

# METODY VYŠETŘOVÁNÍ INTERAKCE POHONNÉHO A MECHANICKÉHO SUBSYSTÉMU

## (METHODS OF INVESTIGATION OF THE INTERACTION OF DRIVING AND MECHANICAL SUBSYSTEMS)

\*Vladimír MOSTÝN, \*\*Ivo NEBORÁK

\*Katedra robototechniky, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava, Czech Republic, tel.: +420 59 6994257, E-mail vladimir.mostyn@vsb.cz

\*\*Katedra výkonové elektroniky a elektrických pohonů, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava, Czech Republic, tel.: +420 59 6994479, E-mail ivo.neborak@vsb.cz

### SUMMARY

*Methods of the creation of virtual prototypes of multidisciplinary (mechatronic) systems are highly focused by researchers as well as by managers of the enterprises because of significant shortening of the cycle development – production and minimization of the costs for creation of the physical prototype. One of the powerful tools for modeling of the mechatronic systems is computing and simulating system MSC/Adams that offers tools for creation of the mechanical subsystem as well as driving and control subsystems. This paper presents individual steps of the creation of the industrial robot arm equipped with harmonic gearbox and DC drive.*

**Keywords:** mechatronics, simulation, virtual prototype, interaction

### 1. ÚVOD

Metody vytváření virtuálních prototypů multidisciplinárních (mechatronických) systémů se dostávají v současné době stále více do popředí zájmu jak výzkumných pracovníků, tak manažerů výrobních podniků, protože jejich použití přináší významné zkrácení cyklu vývoj – výroba při minimalizaci nákladů na vytváření fyzických prototypů.

Mechatronické systémy sestávají z řady vzájemně se ovlivňujících komponent z oblasti strojních součástí, pohonů, elektroniky, řídicích a senzorických systémů, které pracují na různých fyzikálních principech a jsou integrovány do jednoho systému tak, aby uspokojily vysoké nároky spotřebitelů. Klíčovým elementem v mechatronice je právě jejich integrace v průběhu návrhového procesu, která zahrnuje funkční analýzu a syntézu komplexního mechatronického systému, testování a vyšetřování chování virtuálního prototypu a nakonec testování fyzického prototypu.

Vyšetřování interakce mezi jednotlivými subsystemy je nesmírně důležité a změny parametrů jednoho subsystemu výrazně ovlivňují chování subsystemů ostatních. Zejména v oblasti návrhu a dimenzování elektrických pohonů přináší nové nástroje výpočetní techniky nové poznatky a možnosti nastavení parametrů pohonných subsystemů a jejich dimenzování. Na virtuálních prototypu lze eliminovat nežádoucí jevy, které při klasickém návrhu není možno předvídat a které hrají významnou roli v kvalitě výsledného produktu.

Jedním z těchto nežádoucích jevů je například možnost mechanické rezonance při velmi malých otáčkách motorů, kdy dochází ke kolísání

výstupního momentu, jehož frekvence se může dostat do pásma vlastní rezonance mechanického subsystemu.

Také frekvence vzorkování řídicího systému může být v rezonančním pásmu mechanického subsystemu a při používání harmonických převodovek, které jsou charakteristické vysokým převodovým poměrem, ale taky pružností převodového členu, dochází k rezonančním jevům, které výrazně snižují životnost výsledného produktu.

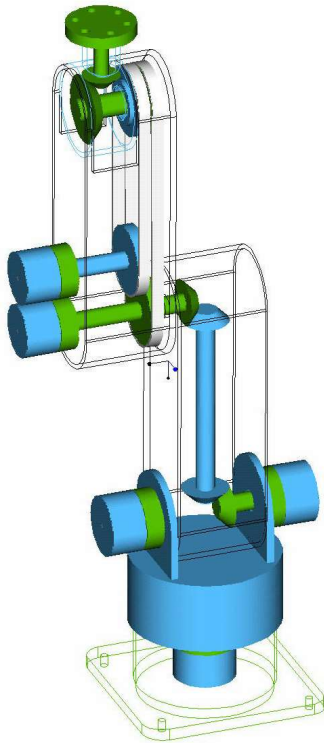
Tyto přístupy je nutno aplikovat zejména u strojů s vysokou dynamikou, jako jsou průmyslové a servisní roboty pro speciální účely [1], obráběcí stroje [2] a v řadě dalších případů.

Druhým důvodem, kdy je nutno využívat komplexní mechatronické modely jsou nové postupy dimenzování pohonů – jak vlastního motoru, tak napájecího měniče a parametrů napájecí sítě. V současné době se pro systémy s vysokou dynamikou, jako jsou např. průmyslové roboty, používá výhradně principu momentového řízení (Computed torque control), kdy řídicí systém na základě dynamického modelu mechanismu předem vypočte potřebný moment v každém časovém okamžiku a pohonný systém má za úkol požadovaný moment realizovat. Souvislost mezi dynamikou požadované trajektorie, dynamikou mechanického subsystemu, dynamikou řídicího subsystemu a dynamikou vlastního pohonu je nasnadě.

Problémem v oblasti modelování komplexních mechatronických systémů byl dosud nedostatek vhodných nástrojů pro modelování. Obrovský ekonomický tlak na zefektivnění vývoje a výroby přinesl ale v současné době řadu vhodných nástrojů pro modelování mechatronických systémů. Jaké možnosti jsou dnes k dispozici:

## 2. POUŽITÍ UNIVERZÁLNÍCH SIMULAČNÍCH NÁSTROJŮ

Univerzální simulační systém, jako je např. systém Matlab/Simulink, je vhodný zejména pro oblast modelování pohonných subsystémů, jejichž matematické modely jsou dnes dobře propracované. Také oblast řídicích systémů je možno pomocí Matlabu a jeho nástrojů (Simulink a speciální toolboxy) velmi dobře zvládnout. K dispozici jsou poměrně kvalitní knihovny jednotlivých prvků těchto subsystémů.



**Obr. 1** Model robotu  
**Fig. 1** Model of the robot

Problém nastává při nutnosti doplnit systém kvalitním a úplným dynamickým modelem mechanismu, při uvažování všech vnitřních převodů a rozvodů a jejich vlastností. V této oblasti simulační systém Matlab silně pokulhává a ani toolboxy jako SimMechanics tuto situaci neřeší. K vypracování komplexního modelu je nutno využít některý z CAD systémů a exportovat rozhodující parametry mechanického subsystému a sestavit matematický model mechanismu v prostředí Matlabu. Obdobně vlastnosti i nedostatky má také další simulační systém Dymola.

## 3. POUŽITÍ CAD SYSTÉMU

CAD systémy byly prvotně určeny pro návrh strojních součástí a sestav a v současné době dosáhly značné dokonalosti. Byly doplněny výpočetními nadstavbami, které řeší oblast kinematiky a dynamiky mechanismů, napětěovou analýzu součástí, umožňují tvarovou a rozměrovou optimalizaci součástí, predikci životnosti, ale ve většině případů

neumožňují doplnění modelu mechanismu modely pohonů a modely řídicích bloků. Výjimkou snad je jen systém Pro/Engineer a jeho nadstavba Pro/Mechanica, která umožňuje export tzv. „zapouzdřeného“ modelu mechanismu jako knihovny v jazyce C++, resp. Fortran a použití této knihovny ve vlastním simulačním programu a import do prostředí simulačního systému Matlab. Tento postup je však velmi náročný na programátorské a systémové znalosti.

## 4. POUŽITÍ SPECIÁLNÍCH SIMULAČNÍCH SYSTÉMŮ

Celá řada výpočetních a simulačních systémů se honosí názvem „mechatronický“ resp. „multidisciplinární“, ale jejich praktické použití, zejména v oblasti tvorby reálného mechanického subsystému je většinou nedostačující. Výjimkou mezi nimi je výpočetní a simulační systém MSC/Adams, který umožňuje vytvoření úplného modelu mechanismu a jeho doplnění jak modelem elektrického pohonu, tak i bloky řídicího systému, resp. regulátoru. Nadstavba Adams Hydraulics umožňuje doplnění modelu mechanismu hydraulickými prvky a pohony a k dispozici je rozsáhlá knihovna hydraulických prvků. Další nadstavba Adams Controls umí doplnit model mechanismu sofistikovaným modelem řídicího a pohonného subsystému, ať už ve vlastním prostředí nebo formou spolupráce s univerzálními simulačními systémy, jako je systém Matlab/Simulink, EASY5 nebo MATRIX<sub>x</sub>. V oblasti modelování elektrických pohonů a bloků regulátorů jsou k dispozici tři způsoby vytváření komplexního mechatronického modelu:

- doplnění modelu mechanismu základními bloky, modelujícími prvky elektrického pohonu resp. bloky řízení s využitím knihovny prvků přímo v prostředí Adams View.
- vytvoření modelu mechanismu v prostředí MSC/Adams a modelu řídicího a pohonného systému v prostředí univerzálního simulačního systému Matlab/Simulink (EASY5, MATRIX<sub>x</sub>) a propojení obou systémů při tzv. kosimulaci – současné simulaci chování mechanického subsystému v prostředí MSC/Adams a pohonného a řídicího subsystému v prostředí Matlab/Simulink při vzájemné interakci. Při tomto způsobu jsou pro simulaci modelu v Matlabu použity výpočetní prostředky (řešič) Matlabu, pro simulaci chování mechanismu použit řešič Adamsu a oba systémy si vyměňují data a synchronizují se prostřednictvím komunikačního kanálu.
- vytvoření modelu pohonného a řídicího subsystému v prostředí Matlab/Simulink a jeho export do prostředí MSC/Adams s použitím Matlab Real-Time Workshop. V tomto případě probíhá simulace celého mechatronického modelu pouze s využitím výpočetních prostředků systému MSC/Adams.

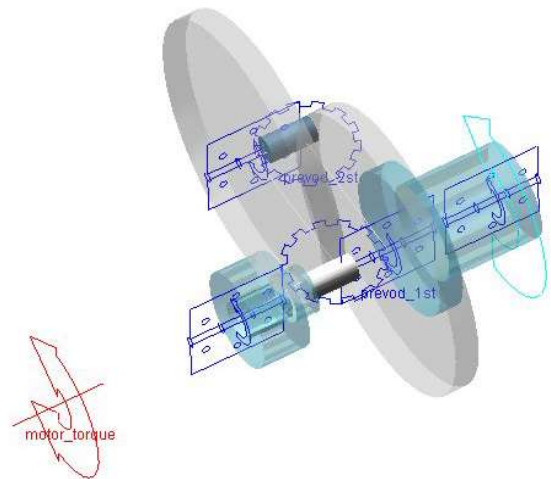
Nevýhodou použití systému MSC/Adams (obdobně jako u řady dalších specializovaných systémů, např. Ansys) je nedokonalý modelář pro vytváření modelu mechanismu. Z tohoto důvodu je používána metoda vytvoření modelu mechanismu v prostředí některého výkonného CAD systému (Pro/Engineer) a s využitím možnosti exportu 3D těles v některém přenositelném formátu je proveden přechod do prostředí MSC/Adams, kde jsou teprve vytvořeny potřebné vazby mezi jednotlivými součástmi. Zásadní výhodou systému MSC/Adams je možnost vytváření dynamického modelu mechanismu s uvažováním pružných těles, která zásadně rozšiřuje možnosti vytváření virtuálních prototypů s „reálnými“ vlastnostmi a umožňuje vyšetřovat fyzikální jevy uvedené v úvodu článku a další zásadní výhodou je možnost modelování kontaktu těles. Dále je ukázán postup doplnění modelu stejnosměrného motoru řízeného napětím k mechanickému subsystému – v našem případě je použito rameno průmyslového robotu.

## 5. VYTVOŘENÍ MODELU SS MOTORU V PROSTŘEDÍ MSC/ADAMS

Nejprve poznámka k modelování mechanické části motorů a převodů. Tyto komponenty jsou většinou nakupované, pouze u speciálních převodů je konstruktér mechanické části vytváří samostatně. Z tohoto pohledu není nutno modelovat motory a převody detailně, pouze je nutno dodržet následující katalogové parametry, které jsou důležité pro vysokou shodu virtuálního prototypu s reálným prototypem:

- vnější rozměry a vzhled motoru a převodovky.
- celková hmotnost motoru a převodovky – tento parametr se většinou nastavuje vhodnou měrnou hmotností skříně motoru a převodovky (ovlivňuje další hmotnostní parametry), katalogové údaje jsou běžně k dispozici.
- matice setrvačnosti motoru a převodovky – je nutno uvážit, že motor spolu s převodovkou často koná prostorový pohyb, viz obr. 1, proto setrvačné efekty při translačním a rotačním pohybu musí odpovídat reálnému motoru, resp. převodovce. Tyto parametry je často obtížné přesně nastavit, z katalogových údajů je většinou k dispozici pouze moment setrvačnosti rotoru motoru a moment setrvačnosti převodovky vzhledem ke vstupnímu nebo výstupnímu hřídeli a ostatní prvky matice setrvačnosti je nutno určit odhadem nebo měřením.
- rotor motoru je nahrazován jednoduchým rotačním tělesem, vhodnou volbou rozměrů a měrné hmotnosti lze dosáhnout shody s reálným motorem. Vlastní převody převodovky jsou modelovány zjednodušeně a zase lze nastavením rozměrů vnitřních

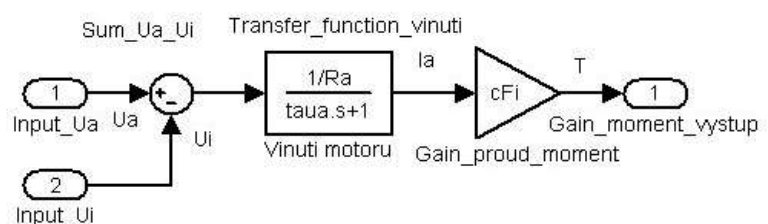
kol dosáhnout shody se skutečnou převodovkou. Řada systémů - MSC/Adams, Pro/Engineer, má nástroje pro nastavování hmotnostních parametrů modelovaných těles jiných, než vyplývá z jejich geometrie. Příklad harmonické převodovky, kdy je převod nahrazen ekvivalentním dvoustupňovým čelním převodem je ukázán na obr. 2.



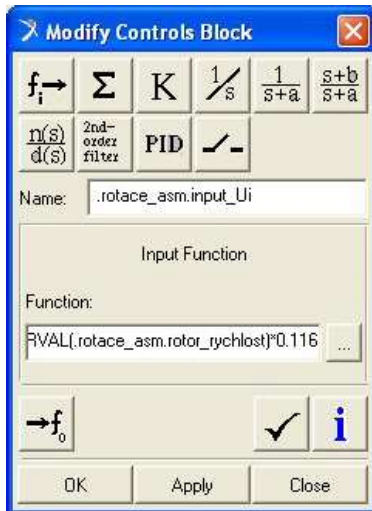
**Obr. 2** Model harmonické převodovky  
**Fig. 2** Model of the harmonic gearbox

- funkční parametry – sem patří zejména převodový poměr, tuhost hřídelí, spojek, převodů. Tyto parametry se modelují prostřednictvím vhodných mechanických vazeb přímo v prostředí MSC/Adams.

Po vytvoření mechanické části motoru je možno přistoupit k vytvoření elektrické části pomocí knihovny prvků. Model elektrické části stejnosměrného motoru (a i dalších případných regulačních bloků) je automaticky v interakci s mechanickým subsystémem (mechanická část pohonu - rotor, převodovka a navazující mechanismus robotu) tím že výstupem modelu elektrické části motoru je moment, který je aplikován přímo na mechanický model rotoru a tím na celý navazující mechanismus. Mechanická (kinematická) veličina *rotor\_rychlost* je v systému k dispozici a je použita k vytvoření zpětné vazby indukovaného napětí ve vinutí motoru. Nejprve je vytvořeno pomocí Controls Toolkit blokové schéma prvků, obdobně jako v prostředí Matlab/Simulink.



**Obr. 3** Blokové schéma modelu vinutí ss motoru  
**Fig. 3** Block diagram of the model of a DC motor winding

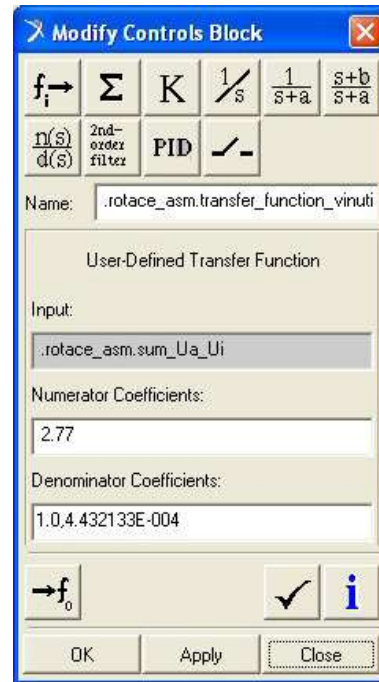


**Obr. 4** Vytváření vstupních bloků  
**Fig. 4** Creation of input blocks

V prostředí MSC/Adams toto schéma bohužel není možno graficky zobrazit, což způsobuje problémy při vytváření rozsáhlých modelů. Pro model stejnosměrného motoru řízeného napětím je možno použít např. zjednodušené schéma podle obr. 3.

Jak je vidět z blokového schématu, model obsahuje dva vstupní bloky – *Input\_Ua* je napětí kotvy (výstup z měniče realizovaného např. v prostředí Matlab), *Input\_Ui* je vytvořen násobením úhlové rychlosti rotoru motoru (stavová proměnná *motor\_rychlost* vytvořená v systému MSC/Adams) a koeficientu magnetického toku  $c\Phi = 0,116$ .

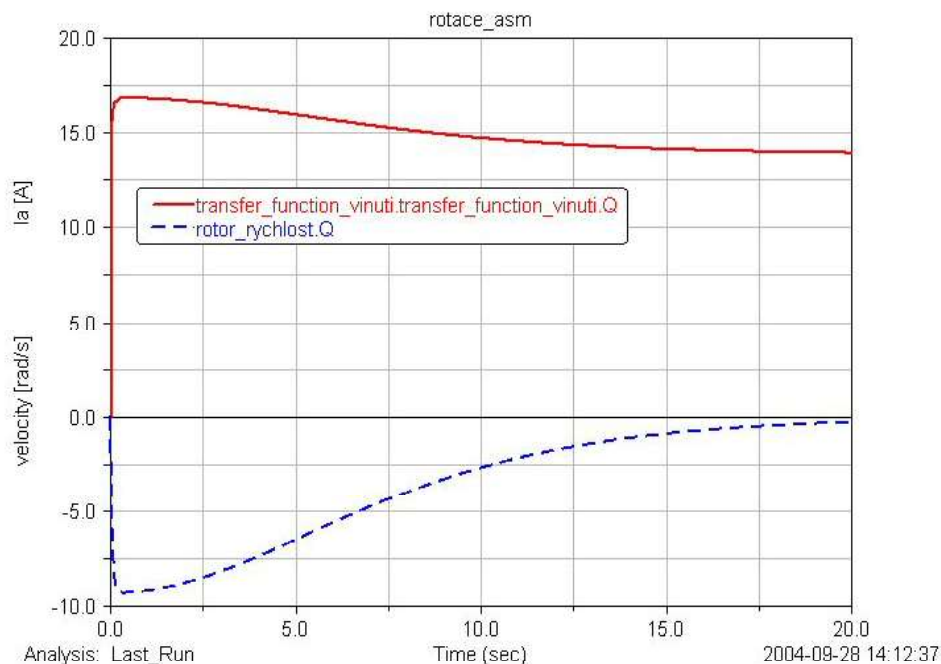
Dialog vytváření prvků tzv. „Control Blocks“ je ukázán na obrázcích. Na obr. 4 je ukázáno vytvoření



**Obr. 5** Vytváření přenosových funkcí  
**Fig. 5** Creation of transfer functions

vstupu *Input\_Ui* a na obr. 5 vytvoření bloku přenosu vinutí – *Transfer\_function\_vinuti*.

Takto lze vytvořit ostatní prvky elektrické části modelu stejnosměrného motoru. Vlastní výstup motoru je moment působící na rotor motoru prostřednictvím prvku MSC/Adams – *Single\_Component\_Force*, do kterého vstupuje výstup z bloku *Gain\_moment\_vystup*, tedy moment generovaný vinutím motoru.



**Obr. 6** Úhlová rychlost rotoru a proud vinutím  
**Fig. 6** Rotor velocity and winding current

K modelování různých fyzikálních jevů je možno použít výkonný matematický nástroj systému MSC/Adams – Function Builder, lze například modulovat amplitudu výstupního momentu motoru v závislosti na otáčkách apod. Všechny veličiny jak mechanického modelu, tak modelu pohonného a řídicího subsystému lze pohodlně zobrazovat, na obr. 6 je uveden například průběh rychlosti rotoru motoru a proud vinutím motoru pro daný průběh polohy a napětí na kotvě. Obdobný postup lze použít při sestavení regulátoru proudu, rychlosti nebo polohy a ověřovat nastavení regulátoru pro danou trajektorii ramene. Komplikovanější modely motorů [3] a regulátorů [4], resp. vyšší úroveň řízení je pak nutno modelovat v systému Matlab/Simulink a použít některou z uvedených simulačních metod. Simulační systém MSC/Adams je přímo předurčen k modelování dalších elektromechanických prvků, jejichž věrné modely bylo možno modelovat pouze matematicky při značných potížích s jejich nelinearitou. Velmi dobře vyřešený kontakt těles a možnost nastavení parametrů kontaktních ploch umožňuje modelování např. elektromagnetických spojek a brzd – opět je model vinutí modelován pomocí Control Blocks a výstupní síla budí mechanickou část modelu brzdy, která přes model nelineárního kontaktu vyvozuje brzdový moment na navazující mechanismus. Systém MSC/Adams je také jediným systémem, který umožňuje pohodlně a věrně modelovat dynamiku pružných těles. Takto lze modelovat další problematické prvky mechanického subsystému, jako jsou pružné hřídele a další. Možnosti vyšetřování interakce mechanického řídicího a pohonného subsystému jsou diskutovány také v článku [5]. Jak už bylo uvedeno v úvodu, mechatronický model lze doplnit modelem hydraulického subsystému a vyšetřovat řadu souvisejících jevů. Touto problematikou se zabývá např. příspěvek [6].

## 6. ZÁVĚR

Konstruktérům a vývojovým pracovníkům se dostává prostřednictvím systému MSC/Adams dosud nebývalý nástroj pro modelování mechatronických systémů a vytváření virtuálních prototypů blízkých reálným zařízením, který umožňuje vyšetřovat interakci mezi jednotlivými subsystémy a optimalizace celého technického systému jako celku. Získané poznatky lze využít nejen v oblasti robotických zařízení, ale i při vývoji nových obráběcích strojů apod. Tento článek prezentuje poznatky získané při řešení grantového projektu MSM272300008, řešeného v rámci výzkumných záměrů MŠMT ČR.

## LITERATURA

[1] Kárník, L.: Use of mobile robots for liquidation and renewal buildings. Sborník vědeckých prací VŠB-Technické univerzity Ostrava, roč. XLVI, řada strojní, č.1/2000, Ostrava, 2000, s. 11-16; ISSN 1210 - 0471

- [2] Vlnka, J., Mihalčák P.: Príspevok k mechatroni-zácii CNC obrábacích strojov. In: sborník pred-nášok Medzinárodného odborného seminára SEKEL 2003, 10.-12. 8. 2003, Račkova dolina, str. 139-148
- [3] Fedor, P., Perduková, D.: A DC Drive Fuzzy model. Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol.2, No.1, Winter-Spring 2003, pp. 11-16; ISSN 1682-0053
- [4] Fedor, P., Perduková, D.: Fuzzy regulátor bez potreby derivácie. Elektrotechnika v praxi, ročník 12, 7-8/2002, s. 54-56; ISSN 0862-9730
- [5] Mostýn, V., Skařupa, J.: Improving mechanical model accuracy for simulation purposes. Journal Mechatronics, Volume 14, Issue 7, September 2004, GB, Oxford: Elsevier Ltd., 2004, s. 777-787; ISSN 0957-4158
- [6] Antoszkiewicz, P., Piechnick, M.: Simulation of a hydraulic variable axial piston double pump of bent axis design with subsystems. Proceedings of the 1st MSC.ADAMS European User Conference, London, November 2002
- [7] Kollár, J.: Process Functional Programming. Proc. 33rd Spring International Conference MOSIS'99 - ISM'99 Information Systems Modelling, Rožnov pod Radhoštěm, Czech Republic, April 27-29, 1999, ACTA MOSIS No. 74, pp. 41-48, ISBN 80-85988-31-3
- [8] Kollár, J., Havlice, Z.: Language systems technology. Academic Press elfa s.r.o, Košice, 2001, monography, ISBN 80-89066-12-7, 190 pp.

## BIOGRAPHY

**Vladimír Mostýn**, born 1955, graduated (MSc.) at the Department of Electrical Machines and Drives, VSB – Technical University of Ostrava in 1979. He worked as a project engineer at the Metallurgical Project Ostrava till 1987 and then he entered back VSB – Technical University of Ostrava as a lecturer at the Department of Robotics. He defended his PhD. in the field of robot control in 1996 and successfully made habilitation as a docent (associate professor) in 2001. In research he deals mainly topics in area of kinematics and dynamics of the mechanisms, simulation of the mechatronic systems, CAD systems and robot control systems.

**Ivo Neborák**, born 1954, graduated (MSc.) at the Department of Electrical Machines and Drives, VSB – Technical University of Ostrava in 1979. He worked as a project engineer at the Ostrava VITKOVICE company till 1984 and then he entered back VSB – Technical University of Ostrava as a lecturer at the Department of Power Electronics and Electrical Drives. He defended his PhD. in the field of electrical drives simulations in 1992 and successfully made habilitation as a docent (associate professor) in 2002. In research he deals mainly topics in area of control systems of the electrical drives, simulation of the controlled AC and DC Drives.