

# Koncepcia hardware-in-the-loop pracovisko na báze PLC pre verifikáciu riadenia DC motora

## Conception of hardware-in-the-loop workplace for verification control of DC motor

Peter Talian<sup>1</sup>, Daniela Perduková<sup>2</sup>, Pavol Fedor<sup>3</sup>

<sup>1</sup>[peter.talian@tuke.sk](mailto:peter.talian@tuke.sk), <sup>2</sup>[daniela.perdukova@tuke.sk](mailto:daniela.perdukova@tuke.sk), <sup>3</sup>[pavol.fedor@tuke.sk](mailto:pavol.fedor@tuke.sk)

<sup>1,2,3</sup>Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, Košice, Slovenská Republika

**Abstrakt**—V tomto príspevku je popísané univerzálne hardware-in-the-loop pracovisko (HIL), ktoré je určené ako nástroj pre vzdelávanie a výskum v oblasti modelovania a riadenia dynamických a kontrolných systémov. Koncepcia vytvoreného pracoviska je postavená na bežne dostupných a používaných hardwarových (Programmable Logic Controller) a softwarových prostriedkoch (MATLAB) konfigurovaných tak, aby bolo možné pracovať s prakticky akýmkoľvek typom spojitým aj diskretným dynamickým systémom. Takisto podľa potreby je možné ďalej rozšíriť technické prostriedky pracoviska aj na prácu s rozsiahlejšími MIMO systémami z reálnej technologickej praxe. Toto pracovisko je predovšetkým určené pre riešenie úloh súvisiacich s elektrickými pohonmi, mechatronikou, robotikou a riadením technologických zariadení. Prípadová štúdia zahŕňajúca riadenie motorového pohonu DC je zahrnutá v tomto príspevku.

**Kľúčové slová**— *hardware-in-the-loop (HIL), programovateľný automat (PA), DC motor*

**Abstract**— This paper focuses on developing a universal Hardware-in-the-Loop simulation workplace which is used in education and research in the field of technological dynamic systems modelling and control. The workplace concept is based on generally available and employed hardware (Programmable Logic Controller) and software means (MATLAB), configured to enable work on practically any type of both continuous and discrete system. The workplace is mainly being used for solving tasks related to electric drives, mechatronics, robotics and technological plant control. A case study involving a DC motor drive control is included in the paper.

**Keywords**— *hardware-in-the-loop (HIL), programmable logic controller (PLC), DC motor*

### I. ÚVOD

Vzhľadom k svojej zložitosti mnohé úlohy vzdelávania a výskumu v oblasti priemyselných technických systémov si vyžadujú vzhľadom na svoju náročnosť laboratória, vybavené zariadeniami a fyzikálnymi modelmi, ktoré umožňujú verifikovanie experimentov rôzneho druhu a rôznej náročnosti.

Takéto zariadenia sú neraz vzhľadom na svoju špecifickosť, technicky aj finančne náročné a využiteľné len pre riešenie úzkej kategórie problémov. Preto je adekvátne mať pre účely vzdelávania a výskumu zariadenia, ktoré sú univerzálne použiteľné pre široké spektrum úloh a zároveň výsledky, ktoré je možné pomocou nich dosiahnuť, sú s vysokou pravdepodob-

nosťou aplikovateľné v samotnej technickej praxi [1]. Príkladom takýchto prostriedkov sú hardware-in-the-loop (HIL) simulácie, ktoré sa líšia od počítačových simulácií tým, že sa jedná o skutočný hardvér a neexistujú softvérové obmedzenia na úrovni systému.

Hardware-in-the-loop simulácie sú úspešne implementované ako elementárne prostriedky pre rozvoj a testovanie v širokom rozsahu priemyselnej automatizácie, kde umožňujú testovať spoľahlivosť pohonov (stroj, napájanie, elektronika, riadenie) pred ich samotným nasadením v technickej praxi [2]. Hardware-in-the-loop (HIL) simulácie boli takisto úspešne aplikované ako nevyhnutné prostriedky na rozvoj systému a testovanie v širokom rozsahu v ďalších priemyselných oblastiach ako je napríklad letecký priemysel [3], automobilový priemysel [4], robotika [5], námorníctvo a obrana [6].

Tieto metódy HIL možno rozlíšiť na báze použitého výpočtového hardwaru. Existujú dva hlavné typy hardvéru, ktoré sa v súčasnosti používajú pri HIL simuláciách: multi-core CPU a FPGA, a len zopár konceptov sú postavené na báze PLC zariadeniach [7] - [15]. Vo všeobecnosti dispozícia samotného návrhu a automatické testovanie reálnych procesov s HIL skraca je vývojový cyklus, zvyšuje efektívnosť, zvyšuje spoľahlivosť, bezpečnosť, kvalitu a pomáha predchádzať nákladným a nebezpečným nedostatkom týchto systémov pre veľké množstvo aplikácií.

Navrhnutá koncepcia hardware-in-the-loop (HIL) simulácie pracoviska, ktoré slúži ako efektívny nástroj pre vzdelávanie a výskumných úloh týkajúcich sa modelovania a riadenia technologických dynamických systémov je navrhnutá a prediskutovaná v tomto článku. Koncepcia spomínaného pracoviska je založená na všeobecne dostupných a používaných hardwarových (Programmable Logic Controller) a softwarových prostriedkoch (MATLAB), konfigurovaných tak, aby umožňovali prácu na prakticky akomkoľvek type spojitých alebo diskretných systémoch. Okrem toho samotný koncept, hardwaru, ktorý je postavený na báze PLC a umožňuje štandardizovaný diaľkový prístup cez internet pomocou príslušných nástrojov používaných v operačnom systéme Windows.

Prípadová štúdia zahŕňajúca DC pohon obsiahnutá v tomto dokumente tiež ukazuje jednoduchosť a účinnosť HIL simulácie pracoviska.

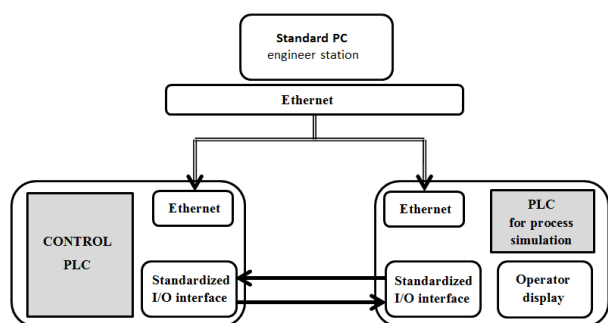
## II. NÁVRH KONCEPCIE HIL PRACOVISKA

### A. Základné požiadavky na pracovisko

Základné požiadavky, kladené na HIL pracovisko, na základe ktorých bola zostavená jeho koncepcia sú:

1. Pracovisko musí pokrývať čo najširšiu triedu dynamických systémov.
2. Z hľadiska modelovaného systému musí mať standardizované vstupy a výstupy, t.j. +/- 10V, 4-20mA, 24V DC, 230V AC, PWM výstupy, rýchle impulzné vstupy pre inkrementálne snímače a pod.
3. Údržba pracoviska musí byť čo najjednoduchšia a rýchla, pretože počas vzdelávacieho procesu nie je možné čakať niekoľko týždňov na jeho opravu.
4. Pre riešenie úloh na pracovisku by sa mali používať podľa možnosti standardizované, všeobecne známe a používané programovacie prostriedky.

Na základe týchto predpokladov bola navrhnutá koncepcia pracoviska podľa obr.1.



Obr.1 Základná koncepcia HIL simulačného pracoviska

Pracovisko sa skladá z dvoch štandardných PLC a jedného štandardného PC. Komunikácia medzi týmito zariadeniami prebieha pomocou štandardizovaného komunikačného rozhrania Ethernet.

### B. Modelové PLC

Prvé PLC, vybavené operátorským displejom, slúži pre modelovanie riadeného technologického procesu (napr. elektrického pohonu, robota, kontinuálnej linky, kvadrokoptéra a pod.). Operátorský displej umožňuje nezávisle animovať a parametrizovať model procesu a tiež externe modelovať rôzne prevádzkové situácie, napr. zmenu záťažného momentu pohonu, zmenu hmotnosti závažia v čípadle robota a pod.

### C. Riadiace PLC

Druhé PLC slúži ako riadiaci člen systému a umožňuje skúšať rôzne možnosti regulátorov. Prepojenie riadiacich a informačných signálov medzi regulátorom a modelom procesu je realizované pomocou štandardizovaných elektrických signálov, čo umožňuje prakticky okamžité a bezproblémové prepojenie navrhnutých riadiacich členov na reálny technologický proces. Pri realizácii pracoviska boli v našom prípade použité programovateľné automaty od spoločnosti B@R.

### D. Inžinierska stanica

Štandardný počítač PC s operačným systémom Windows umožňuje programovať ako riadiace PLC, tak aj PLC pre simuláciu technologického procesu. Za týmto účelom je

na ňom potrebné nainštalovať programový balík od výrobcu použitých PLC a prípadne softvér pre modelovanie dynamických systémov, ktorý umožní porovnať výsledky analytického modelovania riešenej úlohy s výsledkami, dosiahnutými na navrhnutom HIL pracovisku.

Pretože v tomto prípade boli použité PLC od firmy B@R, pre ich programovanie bol nainštalovaný na PC programový balík B@R Automation Studio 4.2. Ako prostriedok pre modelovanie bol nainštalovaný balík MATLAB aj s príslušnými nástrojmi.

### E. Parametre navrhutej koncepcie HIL pracoviska

Podľa vyššie popísanej koncepcie bolo realizované HIL pracovisko s nasledujúcimi konkrétnymi parametrami:

1. Štandardné PC i3-2120 CPU 3,3GHz, 4GB RAM s OS Windows 7 Professional. Na tomto PC bol nainštalovaný MATLAB verzia R2012a s B&R Automation Studio s toolboxom pre priamy prenos blokových schém z MATLABu do PLC od firmy B@R. Pre programovanie PLC bol nainštalovaný programový balík B@R Automation Studio verzia 4.2.
2. Pre PLC pre simuláciu technologického procesu od firmy B@R typu PP500 s operátorským displejom 5PP520 1214-00 TFT SVGA 12,1". Toto PLC umožňuje dosiahnuť dobu vzorkovania až 1ms pre jednoduchšie modely procesov.
3. PLC pre riadenie technologického procesu firmy B@R typu X20 CP 1484-1.

## III. HIL SIMULÁCIA DC MOTORA

Ako príklad použitia HIL pracoviska pre vzdelávacie účely je tu uvedený elektrický pohon s jednosmerným motorom a simulácia jeho riadenia.

Diskrétné dynamické rovnice DC pohonu sú:

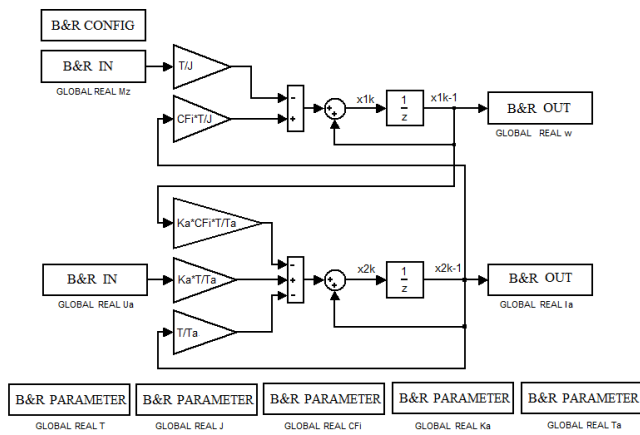
$$x_{1k} = x_{1k-1} + \frac{c\phi T}{J} x_{2k-1} - \frac{T}{J} M_z \quad (1)$$

$$x_{2k} = x_{2k-1} + \frac{K_a c\phi T}{T_a} x_{1k-1} - \frac{T}{T_a} x_{2k-1} - \frac{K_a T}{T_a} U \quad (2)$$

kde:  $c\phi$  – konštanta motora,  $J$  – moment zotrvačnosti,  $K_a$  – zosilnenie kotvy motora,  $T_a$  – časová konštanta kotvy motora,  $M_z$  – záťažný moment,  $U$  – vstup systému,  $T$  – perióda vzorkovania,  $x_1$  – stavová veličina (uhlová rýchlosť),  $x_2$  – stavová veličina (prúd kotvy motora).

### A. Dynamický model systému

Na ich základe bola vytvorená bloková schéma jednosmerného motora v prostredí MATLAB/Simulink, ktorá môže byť priamo prevedená do PLC pomocou Automation Studio Toolbox od spoločnosti B&R nainštalovaného v Simulinku (obr. 2). Týmto spôsobom, je možné každý dynamický model systému vytvorený v Simulinku implementovať do príslušného PLC bez podrobnej znalosti programovacieho prostredia PLC.



Obr. 2 Bloková schéma DC pohonu v diskretnom tvare pred implementáciou do modelového PLC

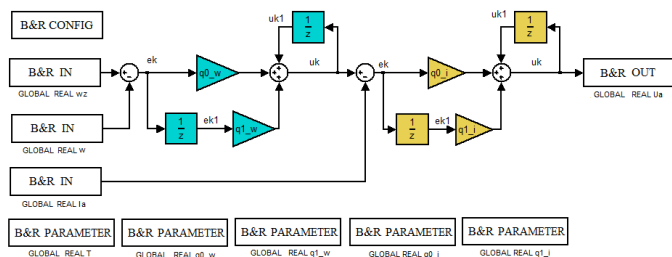
**B. Riadiaca časť**

Pre prúdovú a rýchlostnú reguláciu jednosmerného motora volíme diskretný regulátor PI popísaný podľa nasledujúcej rovnice:

$$u_k = u_{k-1} + q_0 e_k + q_1 e_{k-1} \quad (3)$$

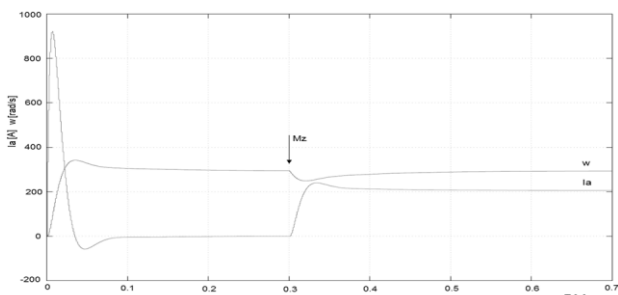
kde:  $u_k, u_{k-1}$  sú hodnoty výstupu regulátora v príslušných krokoch vzorkovania,  $e_k, e_{k-1}$  sú hodnoty regulačnej odchýlky (vstupu regulátora) a  $q_0, q_1$  sú jeho parametre.

Jeho štruktúra je uvedená na obr.3 a takýto regulátor je realizovaný v PLC pre riadenie ako pre prúdovú, tak aj pre rýchlostnú reguláciu pohonu.

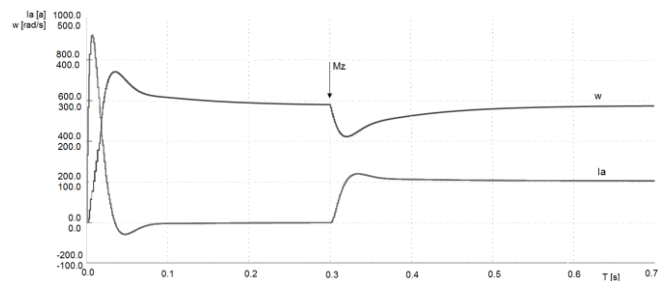


Obr. 3 Bloková schéma rýchlostnej a prúdovej regulácie DC motora pomocou PI regulátorov.

Následné overenie správnosti riešenia porovnaním odoziev pohonu simulácie z MATLABU/Simulink (obr.4) zodpovedá odozve, ktoré sú získané z HIL pracoviska (obr. 5).



Obr. 4 Grafický priebeh regulácie rýchlosti a prúdu DC motora na požadovanú rýchlosť ( $w_z=270 \text{ rad.s}^{-1}$ ) a záťažnom momente ( $M_z=140 \text{ Nm}$ ) z MATLABu



Obr. 5 Grafický priebeh regulácie rýchlosti a prúdu DC motora na požadovanú rýchlosť ( $w_z=270 \text{ rad.s}^{-1}$ ) a záťažnom momente ( $M_z=140 \text{ Nm}$ ) z HIL pracoviska

Ako ukazuje porovnanie obr.4 a obr.5, dynamika regulácie DC pohonu je v oboch prípadoch prakticky rovnaká a teda riadiace PLC je možné priamo prepojiť s fyzickým DC pohonom.

**IV. ZÁVER**

Príspevok popisuje koncepciu a realizáciu univerzálneho HIL simuláčného pracoviska slúžiaceho pre vzdelávacie a výskumné účely v oblasti modelovania a riadenia dynamických technologických systémov. Tento koncept bol založený na požiadavke čo najširšom a všestrannom využití pracoviska, a požiadavke použitia štandardizovaných, všeobecne dostupných zariadení na jeho implementáciu. Celý proces riešenia tejto úlohy HIL pracoviska na báze PLC je popísaný v tomto príspevku na príklade riadenie pohonu s jednosmerným motorom.

**PRÍLOHA**

DC motor:  $n_n=2800 \text{ ot.min}^{-1}$ ,  $P_n=2,3 \text{ kW}$ ,  $M_n=146 \text{ Nm}$ ,  $I_n=12,3 \text{ A}$ ,  $J=0,0315 \text{ kgm}^2$ ,  $U_{aN}=220 \text{ V}$ ,  $R_a=1,6 \text{ } \Omega$ ,  $L_a=8,8 \text{ mH}$ ,  $c\phi=0,7 \text{ Vs}$ ,  $K_a=0,625 \text{ } \Omega^{-1}$ ,  $T_a=0,0055 \text{ s}$ ,  $M_z=40 \text{ Nm}$   
 Parametre diskretných PI regulátorov boli počítané podľa kritérií KOM pre prúdovú slučku a KSO pre rýchlostnú slučku:

Prúdová slučka:  $q0I=2, q1I=1,8$ . Rýchlostná slučka:  $q0w=5, q1w=4,95$

**POUŽITÁ LITERATÚRA**

- [1] S. Grubic, B. Amlang, W. Schumacher, A. Wenzel, "A High-Performance electronic Hardware-in-the-Loop Drive-Load Simulation Using a Linear Inverter" In: *IEEE Trans. Industrial Electronic*, vol.57
- [2] A. Martin, M. Reza Emami, "An Architecture for Robotic Hardware-in-the-Loop Simulation" *IEEE international conference on Mechatronics and Automation* June 25 - 28, 2006, Luoyang, China.
- [3] J. Leitner, "Space Technology Transition Using Hardware in the Loop Simulation," in *Proceedings of the 1996 Aerospace Applications Conference*, Vol. 2, February 1996, pp. 303-311.
- [4] H. Hanselman, "Hardware-in-the-loop Simulation Testing and its Integration into a CACSD Toolset," *IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design*, September 1996, pp. 15-18.
- [5] Ramaswamy, W. Stuart, R. McGee, et al., "A case study in hardware-in-the-loop testing: development of an Ecu for a hybrid electrical vehicle", in *Proc. SAE 2004 World Congress and Exhibition*, Detroit, MI, USA, Technical paper 2004-01-0303, March, 2004.
- [6] R. Isermann, "Mechatronic systems: concepts and applications", Trans. Institute of Measurement and Control, vol. 22, no. 1, pp.29-55, 2000.
- [7] M. Linjama, T. Virvalo, J. Gustafsson, et al., "Hardware-in-the-loop environment for servosystem controller design, tuning and testing", *Microproc. and Microsys.*, vol. 24, no. 1, Mar 29, 2000, pp. 13-21
- [8] R. Siegard, C. Wannaz, P. Garciaand, R. Blank, "Guiding mobile robots through the web", in *Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS): Workshop on WebRobots*, 1998.
- [9] R. Simmons Xavier, "An autonomous mobile robot on the web", in *Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS):Workshop on Web Robots*, 1998.

- [10] D. J. Rankin, J. Jiang, "A Hardware-in-the-Loop Simulation Platform for the Verification and Validation of Safety Control Systems. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 58, No. 2, April 2011, 468-478
- [11] M. Iacob, G. D. Andreescu, "Real-Time Hardware-in-the-Loop Test Platform for Thermal Power Plant Control Systems", in *IEEE 9th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics - SISI 2011*, September 8-10, 2011, Subotica, Serbia, pp. 495-500
- [12] J. Machado, E. Seabra, "HiL simulation workbench for testing and validating PLC programs", in *Proc. 11th IEEE International Conference*
- [13] Talian, P.: Hardware-in-the-Loop method for electric drives. In: *Scientific Conference of Young Researchers 2015*, Herľany. pp. 58-61. ISBN 978-80-553-2130-1
- [14] Talian, P., Sivý, R., Oros, M.: Hardware-in-the-loop simulácia modelu jednosmerného motora. In: *Electrical Engineering and Informatics 6 : proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice*. - Košice : FEI TU, 2015 S. 71-74. - ISBN 78-80-553-2178-3
- [15] Y. Zhu, H. Hu, G. Xu, and Z. Zhao: "Hardware-in-the-loop simulation of pure electric vehicle control system," in *Proc. Int. Asia Conf. Informatics in Control, Automation, and Robotics*, Bangkok, Thailand, Feb. 2009, pp. 254–258.
- [16] M. MacDiarmid, M. Bacic, and R. Daniel: "Extension and application of a novel hardware-in-the-loop simulator design methodology," In: *Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, Cancun, Mexico, Dec. 2008, pp. 5054–5061.
- [17] X. Wu, S. Lentijo, A. Deshmuk, A. Monti, and F. Ponci: "Design and implementation of a power-hardware-in-the-loop interface: A nonlinear load case study," In: *Proc. 20th Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Mar. 2005, Vol. 2, pp. 1332–1338.
- [18] J. Poon, P. Haessig, J.G. Hwang, I. Celanovic: "High-speed hardware-in-the loop platform for rapid prototyping of power electronics systems", *IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES)*, September 2010, pp. 420-424.
- [19] S. Abourida, C. Dufour, J. Belanger, G. Murere, N. Lechevin: "Real-time PC-based simulator of electric systems and drives", In: *IEEE 17th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (AEPC)*, Vol. 1, pp. 433-438, 2002.
- [20] S. Palla, A. K. Srivastava, and N. N. Schultz, "Hardware in the loop test for relay model validation," In: *Proc. IEEE ESTS*, May 2007, pp. 449–454.
- [21] M. Olejár: „Programovanie PLC“, Technická fakulta, Katedra elektrotechniky, automatizácia a informatiky, Nitra, 2015, ISBN: 978-80-552-1397-2.
- [22] E. Monmasson and M. Cirstea, "FPGA design methodology for industrial control systems—A review," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, Aug. 2008, pp. 1824–1842.
- [23] H. K. Fathy, Z. S. Filipi: „Review of Hardware-in-the-Loop Simulation and Its Prospects
- [24] In the Automotive Area, In: *Modeling and Simulation for Military Application*, Proc. of SPIE Vol. 622, 2006.
- [25] M. Olejár, V. Cviklovič, B. Brachtýr, J. Jablonický: „Riadenie pohonov prostredníctvom PLC“, Technická fakulta, Katedra elektrotechniky, automatizácia a informatiky, Nitra, 2015, ISBN: 978-80-552-1397-2.



### Ing. Peter TALIAN

Študoval na Technickej univerzite v Košiciach, kde získal titul inžinier v študijnom programe elektrotechnické inžinierstvo v roku 2014. V súčasnosti študent druhého ročníka PhD. štúdia v študijnom programe elektrotechnické systémy.

Vo svojej práci sa venuje problematike metód hardware-in-the-loop v oblasti

elektrických pohonov a mechatroniky.

V roku 2015 sa zúčastnil vedeckej konferencie SCYR 2015, kde sa umiestnil na prvom mieste v sekcii EEE- Electrical and Electronics Engineering v kategórii 1.ročník 15. študentskej konferencie Scientific Conference of Young Researchers 2015.