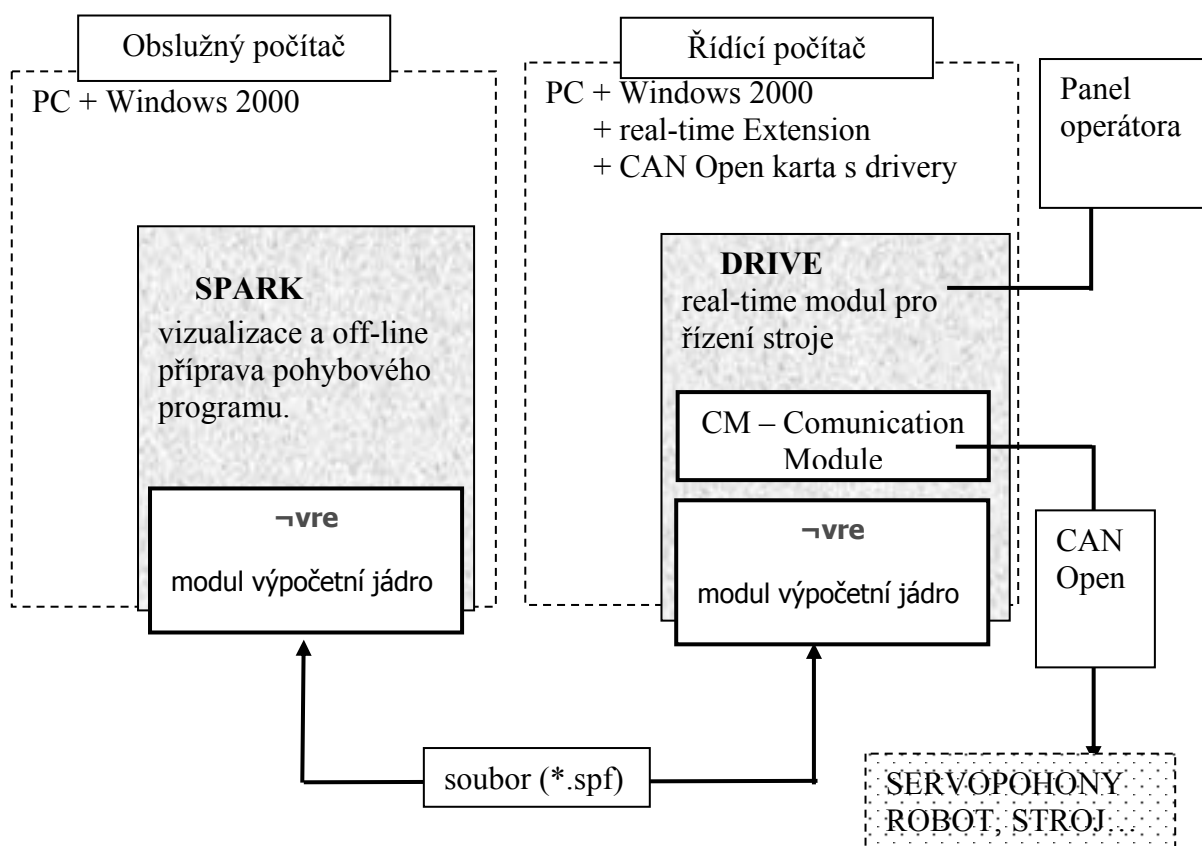
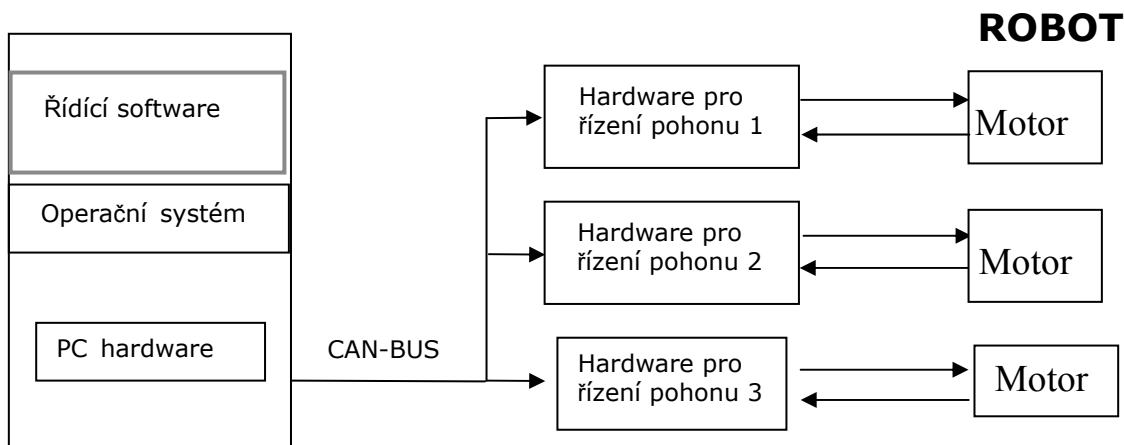
### a) *VRE (Virtual Robotic Environment)*

Výpočetní jádro ve kterém jsou veškeré výpočetní algoritmy řídicího systému. Jádro má vlastní programátorské rozhraní, pomocí kterého je snadno připojitelné do libovolné of-line a on-line aplikace a tedy využitelné i v jiných řídicích systémech.

### b) *Modul Drive.*

Jde o on-line modul pro řízení servopohonů v reálném čase. Jako data se načte hotový program z modulu *Spark* a modul *Drive* je pak posílá do servopohonů v jednotlivých časových intervalech. Modul běží na jakémkoliv počítači s operačním systémem Windows 2000, ovšem s nainstalovaným softwarovým „extensions“, který umožní real-time běh programu pod nedeterministickým systémem Windows. Modul *Drive* neslouží pouze k posílání dat, ale také k přepočítávání dat v reálném-čase. K tomu využívá opět výpočetní modul *VRE*. Takže například když je po vstupu z průmyslové kamery potřeba pozměnit trajektorii, provede to přímo modul sám s využitím algoritmů jádra *VRE*.

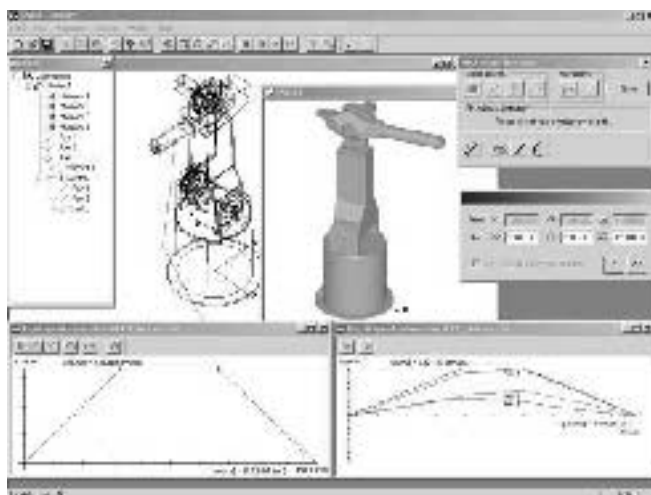




Obr. 14 Koncepte modulárního řídicího systému

c) **Modul Spark.**

Jde o off-line software pro analýzu a přípravu dat pro off-line modul. Byl vytvořen na základě požadavku vizualizace řízeného procesu. Běží na jakémkoliv počítači s operačním systémem Windows 2000/XP. K výpočtům používá modul VRE.



Obr. 15 Prostředí řídicího systému systém Spark

## DOSAŽENÉ VÝSLEDKY A PŘÍNOSY PRÁCE

Za hlavní výsledky této práce lze považovat dokončení vývoje všech předpokládaných úkolů, jejich ověření v praxi a zajištění pokračování vývoje těchto technologií v rámci komerční firmy.

Pro další vývoj v oblasti průmyslových robotů práce přináší tyto výsledky:

1. Návrh modulu s vyměnitelnými komponentami (parametrický kloub), teoretický návrh principu adaptivního modulu.
2. Aplikace modulárních jednotek v konstrukci 6-ti osého robotu ALR 4.1.
3. Analýzy a návrh nového typu průmyslového 6-ti osého robotu Cobalt AR-20.
4. Aplikace modulárních jednotek v konstrukci robotu Cobalt AR-20.
5. Konstrukce 6-ti osého průmyslového robotu Cobalt AR-20.
6. Metodika vývoje průmyslového robotu spolu s návrhem optimalizačních procesů.
7. Vývoj výpočetního software pro konstrukci průmyslového robotu s optimalizačním cyklem v systému MS Excel.
8. Optimalizace konstrukce průmyslového robotu Cobalt AR-20.
9. Realizace výroby, ověření technických parametrů a prezentace robotů ALR 4.1 a Cobalt AR-20.
10. Modulární stavba počítačového řídicího systému.
11. Adaptivní řídicí systém (adaptivita vzhledem k řízenému stroji a vzhledem k hardware řídicího počítače).
12. Propojení řídicího systému s CAD systémem (načítání geometrie stroje z CAD systému).

13. Algoritmus heuristického a analytického řešení přímé kinematické úlohy pro 6-ti víceosé mechanismy.
14. Princip řešení interpolací řídicího systému pro polohové řízení.
15. Řešení korekcí digitalizovaného rychlostního profilu.
16. Řízení různých typů mechanismů jedním řídicím systémem a návrh paralelního využití více počítačů.
17. Propojení řídicího systému s CAM systémem (načítání G-kódů).
18. Vývoj unifikovaného zapouzdření algoritmů do výpočetního jádra pro využití v dalších řídicích systémech.
19. Vývoj off-line vizuálního systému Spark pro vizualizaci a off-line programování řídicích systémů.
20. Vývoj real-time modulu řídicího systému Drive pro řízení stroje z běžného osobního počítače PC s operačním systémem Windows.
21. Ověření mechatronického řešení – aplikace průmyslového robotu Cobalt AR-20 spolu s řídicím systémem Spark na manipulační úlohy.
22. Aplikace robotu Cobalt AR-20 do praxe prostřednictvím firmy TG-Drives.
23. Aplikace řídicího systému (Spark a Drive) do praxe prostřednictvím firmy TG-Drives.

## 5 ZÁVĚR

Tato práce popisuje několikaletý výzkum a vývoj technologií pro řídicí systémy, vývoj, který zdaleka není dokončen a který je ve svých počátcích. Práce tedy nepopisuje finální hotový stav, ale pouze dosud vyvinuté a prakticky ověřené technologie, které jsou a budou postupně nasazovány do praxe. V tuto chvíli již firma TG Drives Brno prezentuje modul Real-time řízení servopohonů z PC a operačního systému Windows a chystá se využít celou koncepci navržené off-line a on-line řídicí koncepce. Stejně tak probíhá výroba prototypu šestiosého robotu Cobalt AR-20, na kterém bude celá koncepce řídicího systému testována a který bude nasazen jako obsluha obráběcího CNC stroje.

Současně technologie a vize uvedené v této práci poslouží jako solidní základna pro další vývoj v oblasti mechatronického řešení problematiky průmyslových robotů a to nejen na ÚVSSaR VUT-FSI v Brně, ale i v komerčních společnostech. Tato práce přinesla nejen nové technologie o které je zájem, ale také ukázala cestu jak prosadit teorie vzniklé na škole, až do plně běžících projektů v komerční firmě. Již v tuto chvíli lze konstatovat že výsledky této práce slouží jako základ pro další projekty v praxi.

## 6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Bělohoubek, P.: Matematický aparát pro řízení 6-ti osých robotů. Výzkumná zpráva v rámci HS 380 208, Brno 1999.
- [2] Bělohoubek, P., Valný, M.: Modulární stavba účelových průmyslových robotů. Článek konference MATAR 2000. ISBN 80-238-5541-7.
- [3] Bělohoubek, P., Valný, M.: Modulární stavba účelových průmyslových robotů. MATAR 2000, Sborník přednášek sekce 3, ISBN 80-238-5539-5.
- [4] Bělohoubek, P., Valný, M.: Systém Methodology in Robot Design. International Workshop Education for Engineering design EED, Pilsen 2000.
- [5] Kolíbal, Z.: The theory of basic kinematic chain structures and its effect on their application in the design of industrial robot positioning mechanism. Monografie 2001.
- [6] Kolíbal, Z.: Průmyslové roboty I. Skriptum VUT 1993, ISBN 80-214-0526-0.
- [7] Kolíbal, Z., Bělohoubek, P.: Analýza vhodné konfigurace průmyslového robotu pro manipulaci u strojů s paralelní kinematikou. International congress, Machine tools, automation and robotics in mechanical engineering. Matar, Praha 2000, pp. 12-20, section 3.
- [8] Matička, R., Talácko, J.: –Mechanismy manipulátorů a průmyslových robotů, ISBN 80-03-00567-1.
- [9] Mácha, J.: Disertační práce. 2000.
- [10] Příkryl, K.: Kinematika. Učební texty vysokých škol.PC –DIR 1994, ISBN 80-214-0535-X.
- [11] Valný, M.: Programování v systému Windows. Seminář ICB: Programovací techniky v systému Windows, Brno 2002.
- [12] Valný, M.: Virtual Robotics Model. Popis API rozhraní modulu.
- [13] Valný, M.: Pojednání ke státní doktorské zkoušce.
- [14] Valný, M.: Technická zpráva projektu Cobalt. Technická zpráva konstrukčního vývoje.
- [15] Valný, M.: Výpočet dynamiky robotu Cobalt AR-20.
- [16] Valný, M.: Projekt „SPARK“ – popis programu. Technická zpráva RLMR, ÚVSSaR, FSI, VUT Brno, 2000
- [17] Valný, M.: Využití fuzzy množin v řídicích systémech. Technická zpráva RLMR, ÚVSSaR, FSI, VUT Brno, 2000.
- [18] Valný, M.: Využití obrazových informací v oblasti řízení víceosých robotů. Technická zpráva RLMR, ÚVSSaR, FSI, VUT Brno, 2000.
- [19] Valný, M.: Základy programování I. – Úvod do jazyka C. Technická zpráva, ÚVSSaR, FSI, VUT Brno, 1998.
- [20] Valny, M. – Belohoubek, P. – Kolibal, Z.: System Approach at Optimalization for Special Robot Design and Computer Control Development. Vienna, Austria, 2001.

## 7 PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY:

### *Rok 1999*

- [c1] Valny, M. - Belohoubek, P. : New Experience from the Robot Design and Robot Control. 10th International DAAAM Symposium, Vienna, Austria, 1999. Separate 022.

### *Rok 2000*

- [c2] Bělohoubek, P - Valný, M.: Modulární stavba účelových průmyslových robotů. Článek konference MATAR 2000.
- [c3] Bělohoubek, P., Valný, M.: Modulární stavba účelových průmyslových robotů. MATAR 2000, Sborník přednášek sekce 3, ISBN 80-238-5539-5.
- [c4] Bělohoubek, P - Valný, M.: Systém Methodology in Robot Design. International Workshop Education for Engineering design EED, Pilsen 2000.
- [c5] Valný, M.: Projekt „SPARK“ – popis programu. Technická zpráva RLMR, ÚVSSaR, FSI, VUT Brno, 2000
- [c6] Valný, M.: Využití fuzzy množin v řídicích systémech. Technická zpráva RLMR, ÚVSSaR, FSI, VUT Brno, 2000
- [c7] Valný, M.: Využití obrazových informací v oblasti řízení víceosých robotů. Technická zpráva RLMR, ÚVSSaR, FSI, VUT Brno, 2000.
- [c8] Valný, M.: Řešení kloubových jednotek stacionárních robotů. Technická zpráva RLMR, ÚVSSaR, FSI, VUT Brno, 2000.

### *Rok 2001*

- [c9] Belohoubek, P. – Kolibal, Z – Valny, M.:Material Optimalization at Special Robots Design for Construction
- [c10] Belohoubek, P. – Kolibal, Z – Valny, M Research in the field of Robotics for the Human Life Support
- [c11] Belohoubek, P. - Valny, M. - Krpec, E.: Mechatronic Approach to the Robot Design and Control. 3 rd International Conference Mechatronic, Robotics and Biomechanics. Trest, Czech Republic, 2001, pp. 35-40.
- [c12] Valny, M. – Belohoubek, P. – Kolibal, Z.: System Approach at Optimalization for Special Robot Design and Computer Control Development. 10th Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube region. RAAD 2001, Vienna, Austria 2001.

### ***Rok 2002***

- [c13] Belohoubek, P. - Valný, M.-Kolibal, Z. -Krpec, E.: Mechatronic Optimization in Robot Development. IEE ICIT'02, Bangkok, Thailand, 2002, p. 747-750.
- [c14] Belohoubek, P. - Valny, M. - Krpec, E.: Mechatronický přístup k řízení a stavbě robotů s elektrickými servopohony (Mechatronic approach to the robot control and design with el. servodrives) Seminar ICB, Czech Republic 2002, pp. 1-12.
- [c15] Bělohoubek, P.-Valný, M. – Kolibal, Z.:Applied Modelling and Simulation of Special Robots. IASTED International Conference Applied Simulation and Modelling, Crete, Greece, 2002, pp. 412-415.
- [c16] Valny, M - Belohoubek, P. - Kolibal, Z.: Process of special industrial robots development and application. 11th International workshop on robotics in Alpe-Adria-Danube region. Balatonfured, Hungary, 2002, pp. 229-232.

### ***Rok 2003***

- [c17] Bělohoubek, P.-Valný, M. – Kolibal, Z.: Reengineering in the special industrial robots development and application
- [c18] Kolibal, Z. – Belohoubek, P. – Valny, M.: Research Integration of Robotic Design and Control Proceedings of RAAD'03, 12th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Cassino May 7-10, 2003
- [c19] Kolibal, Z. – Belohoubek, P. – Valny, M. a kol.: Vývoj průmyslových robotů a jejich řízení na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky VUT, FSI v Brně. Časopis Acta Mechanica Slovaca, Košice, 3/2003, str. 63-68. ISSN 1335-2393.
- [c20] Valný, M: Pevnostní kontrola v konstrukčním návrhu součástí a sestav. Seminář Stavba a mechanické komponenty strojů a zařízení IV., str. 28, ISBN 80-86308-12-X.

### ***Rok 2004***

- [c21] Valný, M.: Optimization of six axes robot design and robot control. 13th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Brno June 1-6, 2004, pp. 262-267.

## 8 INTERNETOVÉ ODKAZY

- [i1] <http://www.roboticsevolution.com/> - stránky technologií popisovaných v disertační práci.
- [i2] <http://cobalt.3web.cz> - stránky projektu Cobalt.
- [i3] <http://www.roboticonline.com> - stránky o robotice.
- [i4] <http://www.neuron.cz> - informační stránky o vědě.
- [i5] <http://www.robotics.com> - stránky o robotice.
- [i6] <http://www.beckhoff.de> - výrobce řídicích softwarů.
- [i7] <http://www.abb.com> - ABB Inc. – výrobce robotů.
- [i8] <http://www.kuka.de> - Kuka GmbH – výrobce robotů.
- [i9] <http://www.reisrobotics.de> - Reis GmbH – výrobce robotů.
- [i10] <http://www.sef-roboter.de> - SEF GmbH – výrobce robotů.
- [i11] <http://www.tgdrives.cz> - firma spolupracující na projektech Spark a Cobalt.
- [i12] <http://www.ifl.unizh.ch/groups/ailab/links/embedded.html> - Real-time operační systémy.
- [i13] <http://robotics.stanford.edu> - Laboratoř Stanford.
- [i14] <http://www.robots.org> – Robotická asociace.
- [i15] <http://www.etl.go.jp/etl/robotics> – Tsukuba laboratory.
- [i16] <http://www.ifl.unizh.ch/groups/ailab> Laboratoř umělé inteligence.
- [i17] <http://www.roboticsevolution.com> - další vývoj technologií popisovaných v disertační práci.
- [i18] <http://www.opengl.com> - grafická knihovna pro vývojáře.
- [i19] <http://www.autodesk.com> - výrobce CAD systémů.
- [i20] <http://www.ansys.com> - výrobce FEM systému Ansys.
- [i21] <http://www.fanuc.com> - Fanuc Inc. – výrobce robotů.
- [i22] <http://microsoft.com> - Informace o operačním systému Windows.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Kloub s vyměnitelnými komponentami, III. osa robotu ALR 4.1 .....	9
a) letmé uložení ramene, b) kloub se svislou osou, c) kloub pro větší nosnosti. ....	9
Obr. 2 Konstrukce 3. osy robotu ALR 4.1 – MODIFIKACE II (návrh Ing. Trenz).....	10
Obr. 3 Konstrukce 3. osy robotu ALR 4.1 – MODIFIKACE III. Varianta s pláštěm pro vyšší zatížení .....	10
Obr. 4 Realizovaný prototyp robotu ALR 4.1.....	11
Obr. 5 Smyčka konstrukčního procesu výrobku .....	12
Obr. 6 Optimalizační smyčka výpočtů parametrů robotu .....	13
Obr. 7 Modulární koncepce orientačního řetězce robotu Cobalt AR-20 .....	14
Obr. 8 Prototyp robotu Cobalt AR-20 vystavený na MSV v Brně v září 2004 .....	15

Obr. 9 Schéma obou úrovní řízení.....	17
Obr. 10 Základní rychlostní průběh na definovaném úseku trajektorie.....	19
Obr. 11 Vhodný tvar náběhové rampy. $t_2$ [sec]- čas přepočtený do grafu $v^2/t_2$ znázorněného čárkovan , rychlost $v$ [mm/sec], zrychlení $a$ [mm/sec <sup>2</sup> ].....	20
Obr. 12 Ztráta dráhy vlivem diskretizace průběhu rychlostního profilu.....	20
Obr. 13 Kinematické schéma mechanismu s rozměrovými parametry.....	22
Obr. 14 Koncepce modulárního řídicího systému.....	24
Obr. 15 Prostředí řídicího systému systém Spark .....	25

## SEZNAM PŘÍLOH DISERTAČNÍ PRÁCE

- [p1] Volba CAD systémů.
- [p2] Prodávané roboty v České republice.
- [p3] Manuál systému Spark.
- [p4] API rozhraní Virtual Robotics Environment (VRE) pro real-time aplikace.
- [p5] API rozhraní Virtual Robotics Environment (VRE) pro off-line aplikace.
- [p6] Výpočet dynamického zatížení ložisek a převodovek.
- [p7] Optimalizační výpočet dynamiky robotu Cobalt.
- [p8] Data Sheet KR125. Technické parametry robotu Kuka KR125.
- [p9] Data Sheet KR150. Technické parametry robotu Kuka KR150.
- [p10] Data Sheet IRB 1400. Technické parametry robotu IRB 1400.
- [p11] Data Sheet Reis Robots. Technické parametry robotu SRV 16.
- [p12] Data Sheet SEF-Roboter. Technické parametry robotu SR25.
- [p13] Data Sheet Fanuc. Technické parametry robotu M-16iAL.
- [p14] CD s programem SPARK pro off

## 9 ŽIVOTOPIS AUTORA

Narozen 16. 11. 1974 ve Vyškově. Po dosažení základního vzdělání absolvoval v letech 1989 až 1993 Střední průmyslovou školu strojní na Kotlářské ulici v Brně. Od roku 1993 do roku 1998 proběhlo studium na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně se zaměřením na robotiku a automatizaci, zakončené získáním inženýrského titulu. Od roku 1998 pokračuje postgraduálním studiem. Od roku 1988 pracuje ve firmě Space spol. s r.o., zabývající se dodávkami CAD software. Od téhož roku působí jako externí redaktor časopisu CAD publikující recenze strojírenských CAD softwarů. Od roku 2001 pracuje ve firmě Adeon CZ spol. s r. o. dodávající CAD systémy na pozici specialista mechanical CAD.

Mezi základní znalosti patří práce na PC, práce v CAD systémech a obecný přehled v této problematice, vývoj mechanických zařízení a konstruktérské práce, znalost programování v jazyce C++, C++. Řidičský průkaz skupiny A, B.



## 10 ABSTRACT

The robotics is very perspective discipline that should bring a large progress for humanity. We can find the robots in all domains of people work. Industrial robotics has the largest sense of proportion from robotics applications. This area still requires and will require more perfect robotic machineries. That means more perfect of both robot parts – mechanics system and control system, the body and the soul of a robot. Project “Optimization of six axes robot design and robot control” is solving a suitable optimization for this both robot parts as the base of the next development. By the analysis of many industrial processes we can appoint next requests to the robot design and robot control.

Robot design:

- Development of modular structure that could be able to adapt to the process environment. For example a change of the kinematics structure of robot as a response of process request.
- Using of new materials for robot design.
- Cheaper robot and automation machinery.

Robot control:

- Simply modular systems. We can arrange a suitable compilation of software for the requested task.
- Short development time of software.
- Adaptable systems. Systems are able to adapt itself to the any robots (any kinematics structures).
- Low hardware requirements. The system would use a common “non special” hardware.
- Low price of solution.

In robot design area I was working on the modular structure of robot mechanism. There was developed two kinds of mechanical structure:

- Structure with parametrical modules.
- Structure with adaptive modules.

The testing of adaptive robotics systems demonstrated the large possibilities of the parametrical and adaptive modules with combination of adaptive control system. The next development is aimed to these findings, because the described project got a many outputs for our development. New robot Cobal AR-20 will be use in adaptive structure as a last three axes and complete robot will be control by adaptive system Spark.