

# HIL simulácia pohonov priemyselného robota

## HIL drive simulation of industrial robot

Róbert Üveges<sup>1</sup>, František Ďurovský<sup>2</sup>

<sup>1</sup>[robert.uveges@tuke.sk](mailto:robert.uveges@tuke.sk), <sup>2</sup>[frantisek.durovsky@tuke.sk](mailto:frantisek.durovsky@tuke.sk)

<sup>1,2</sup>Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, Košice, Slovenská Republika

**Abstrakt**— Príspevok sa zaoberá návrhom a realizáciou hardware-in-the-loop simulátora priemyselného robota so šiestimi stupňami voľnosti. Jednotlivé osi robota sú poháňané priemyselnými meničmi SIEMENS SINAMICS S120 a komunikujú po CAN zbernici s nadradeným riadiacim systémom RT-LAB, ktorý riadi činnosť robota v reálnom čase. Realizáciou vznikol otvorený riadiaci systém, v ktorom, na rozdiel od štandardne dodávaných priemyselných riadiacich systémov robotov, má užívateľ voľný prístup ku všetkým riadiacim signálom, a vie ich modifikovať podľa svojich potrieb. Navrhnutá riadiaca štruktúra robota bola experimentálne overená a výsledky experimentov sú uvedené v príspevku.

**Kľúčové slová**—HIL, otvorený riadiaci systém, robot

**Abstract**—This paper deals with design and realisation of hardware-in-the loop simulator of industrial robot with six degrees of freedom. Each axis is driven by industrial converter kit SIEMENS SINAMICS S120 and communicates by CAN bus with higher level robotic controller based on RT-LAB, which controls a robot motion in real time. Thus, a system with an open robot control was developed, which enables to user free access to any control signal and offers him a possibility to its modification. Proposed control structure was experimentally verified and results are published in the paper.

**Keywords**—HIL, open control system, robot

### I. ÚVOD

Priemyselné robotické systémy sú dodávané s relatívne uzavretým riadiacim systémom, kde užívateľ má možnosť naprogramovať pohyby robota len s využitím funkcií, ktoré pripravil výrobca. Takéto riešenie garantuje bezpečnú a spoľahlivú prevádzku robota, čo je pre nasadenie v priemysle rozhodujúce [1], [2]. Na druhej strane, použitie priemyselného robota pre experimenty v rámci výskumu alebo výučby klasickej robotiky je výrazne obmedzené. Okrem toho, na programovanie robotov ponúkajú výrobcovia rôzne nástroje umožňujúce off-line programovanie a simuláciu pohybov koncového efektora robota. Bohužiaľ, tieto nástroje, podobne ako aj programovacie jazyky pre roboty, sú vhodné len pre produkty daného výrobcu. Ak sa vyžaduje kooperácia robotov a manipulátorov od rôznych výrobcov, zabezpečenie ich kompatibility býva problémom.

Na overovanie vlastných riadiacich algoritmov robota v laboratórnych podmienkach je potrebný otvorený riadiaci systém. Ten musí umožniť jednoduchú zmenu štruktúry riadenia robota, pridávanie ďalších osí, možnosť pripojenia prídavných zariadení a ich včlenenie do riadenia robota, ako aj monitorovanie a prípadnú úpravu signálov v celom riadiacom reťaz-

ci od nadradeného robotického kontroléra až po samotné servopohony.

Výhodou je, ak sa na vývoj riadiacich algoritmov a nadradeného riadenia robota dá použiť programovacie prostredie bežné z výskumnej praxe, napr. Matlab/Simulink. Zároveň je vhodné, ak výkonové meniče, zabezpečujúce napájanie servopohonov v osiach robota, sú spoľahlivé komerčné meniče doplnené o možnosť vstupovať vlastnými signálmi do ich riadiacej štruktúry.

Navrhnutý riadiaci systém je realizovaný na báze produktu RT-LAB od spoločnosti Opal RT [3], ktorý sa programuje v prostredí Matlab/Simulink. Mechanika robota sa použila zo zvracieho robota SEF 25, pričom sa využili jestvujúce servopohony na báze synchronných motorov s permanentnými magnetmi (PMSM) a resolvermi ako snímačmi polohy jednotlivých osí. Pôvodná výkonová časť bola nahradená priemyselnou stavebnicou SIEMENS SINAMICS S120 komunikujúcou s riadiacim systémom prostredníctvom zbernice CAN. Vznikol tak unikátny otvorený hardware-in-the-loop (HIL) systém pre riadenie robota.

O potrebe takýchto systémov svedčí aj fakt, že podobné systémy vznikli aj na iných pracoviskách. V Linzi [4] bola skombinovaná mechanika robota Stäubli RX130L s riadiacim systémom Bernecker & Rainer Automation PC (APC), ktorý cez real-time zbernicu Powerlink riadi meniče ACOPOS. Riadiaci systém umožňuje prepojenie s prostredím Matlab Real Time Workshop, kde sa realizuje samotné riadenie robota. Iný systém vznikol v Liberci [5], kde sa využila stavebnica SINAMICS S120 doplnená o voľne programovateľný motion kontrolér SIMOTION (Siemens). Mechanika robota je od fy KUKA.

Existuje aj niekoľko otvorených riadiacich systémov robotov. Jedným z nich je Robot Operation System (ROS) [9]. Napriek tomu, že ROS pôvodne vznikol v akademickom prostredí, začínajú sa oň zaujímať aj výrobcovia robotov. Vďaka tomu vznikla iniciatíva ROS-Industry (ROS-I). Tu sa výrobcovia robotov podieľajú na tvorbe rozhraní medzi svojimi robotmi a ROS-om. Takéto rozhrania existujú pre roboty firiem ABB, KUKA, Yaskawa, Universal Robots a pod. V súčasnosti sa ROS-u snažia prispôsobiť aj spoločnosti ako sú Mathworks, alebo National Instruments vyvíjajúce softvér pre výskumné a vývojové účely riadiacich systémov. Do svojich produktov integrujú spoluprácu s ROS-om, čím otvárajú nové možnosti rýchleho napredovania vo vývoji algoritmov pre robotické systémy. Keďže ROS ponúka početné kvalitné knižnice otestovaného a odladeného softvéru, ktoré, ktoré už nie je potrebné

opätovane vyvíjať, stačí sa zamerať na vývoj konkrétnej požadovanej aplikácie.

Systém popisovaný v príspevku je určený tak pre výučbu ako aj pre experimentálne práce, preto sa od neho požaduje pohodlná a názorná realizácia odvodených algoritmov, možnosť monitorovania dôležitých signálov v celom riadiacom reťazci a prípadná možnosť spolupráce s inými otvorenými robotickými riadiacimi systémami. Použitý riadiaci systém RT-LAB tieto podmienky spĺňa, a v kombinácii so stavebnicou SINAMICS S120 umožňuje užívateľovi zasahovať až do úroveň momentovej slučky, a to s veľmi krátkymi dobami vzorkovania (<1ms). Takto mohli byť realizované vlastné algoritmy pre priamu a inverznú kinematickú úlohu, ktoré boli vytvárané a po istých úpravách simulované v prostredí MATLAB/Simulink. V príspevku je opísaná elektromechanická a riadiaca časť robota ako aj ukážka dosiahnutých experimentálnych výsledkov.

## II. ELEKTROMECHANICKÁ ČASŤ ROBOTA

Robot typu SEF-ROBOTER SR25 je štandardný zvrácaný robot so šiestimi rotačnými stupňami voľnosti, kde koncový efektor môže niesť bremeno s hmotnosťou do 25 kg. Na pohon jednotlivých kĺbov robota sú použité PMSM typu SIEMENS 1FK6 (viď TABUĽKA 1). Výkonová časť pozostáva z modulárnych frekvenčných meničov SINAMICS S120. Ich typy sú uvedené v TABUĽKA 2. Podrobnejší popis zostavy je uvedený v [6] a [7]. Pracovisko s robotom je na Obr. 1.

TABUĽKA 1 PARAMETRE MOTOROV V POHONCH ROBOTA

Parameter	Os 1, 2	Os 3	Os 4, 5, 6
$P_N$ [kW]	3,3	1,9	0,5
$n_N$ [rpm]	3000	3000	6000
$I_N$ [A]	7,7	4,7	1,75
$J_m$ [ $10^{-3}$ kgm <sup>2</sup> ]	3,03	1,7	0,21

TABUĽKA 2 POUŽITÉ TYPY MENIČOV SINAMICS S120

Os robota	1	2, 3	4, 5	6
Typ meniča	6SL3120-1TE21-0AA3 18A	6SL3120-2TE21-0AA3 9A/9A	6SL3120-2TE13-0AA3 3A/3A	6SL3120-1TE13-0AA3 3A



Obr. 1 Elektromechanická časť robota

## III. RIADIACI SYSTÉM ROBOTA

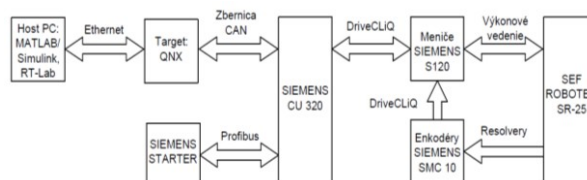
Riadiaci systém robota pozostáva z nasledovných logických celkov:

### A. Nadradená regulácia

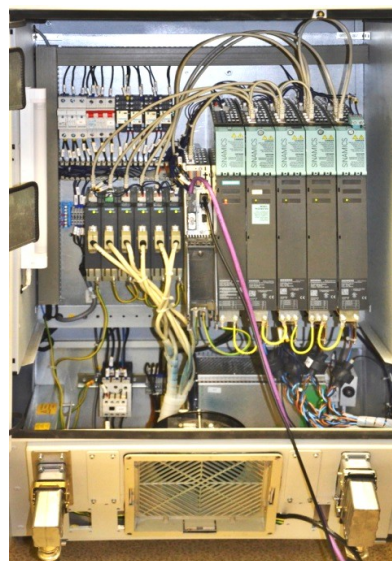
(Robotický kontrolér): real-time systém RT-LAB pracujúci na dvoch počítačoch označených ako Host PC a Target PC. Realizuje reguláciu polohy jednotlivých osí, plánovanie trajektórie, výpočet inverznej kinematickej úlohy a kompenzáciu trecích a dynamických momentov.

### B. Podradená regulácia

Frekvenčné meniče SINAMICS S120 s riadiacou jednotkou CU 320, komunikačnou kartou pre CAN (CBC 10) a rozhraniami pre resolvery (SMC 10). Riadenie zabezpečuje reguláciu otáčok a momentu jednotlivých osí. Vzájomné vzťahy a väzby medzi použitým výkonovým hardvérom a riadiacim softvérom ako aj spôsob prenosu dát medzi jednotlivými blokmi sú znázornené na Obr. 2. Výkonová časť riadenia je na Obr. 3.



Obr. 2 Bloková schéma riadiaceho systému robota



Obr. 3 Modulárne meniče SINAMICS S120

Riadiaci systém RT-LAB bol implementovaný do zostavy Host PC a Target PC. Na Host PC je inštalované prostredie MATLAB/Simulink/RT-Lab. V off-line režime sa tu realizuje návrh riadiaceho algoritmu, ktorý je po kompilácii nahraný do Target PC. V on-line režime zabezpečuje Host PC základné monitorovacie a ovládacie funkcie, ktoré nie sú z časového hľadiska kritické, a slúžia len ako používateľské rozhranie pre operátora. Namerané časové priebehy fyzikálnych veličín robota sa vyhodnocujú off-line.

Target PC pracuje s operačným systémom reálneho času (RTOS) QNX. RTOS má za úlohu spracovávať informácie priebežne, bez časového oneskorenia. Dôsledkom toho sa jednotlivé časovo kritické úlohy vyššieho riadenia uskutočňujú podľa priorit v presne definovaných časových intervaloch. Komunikácia medzi Target PC a Host PC nie je kritická a vykonáva sa po sieťovej linke Ethernet. Táto linka slúži len na

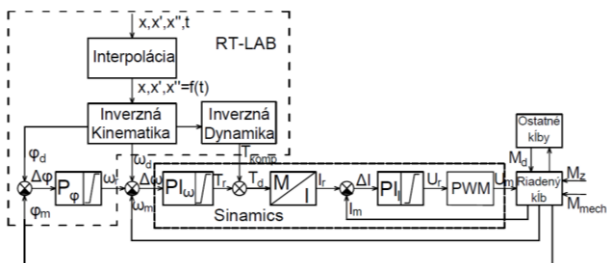
prenos ovládacích príkazov a blokov nameraných dát, ktoré sa neskôr off-line vyhodnocujú v Host PC.

Medzi OS QNX a radiacou jednotkou frekvenčného meniča dochádza k cyklickej výmene paketov posielaných po zbernici CAN. Z radiaceho systému sa odosielajú riadiace slová jednotlivých pohonov, žiadané hodnoty rýchlosti a dynamického momentu. Prijímajú sa stavové slová a informácie o aktuálnej polohe, rýchlosti a momente.

Nastavovanie parametrov meničov prebieha pomocou softvéru Starter z osobitného PC, ktorý je vybavený kartou pre komunikáciu po zbernici Profibus.

#### IV. REGULAČNÁ ŠTRUKTÚRA

Štruktúrna schéma regulácie pohonov robota je znázornená na Obr. 4. Bolo použité klasické kaskádne radenie regulátorov s nadradeným polohovým regulátorom s predkorekciou rýchlosti a momentu. Hodnoty podradených veličín regulačnej štruktúry boli obmedzené. Polohový regulátor spracováva regulačnú odchýlku polohy a jeho výstupom je korekcia rýchlosti, ktorá sa pripočítava k referenčnej hodnote rýchlosti generovanej interpolátorom, a privádza sa na vstup PI regulátora rýchlosti. Polohová regulácia sa vykonáva v nadradenom riadiacom systéme a žiadané rýchlosti sa cyklicky posielajú cez CAN zbernicu do riadiacej jednotky meniča. Rýchlostnú reguláciu jednotlivých pohonov vykonáva riadiaca jednotka meniča. Výstup z regulátora rýchlosti sa sčítava s vypočítaným momentom z dynamického modelu a prepočítavajú sa na želanú momentotvornú zložku prúdu servomotora.

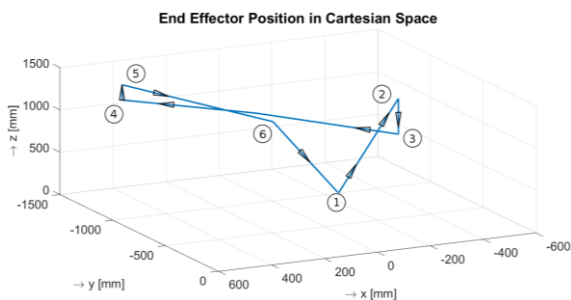


Obr. 4 Štruktúrna schéma regulácie pohonov robota

#### V. EXPERIMENTÁLNE VÝSLEDKY

Správanie sa robota bolo overované pri pohybe koncového efektora po predpísanej trajektórii podľa

Obr. 5. Kvôli vyhladeniu výslednej trajektórie efektora bola použitá interpolácia pomocou polynómu piateho rádu. [8]. Takáto interpolácia zaručí hladký časový priebeh požadovanej polohy a orientácie efektora ako aj jej derivácií.



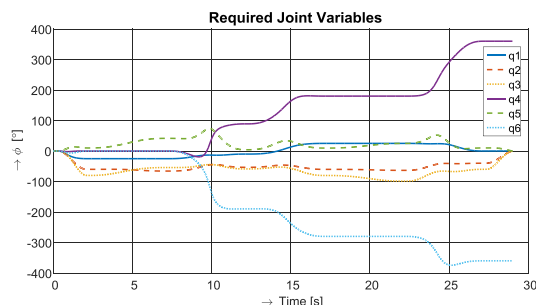
Obr. 5 Pohyb koncového efektora v priestore

Efaktor predchádzal cez body 1 až 7. Takýto pohyb predstavuje manipuláciu, „pick and place“ kde má robot za úlohu premiestňovať predmety po definovaných bodoch trajektórie. Definované body trajektórie sú uvedené v Tab. 3

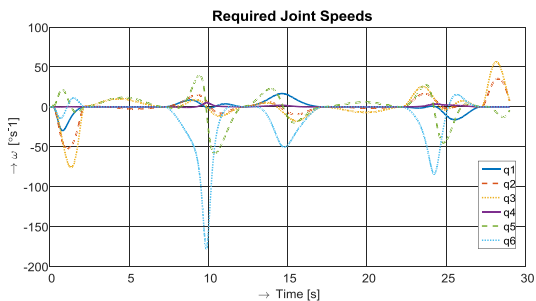
TABUĽKA 3 DEFINOVANÉ BODY TRAJEKTÓRIE EFEKTORA

Bod	t[s]	x[mm]	y[mm]	z[mm]	φ[rad]	θ[rad]	ψ[rad]
1	0	0	-367.5	475.1	1.570	0.436	1.570
2	2	-537	-1146	921	1.570	-0.087	-2.007
3	7	-537	-1146	500	1.654	-0.016	2.807
4	17	520	-1115	1320	-1.664	-0.017	0.264
5	22	520	-1115	1500	-1.570	-0.087	1.134
6	27	0	-988	945	1.570	-0.087	-1.570
7	29	0	-367.5	475.1	1.570	0.436	1.570

Interpolované časové priebehy želanej polohy a rýchlosti jednotlivých kĺbov robota potrebných pre vykonanie predpísaného pohybu sú znázornené na Obr. 6 a Obr. 7.

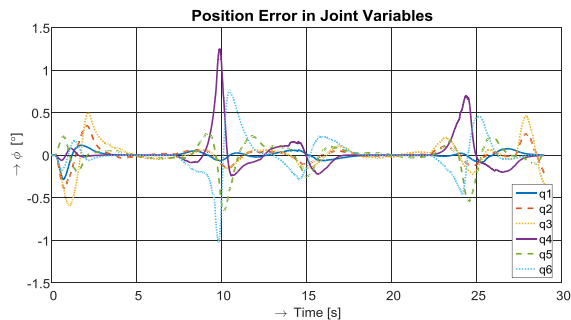


Obr. 6 Požadované kĺbové premenné



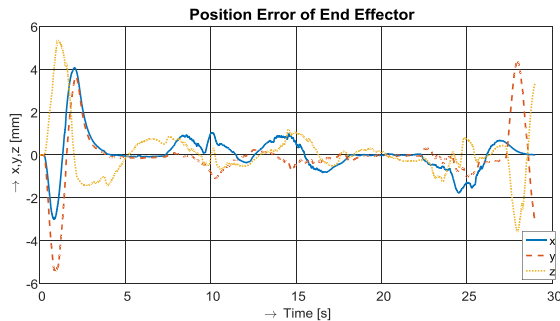
Obr. 7 Požadované rýchlosti kĺbov

Presnosť riadenia jednotlivých pohonov je dokumentovaná na Obr.8, ktorý ukazuje rozdiel medzi želanou a skutočnou hodnotou uhlov v jednotlivých kĺboch. Z nameraných hodnôt môžeme konštatovať, že pri požiadavke na dynamický pohyb koncového efektora vznikajú regulačné odchýlky polohovania, ktoré sú spôsobené nepresnosťou a zjednodušením dynamického modelu manipulátora.

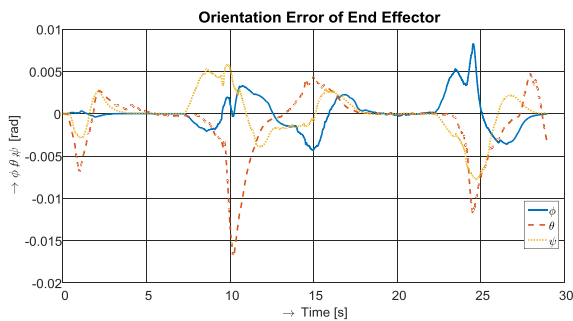


Obr. 8 Regulačná odchýlka polohy kĺbov

Takáto regulačná odchýlka sa v krátkom čase kompenzuje pôsobením integračnej zložky regulátora rýchlosti a v definovaných bodoch trajektórie, kde je potrebné presné polohovanie, je regulačná odchýlka blízka nule. Z priamej kinematickej úlohy vyplýva, že regulačná odchýlka v systéme kĺbových súradníc sa prejaví aj na polohe a orientácii koncového efektora. Takáto nepresnosť polohovania je relatívna a je nelineárne závislá od hodnoty kĺbových súradníc. Príkladom môže byť malá regulačná odchýlka v kĺbových súradniciach v čase približne 2 s, ktorá sa prejaví ako veľká regulačná odchýlka na polohe efektora. V čase približne 10 s však nastáva opačná situácia. Regulačná odchýlka polohy a orientácie efektora je zobrazená na Obr. 9 a Obr. 10.



Obr. 9 Regulačná odchýlka polohy efektora



Obr. 10 Regulačná odchýlka orientácie efektora

## VI. ZÁVER

Na overovanie riadiacich algoritmov robota bol zostavený riadiaci systém pracujúci v reálnom čase s dobou vzorkovania 0,5 ms, ktorý v laboratórnych podmienkach dával sľubné výsledky. Popísaný systém predstavuje otvorený systém, kde užívateľ má voľný prístup k riadiacim signálom, počnúc od robotického kontroléra až po riadiacu slučku samotného pohonu, a môže ich upravovať podľa svojich potrieb. Takýto prístup je veľmi vhodný nielen pre výskum a pre výučbu študentov, ale aj pre aplikácie v komerčných robotických systémoch.

Ďalšia výhoda predkladaného riešenia spočíva v návrhu úplne novej konfigurácie riadiaceho systému za prijateľnú cenu. Vďaka použitiu programov MATLAB/Simulink/RT-Lab

toto riešenie umožňuje ľahký vývoj a rýchle overenie navrhovaných riadiacich algoritmov na úrovni robota. Systém nie je obmedzený počtom osí a robot s uvedeným riadiacim systémom sa ľahko prispôsobuje potrebám akéhokoľvek robotického pracoviska.

## POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0750.

## POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] [www.kuka-robotics.com](http://www.kuka-robotics.com)
- [2] [www.abb.com](http://www.abb.com)
- [3] <http://www.opal-rt.com/product/rt-lab-professional-real-time-digital-simulation-software> (dostupné 28. 12. 2015)
- [4] <http://www.robotik.jku.at/joomla16/index.php/forschung/research-projects/industrial-robot> (dostupné 28. 12. 2015)
- [5] Lindr, D.; Záda, V., "Open Control System for Industrial Robot". In Transfer of Innovation to the Interdisciplinary Teaching of Mechatronics for the Advanced Technology Needs. Opole, Poland: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2009. s. 195-207. ISBN 978-83-60691-56-4.
- [6] Ďurovský, F. jr.: *Riadenie priemyselného robota*, Diplomová práca, Katedra elektrotechniky a mechatroniky, FEI TU v Košiciach, 2012.
- [7] Fedák, V.; Ďurovský, F.; Úveges, R.: Analysis of Robotic System Motion in SimMechanics and MATLAB GUI Environment. *MATLAB Applications for the Practical Engineer*, InTech, Rijeka, 2014, pp. 566-581.
- [8] Fedák, V.; Ďurovský, F.; Úveges, R.; Kyslan, K.: HIL Simulator of Drives of an Industrial Robot with 6 DOF. The 19th International conference, Electronics 2015, Palanga, Lithuania, 15-17 June 2015, <http://electronics.ktu.lt/>.
- [9] <http://www.ros.org/> (dostupné 20. 5. 2017)

**Róbert Úveges** narodený 19.2.1991. V roku 2015 získal inžiniersky titul na Katedre elektrotechniky a mechatroniky na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Je študentom druhého ročníka doktorandského štúdia a jeho výskumná činnosť sa zameriava na priemyselnú a servisnú robotiku.

**František Ďurovský** získal inžiniersky a doktorský titul na Technickej univerzite v Košiciach v rokoch 1983 a 1993 v tomto poradí. V súčasnosti je docentom na Katedre elektrotechniky a mechatroniky TU Košice. Jeho oblasti záujmu výskumu sú riadenie pohybu, elektrické pohony v priemyselných a automobilových aplikáciách, riadenie a simulácia mechatronických systémov.