

Nová koncepcia HIL pracoviska pre verifikáciu dynamických systémov

New concept of HIL workplace for dynamic systems verification

Pavol Fedor¹, Daniela Perduková²

¹pavol.fedor@tuke.sk, ²daniela.perdukova@tuke.sk

^{1,2} Technická univerzita v Košiciach, FEI/Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Košice, Slovensko

Abstrakt — Článok sa zaoberá návrhom univerzálneho Hardware in the Loop (HIL) pracoviska pre verifikáciu spojitých alebo diskretných dynamických systémov. Celá koncepcia je založená na požiadavke čo najširšej univerzálnosti pracoviska a na požiadavke využívania štandardných zariadení. Aby boli splnené uvedené požiadavky, obidva podsystemy HIL pracoviska (testovací a simulačný) boli postavené na báze programovateľných logických automatov - PLC. Navrhnuté pracovisko môže byť využívané hlavne pre riešenie úloh z oblasti elektrických pohonov, mechatroniky, robotiky a riadenia technologických systémov.

KLúčové slová — Hardware in the Loop, programovateľný logický automat, dynamický systém

Abstract — The article deals with design of universal Hardware in the Loop workplace (HIL) for verification of continuous or discrete dynamical systems. The whole concept is based on the requirements of the widest workplace universality and the requirement to use standardized devices. In order to meet these requirements, both subsystems of the HIL workplace (testing and simulation) were built on basis of Programmable Logic Controller-PLC. The proposed workplace can be mainly used for solving tasks related to electric drives, mechatronics, robotics and technological systems control.

Keywords — Hardware in the Loop, Programmable Logic Controller, dynamic system

I. ÚVOD

Verifikácia riešenia výskumných úloh rôzneho druhu a náročnosti z oblasti priemyselných systémov si často vyžaduje vzhľadom na svoju náročnosť laboratória vybavené príslušnými zariadeniami alebo konkrétnymi fyzikálnymi modelmi týchto systémov. Takéto zariadenia sú často vzhľadom na svoju špecifickosť technicky aj finančne náročné a využiteľné len pre riešenie úzkej triedy problémov. Preto je vhodné mať pre účely výskumu, ale aj vzdelávania, zariadenia, ktoré sú univerzálne použiteľné pre široké spektrum úloh, pričom výsledky, ktoré je možné pomocou nich získať, je možné s vysokou pravdepodobnosťou aplikovať aj v technickej praxi. Príkladom takýchto zariadení sú nástroje pre HIL (hardware-in-the-loop) simulácie, ktoré sa líšia od počítačových simulácií, pretože ich podstatnou súčasťou sú hardvérové časti skúmaného systému, ktorého vlastnosti sú verifikované. To umožňuje realistickejšie

zhodnotenie vlastností overovaného systému predovšetkým v reálnom čase aj vďaka najnovším počítačovým technológiám [1-3].

V článku je navrhnutá nová koncepcia hardware-in-the-loop (HIL) pracoviska, ktoré slúži ako efektívny nástroj pre riešenie úloh vzdelávania a výskumu v oblasti modelovania a riadenia technických dynamických systémov. Koncepcia pracoviska je postavená na bežne dostupných a používaných hardvérových (Programmable Logic Controller) a softvérových prostriedkoch (MATLAB) tak, aby bolo možné pracovať s každým typom spojitých aj diskretných dynamických systémov. Ďalej táto koncepcia umožňuje štandardizovaný vzdialený prístup (Remote acces) cez internet prostriedkami používanými v operačnom systéme Windows.

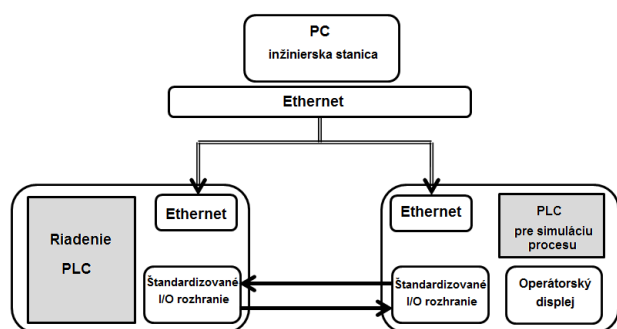
II. KONCEPCIA HIL PRACOVISKA

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

1. Pracovisko musí pokrývať čo najširšiu triedu dynamických systémov.
2. Z hľadiska modelovaného systému musí mať štandardizované 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 štandardizované, všeobecne známe a používané programovacie prostriedky.

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

Pracovisko sa skladá z dvoch štandardných programovateľných automatov a jedného štandardného PC počítača. Komunikácia medzi týmito zariadeniami je cez štandardizované Ethernet rozhranie. Prvé PLC, vybavené operátorským displejom, slúži pre modelovanie riadeného technologického procesu (napr. elektrického pohonu, robota a pod.). Operátorský displej umožňuje parametrizovať model procesu a tiež externe modelovať rôzne prevádzkové situácie, napr. zmenu záťažného momentu pohonu a pod.

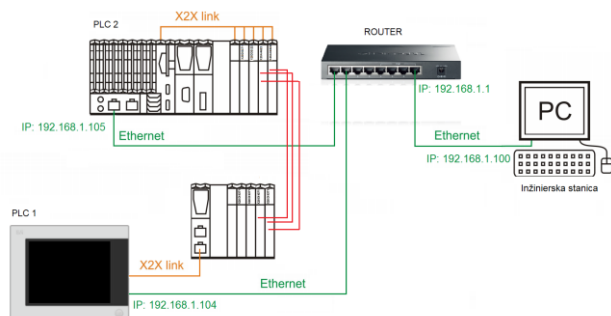


Obr. 1. Základná koncepcia HIL pracoviska

Druhé PLC slúži ako riadiaci člen systému a umožňuje skúšať rôzne varianty 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 firmy B@R.

Štandardný PC počítač s operačným systémom Windows umožňuje programovať riadiace PLC, a tiež 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 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.

Podľa vyššie popísanej koncepcie bolo realizované HIL pracovisko podľa obr.2.



Obr. 2. Zapojenie konkrétneho HIL pracoviska

Realizácia uvedeného HIL pracoviska je ukázaná na obr.3 a jeho konkrétne parametre sú nasledujúce:

- 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 Toolboxom pre priamy prenos blokových schém z Matlabu do PLC od firmy B@R. Pre programovanie PLCs bol nainštalovaný programový balík B@R Automation Studio verzia 4.2.
- PLC pre simuláciu technologického procesu od firmy B@R typu PP500 s operátorským displejom 5PP520 1214-00 TFT SVGA 12,1" a PowerLink modulom

X20BC0083, analógovými modulmi X20AI4622 a X20AO4622, digitálnymi modulmi X20DI8371 a X20DO8322 pre vstupy a výstupy do a z PLC. Toto PLC umožňuje dosiahnuť dobu vzorkovania až 1ms pre jednoduchšie modely procesov.

- PLC pre riadenie technologického procesu firmy B@R typu X20 CP 1484-1 a analógovými modulmi X20AI4622 a X20AO4622, digitálnymi modulmi X20DI8371 a X20DO8322 pre vstupy a výstupy do a z PLC.



Obr. 3. Realizácia HIL pracoviska

III. VLASTNOSTI NAVRHNUTÉHO HIL PRACOVISKA

Navrhnutá a overená koncepcia HIL pracoviska má nasledujúce základné vlastnosti:

- Navrhnuté pracovisko je zostavené iba zo štandardných, priemyselne vyrábaných a dodávaných zariadení a programových produktov. Ako Matlab, tak aj priemyselné PLC umožňujú v princípe pracovať (t.j. modelovať a programovať) prakticky ľubovoľný dynamický systém. Veľkosť tohto systému je teoreticky neobmedzená (v zmysle neobmedzená použitou koncepciou) a prakticky bude obmedzená iba výkonovou kapacitou použitých PLC a štandardného PC. Pre prácu s rozsiahlejšími MIMO systémami bude potrebné použiť výkonnejšie PLC a prípadne aj PC.
- Priemyselné PLC majú implicitne zabudované priemyselne štandardizované vstupy a výstupy, pričom umožňujú v zásade modulárne meniť ich počty a typy, čo zaručuje vysokú variabilitu úloh, ktoré je potrebné riešiť a prípadne vyučovať na takomto pracovisku. Výmena riešenej úlohy je vlastne len otázkou zmeny

príslušného programu v PLC a prípadne nového prepojenia štandardizovaného IO rozhrania, čo napr. pri vzdelávacích úlohách (u ktorých sa nepredpokladá veľké množstvo IO) zaberie minimálne množstvo času.

- Vzhľadom na priemyselnú výrobu jednotlivých podsystémov navrhnutého pracoviska je možné predpokladať, že si bude vyžadovať minimálnu hardvérovú údržbu. Prípadné poruchy hardvéru je možné riešiť jednoduchou výmenou pokazených súčastí, napr. vstupno-výstupných modulov PLC. Vzhľadom na predpoklad, že pracovisko bude využívať viacero používateľov pre riešenie rôznych odlišných úloh a každý z nich môže prekonfigurovať jeho programové nastavenie, údržbu programov umožňuje predložená koncepcia riešiť jednoduchým zálohovaním a obnovením obrazu HD použitého PC.
- Navrhnutá koncepcia sa líši od bežne používaných HIL pracovísk hlavne tým, že pre modelovane riadeného systému používa štandardizované PLC a nie jeho fyzikálny model (resp. jeho fyzikálnu kópiu). Na jednej strane to neumožňuje detailne vystihnúť všetky fyzikálne vlastnosti riadeného systému, na druhej strane však umožňuje veľmi pohodlne a rýchlo variovať riešené úlohy. Podstatnou vlastnosťou navrhovanej koncepcie je aj to, že umožňuje časové riadenie riešenia danej úlohy, t.j. synchronizovať a prípadne spomaliť/zrýchliť výpočtový čas oboch PLC voči reálnemu času. To môže byť vhodné napr. v prípade, ak niektoré PLC kapacitne nestačí na riešenie danej úlohy, t.j. v rámci reálnej doby vzorkovania nestihne realizovať všetky výpočty modelu technológie alebo regulátora.

IV. VERIFIKÁCIA NAVRHNUTÉHO HIL PRACOVISKA

Postup práce na navrhnutom HIL pracovisku pozostáva zo štyroch základných krokov:

1. Vytvorenie dvoch samostatných projektov osobitne pre riadiace a osobitne pre simulačné PLC vo vývojovom prostredí Automation Studio B&R. Najdôležitejšou časťou projektu je vybudovanie hardvérovej konfigurácie pre obidva PLC HIL pracoviska určeného pre verifikáciu konkrétnej úlohy.
2. Vytvorenie matematického modelu verifikovaného systému (regulovaný systém +regulátory) v prostredí programu MATLAB pomocou nástroja Simulink. Obidva tieto spojené modely je nutné transformovať na diskrétny modely pre programovateľný automat PA a následne doplniť o príslušné bloky z knižnice B&R Automation Studio Toolboxu nainštalovanej v Simulinku.
3. Transformácia simulačného modelu verifikovaného systému z programu MATLAB do príslušných PLC HIL pracoviska.

Túto transformáciu možno vykonať dvoma spôsobmi:

- priamym prepisom (naprogramovaním) rovníc matematického (simulačného) modelu verifikovaného systému do prostredia B@R Automation Studio;
- využitím nástroja B&R Automation Studio Toolbox v programe MATLAB pre automatické generovanie kódu pre PLC podľa blokovej schémy v Simulinku, vytvorenej v prvom kroku.

Automatické generovanie kódu pre PLC je pohodlné, rýchle a v zásade nevyžaduje znalosť programovania príslušných PLC, teda je vhodné viac pre vzdelávacie účely. Priame naprogramovanie zdrojového kódu vyžaduje znalosť vytvárania aplikácií v PLC, je časovo náročnejšie a je pri ňom väčšie riziko chýb. Na druhej strane poskytuje podstatne väčšiu variabilitu pri úpravách aplikácií v PLC a vizualizácii technologického procesu, prípadne simulácii rôznych prevádzkových stavov.

4. Vytvorenie vizualizácii pre príslušné programovateľné automaty a to zvlášť pre riadiace PLC (regulátory) ako aj pre PLC pre simuláciu procesu (regulovaný systém).

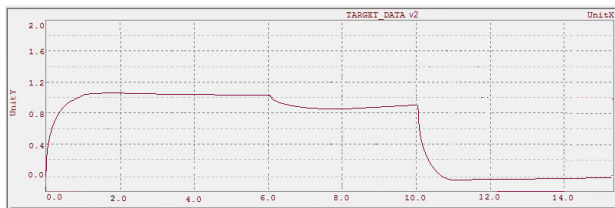
Vlastnosti navrhutej koncepcie HIL pracoviska boli verifikované na príklade regulácie uhlovej rýchlosti jednosmerného motora [4-5]. Dosiahnuté výsledky potvrdili funkčnosť navrhutej koncepcie HIL simulačného pracoviska, ktoré je použiteľné prakticky pre prácu s každým spojeným alebo diskretným dynamickým systémom, ktorý môže byť opísaný analyticky t.j. pomocou známej štruktúry a jeho parametrov alebo neparаметricky, t.j. iba pomocou funkčných závislostí medzi svojimi vstupmi a výstupmi (napr. fuzzy modelom, tabuľkou, modelom založenom na neurónových sieťach, atď.).

Koncepcia HIL pracoviska založená na dvoch PLC umožňuje variabilitu riešenia konkrétnych úloh, čo predstavuje veľkú výhodu z pohľadu vzdelávacích cieľov. Doplnením štandardizovaných vstupno-výstupných modulov pre PLC dosiahneme jednoduchú zmenu hardvéru HIL pracoviska. Ak chceme robiť softvérovú zmenu, potom je potrebné zmeniť príslušný program v PLC.

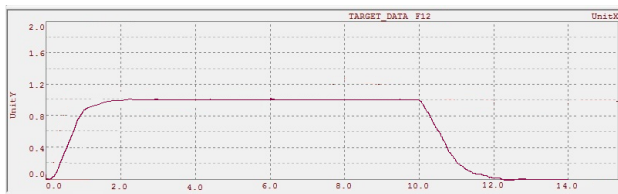
Navrhnuté a zrealizované HIL pracovisko bolo ďalej použité pre verifikáciu vlastností regulačných štruktúr strednej časti kontinuálnej linky. Hlavným cieľom riadenia v systémoch s kontinuálnym spracovaním materiálu je predovšetkým presná regulácia ťahu, pričom sa požaduje jeho konštantný a nekmitavý priebeh pri všetkých prevádzkových stavoch (rozbeh, dobeh) pri súčasnom pôsobení porúch pred a za uvažovanou časťou linky a zmenách parametrov (napr. momentu zotvračnosti). Pre návrh regulátora ťahu kontinuálnej linky bola použitá regulačná štruktúra s referenčným modelom, ktorej stabilita bude zabezpečená pomocou II. Ljapunovovej metódy [6].

Výsledky experimentálnych meraní zobrazené na obr.4 a obr.5 predstavujú priebehy regulovanej rýchlosti a ťahu kontinuálnej linky, ktorých dynamika bola predpísaná referenčným modelom, pri pôsobení externých porúch pred a za uvažovanou časťou linky z nulovej hodnoty na hodnotu 80% nominálneho ťahu v čase $t=3s$ a $t=6s$ a pri pre prípad, že tlmenie pásu materiálu linky (K_v) sa päťnásobne zvýšilo a moment zotvračnosti pohonov (J) bol dvojnásobne znížený.

Výsledky experimentálnych meraní potvrdzujú, že navrhnutý regulátor dokáže splniť základné ciele regulácie, t.j. predpísanú dynamiku, invariantnosť na pôsobenie externých porúch, robustnosť voči zmenám dôležitých parametrov, čo zabezpečuje vysokú kvalitu spracovania materiálu počas celého pracovného cyklu.



Obr. 4. Priebeh rýchlosti v_2 strednej časti KL pri $K_t=5 \cdot K_{IN}$ a $J=0.5 \cdot J_N$ pri pôsobení externých porúch verifikovaný na HIL pracovisku



Obr. 5. Priebeh ťahu strednej časti KL pri $K_t=5 \cdot K_{IN}$ a $J=0.5 \cdot J_N$ pri pôsobení externých porúch verifikovaný na HIL pracovisku

V. ZÁVER

Článok sa zaoberá návrhom a realizáciou univerzálneho hardware in the loop pracoviska (HIL) pre oblasť modelovania a riadenia spojitých alebo diskretných dynamických systémov. Celá koncepcia je postavená na požiadavke čo najširšej univerzálnosti pri využívaní pracoviska a na požiadavke využitia štandardizovaných, bežne dostupných zariadení pri jeho realizácii. Z uvedených dôvodov boli obidva podsystemy HIL pracoviska (testovací a simulačný) postavené na báze štandardne dostupných programovateľných automatov. Pracovisko je využívané hlavne pre riešenie úloh z oblasti elektrických pohonov, mechatroniky, robotiky a riadenia technologických liniek. Z pedagogického hľadiska je dôležitá variabilita riešenia jednotlivých úloh, čo

navrhnutá koncepcia HIL pracoviska postavená na báze dvoch PLC umožňuje. Z hardvérového hľadiska ide o jednoduchú zmenu počtu a typov štandardizovaných vstupov a výstupov PLC. Zo softvérového hľadiska je samozrejme potrebná zmena príslušného programu v PLC.

POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla s podporou grantu VEGA 1/0187/18.

LITERATÚRA

- [1] M. Linjama, T. Virvalo, J. Gustafsson, et al., "Hardware-in-the-loop environment for servosystem controller design, tuning and testing", *Microproc. and Microsy.*, 24(1), pp. 13-21, 2000.
- [2] A. Bouscayrol, "Different types of Hardware-In-the-Loop simulation for electric drives", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE 2008*, Cambridge, pp. 2146-2151, 2008.
- [3] A.M. Osama, N.Y. ABED, "Real-time simulation of electric machine drives with hardware-in-the-loop", *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, Vol. 27, Iss: 4, pp. 929 – 938, 2008
- [4] P. Talian, R. Sivý, M. Oros, „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*, FEI TU, pp. 71-74, 2015.
- [5] P. Talian, "Hardware-in-the-Loop method for electric drives", *In SCYR, 15th Scientific Conference of Young Researchers*, Košice, 2015.
- [6] P. Talian, D. Perduková, "Verifikácia vlastností stabilnej regulačnej štruktúry na HIL pracovisku", *In: Electrical Engineering and Informatics 8: proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice*, FEI TU, pp. 586 – 591, 2017.