

HIL SIMULÁCIA MECHATRONICKÝCH SYSTÉMOV S VYUŽITÍM KOMERČNÝCH MENIČOV

K.Kyslan, P.Keusch

Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrotechniky, mechatroniky a priemyselného inžinierstva, Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská republika

Abstrakt

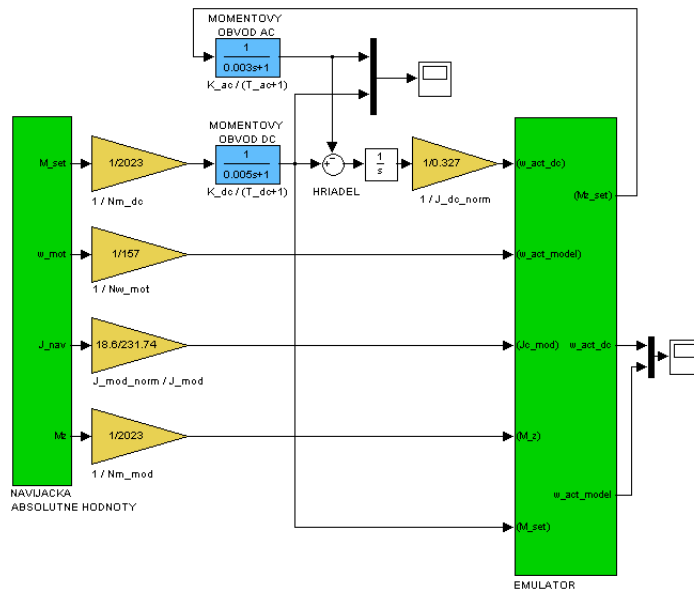
Technológia HIL (Hardware-in-the-Loop) simulácie sa stala štandardom pri overovaní riadenia mechatronických systémov. Príspevok popisuje HIL simulátor využívajúci prostredie MATLAB/Simulink v kombinácii so systémom RT-LAB. Reálna sústava je tvorená komerčnými výkonovými meničmi a elektromotormi. Uvedená zostava bola použitá pre riadenie emulátora záťažových momentov.

Úvod

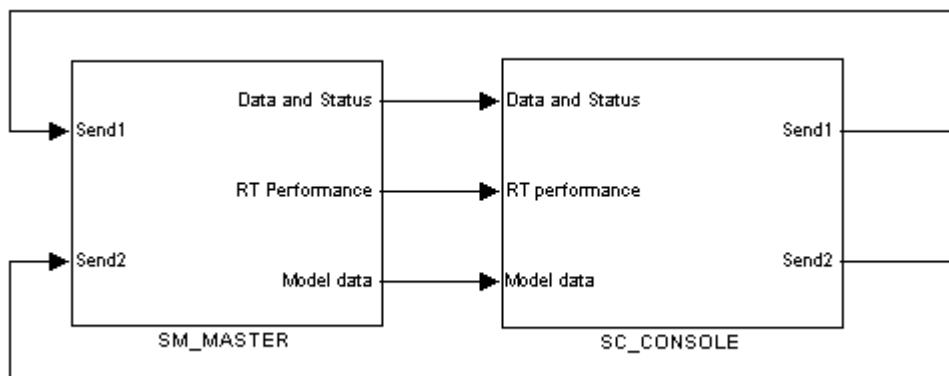
Pri vývoji riadiacich algoritmov mechatronického systému je dôležitou fázou simulácia, pri ktorej sa pomocou matematického modelu overuje správnosť návrhu. Použitie číslicových počítačov umožňuje simulovať rozsiahle dynamické sústavy s minimálnymi zjednodušeniami. Pri zložitých modeloch trvá číslicová simulácia podstatne dlhšie, ako prebehne simulovaný dej v skutočnosti. Ak sa požaduje simulácia modelu v reálnom čase, je nutné použiť špeciálny vysokovýkonný simulačný hardware a software. Ak je hardware pre simuláciu v reálnom čase vybavený DAQ kartami, pomocou ktorých je spojený s reálnym zariadením, umožní sa tým tzv. Hardware-in-the-Loop simulácia (HIL). Vzniká HIL systém, v ktorom je časť modelu nahradená reálnym zariadením. To značne urýchľuje proces návrhu riadenia. Jedným z problémov použitia HIL systémov pri návrhu riadenia pre elektrické pohony je skutočnosť, že HIL simulácia sa realizuje na inom hardware a software, než bude využívať reálny pohon. Preto sa odladený algoritmus riadenia musí prepisovať do prostredia reálneho zariadenia, čo prináša možnosť vnesenia chýb a nutnosť opätovného ladenia. Druhým problémom je, ako vytvoriť v laboratóriu také podmienky pre testovanie pohonu, pri akých bude pohon pracovať v reálnej prevádzke. Oba uvedené problémy rieši emulátor záťažového momentu, ktorý využíva zostavu s komerčnými výkonovými meničmi a elektromotormi.

1 Vývoj hybridného modelu pre simuláciu v HIL pomocou MATLAB/Simulink

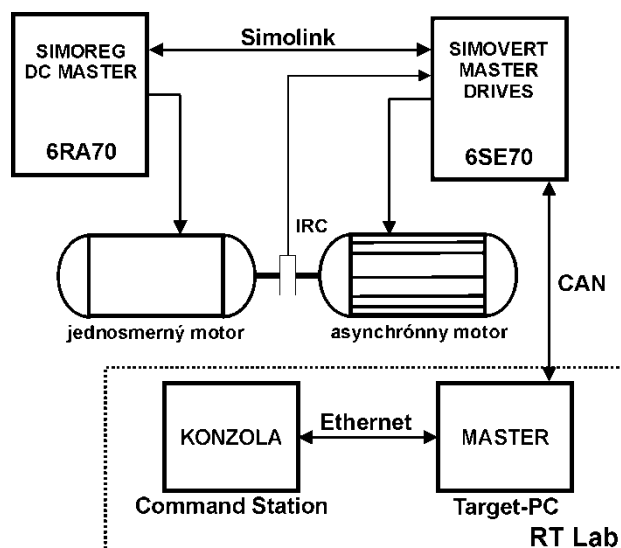
V literatúre [1] je uvedených niekoľko druhov HIL simulácie elektrických pohonov. Prezentovaný simulátor predstavuje HIL simuláciu na úrovni mechaniky, kde rozhranie medzi testovaným pohonom a simulačným prostredím korešponduje s mechanickými veličinami. Mechanický simulátor bol použitý preto, aby navrhnutý algoritmus riadenia bol rovnaký ako v praxi. V počiatkovej fáze návrhu riadenia bol zostavený klasický matematický model v prostredí MATLAB/Simulink (obr. 1). Ďalšou fázou bola implementácia modelu do systému pre simuláciu v reálnom čase RT-LAB. Model bol podľa požiadaviek RT-LAB rozdelený na podsystemy *master* a *konzola* (obr. 2) a doplnené boli špeciálne bloky potrebné pre komunikáciu s reálnymi zariadeniami, bloky pre zadávanie a zobrazovanie hodnôt, bloky pre zobrazenie výpočtového výkonu systému a pod. Taktiež boli navrhnuté a realizované potrebné normovania veličín. Následne bol systém RT-LAB vybavený požadovanou komunikačnou kartou a spojený s reálnymi meničmi a motormi. Vznikol HIL hybridný model s emulátorom záťažovacieho momentu, znázornený na obr. 3, ktorý bol použitý na testovanie pohonu navíjačky. Aj keď sa algoritmus riadenia navíjačky vykonával v simulátore, a teda je nutný prepis algoritmu do prostredia reálneho zariadenia, za normálnych podmienok sa riadenie dá zrealizovať priamo v meniči, či už pomocou voľných blokov, alebo prídavnej karty (napr. T400). Výhodou simulátora je použitie pomerných veličín, čo umožňuje na použitých malých pohonoch testovať riadiace algoritmy aj pre veľké pohony [4].



obr. 1: Simulačná schéma navíjacieho zariadenia s emulátorom zaťažovacieho momentu



obr. 2: Úprava modelu pre RT-LAB



obr. 3: Hybridný model pre simuláciu v HIL s použitím RT-LAB a MATLAB/Simulink

2 Popis použitého simulačného hardware a software

Pre HIL simuláciu sú v ponuke produkty viacerých firiem (Real-time Toolbox prostredia Matlab, produkty fy dSpace, produkty fy OPAL-RT atď.). Zvolená bola decentralizovaná platforma RT-LAB™ vyvinutá kanadskou spoločnosťou OPAL-RT Technologies [8], pretože je cenovo dostupná a je možné ju s minimálnymi úpravami použiť na bežných PC. Systém RT-LAB má špeciálnu knižnicu blokov, ktorá je prístupná po inštalácii v Simulinku ako samostatná knižnica. Obsahuje všetky bloky, ktoré sú potrebné na to, aby užívateľ mohol model, vyvinutý v Simulinku, simulovať aj v prostredí RT-LAB. Filozofia simulácie v RT-LAB je založená na pravidle, že pôvodný model v Simulinku je rozdelený na subsystemy. Tieto musia byť pomenované predponou, ktorá identifikuje ich funkciu. Subsystemy je možné kofigurovať na rôznych zostavách a použitím viacerých PC zvyšovať výkon systému. Pri realizácii emulátora bola použitá konfigurácia s jedným *Target PC* a jedným *Command Station*.

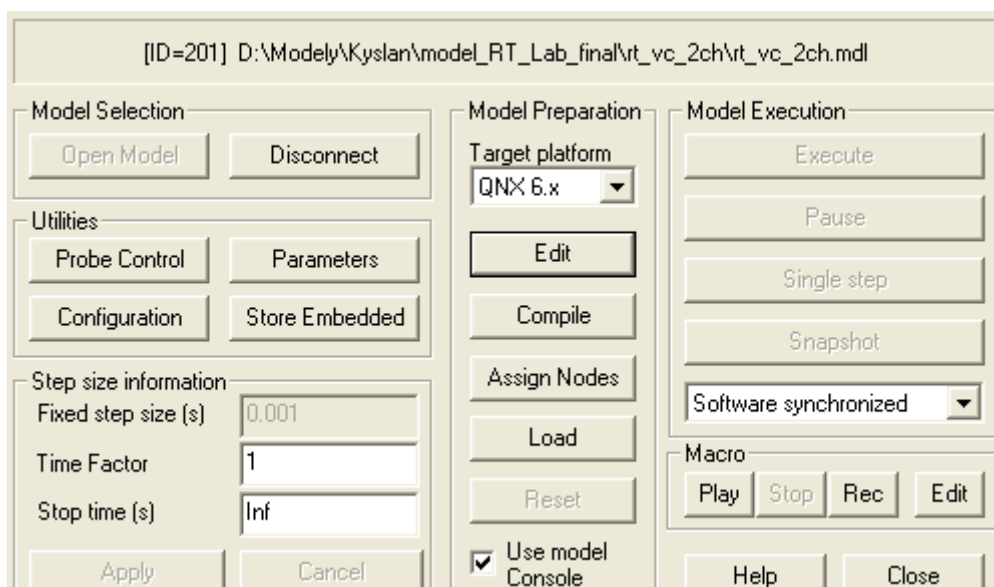
Command Station je osobný počítač s operačným systémom Windows XP Professional a nainštalovaným systémom RT-LAB. *Target PC* je výkonný osobný počítač s operačným systémom QNX v.6. Tento operačný systém bol vyvinutý fy QNX Software Systems ako komerčný systém UNIX-ového typu pracujúci v reálnom čase (RTOS), no vydaný je aj bezplatný variant pre nekomerčné použitie. Je to spoľahlivý operačný systém pre riadenie priemyselných, technologických a iných aplikácií, real-time procesov ale aj embedded systémov a je najúspešnejší vo svojej kategórii. Od výkonu *Target PC* závisí, aké zložité schémy je možné simulovať pri danej dobe vzorkovania.

Command Station a *Target PC* komunikujú cez štandardný protokol Ethernet. *Target PC* je vybavený komunikačnou kartou CAN-ACx-PCI karta od fy Softing AG, ktorá umožňuje komunikáciu po CAN zbernici cez 2 nezávislé fyzické kanály. Cez túto kartu prebieha komunikácia s reálnou sústavou. Reálnu sústavu tvorí dvojica motorov na spoločnom hriadeli napájaná rekuperačnými meničmi fy Siemens. Jednosmerný cudzobudený motor, pre ktorý sa testuje riadenie, je napájaný tyristorovým usmerňovačom Simoreg DC Master 6RA70. Asynchrónny motor s kotvou nakrátko predstavuje záťaž a je napájaný frekvenčným meničom Simover Master Drives 6SE70. Pre vzájomnú komunikáciu oboch meničov pomocou optickej linky sú tieto vybavené komunikačnými kartami Simolink Board.

3 Práca v systéme RT-LAB

Po úprave modelu do podsystémov *master* a *konzola*, ako je to znázorené na obr. 3, je model pripravený na použitie v prostredí RT-LAB Main Control (obr. 4). Voľbou *Open Model* sa otvorí model v prostredí MATLAB/Simulink. Voľba *Edit* slúži na dodatočnú editáciu. Po ukončení všetkých úprav sa voľbou *Compile* prekompiluje model do jazyka C a voľbou *Load* sa nahrá podsystém SM_MASTER (master) do Target PC. Voľbou *Execute* sa spúšťa simulácia v reálnom čase. Po spustení simulácie sa v Command Station automaticky otvorí vygenerované okno s podsystémom SC_CONSOLE (konzola). Simuláciu je možné kedykoľvek zastaviť pomocou voľby *Pause*. Voľba *Reset* slúži na vymazanie podsystému z Target PC. Pre prípadné použitie iného modelu sa práve používaný model odpojí voľbou *Disconnect*. Pevná vzorkovacia frekvencia sa nastavuje v okne *Fixed step size*, pričom táto hodnota sa musí zhodovať s hodnotou nastavenou v Simulinku.

V podsystéme *master*, ktorý je nahraný v Target PC, prebieha simulácia v reálnom čase a komunikácia s reálnymi objektami. Podsystém *konzola* sa vykonáva v Command Station a počas simulácie slúži pre zadávanie referenčných veličín a on-line vizualizáciu výsledkov simulácie.



obr. 4: Užívateľské rozhranie systému RT-LAB

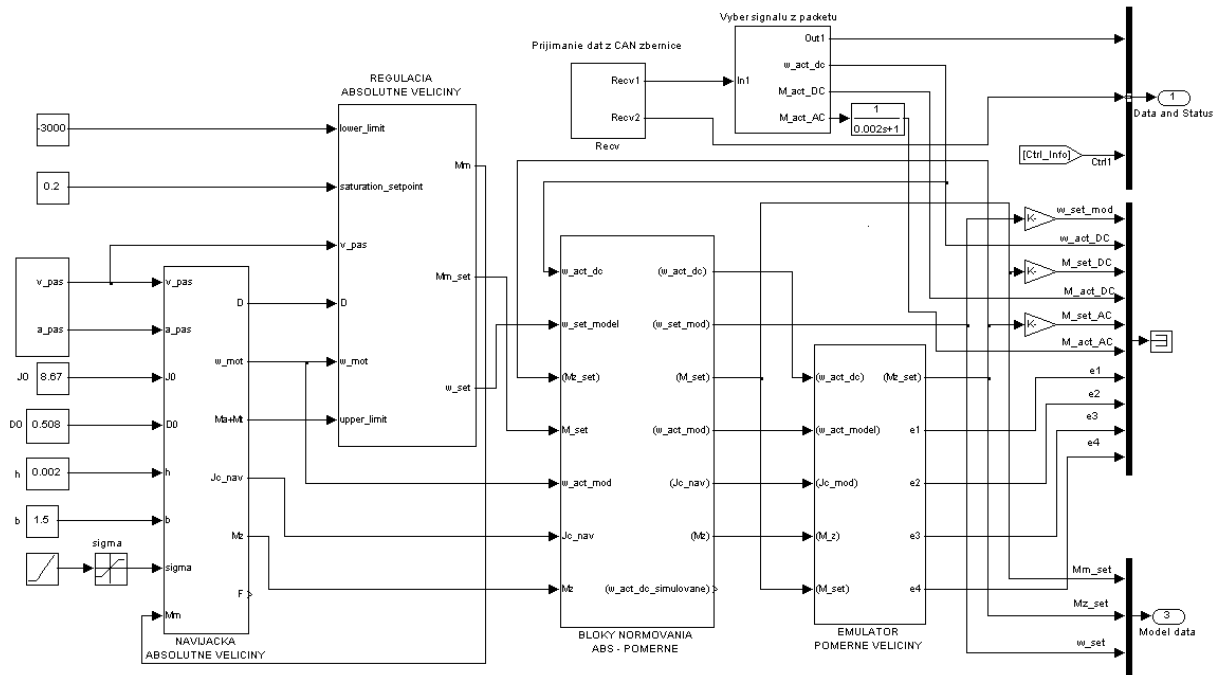
4 Popis komunikácie

Model, simulovaný v reálnom čase v Target PC, je možné rozdeliť do 5 funkčných častí:

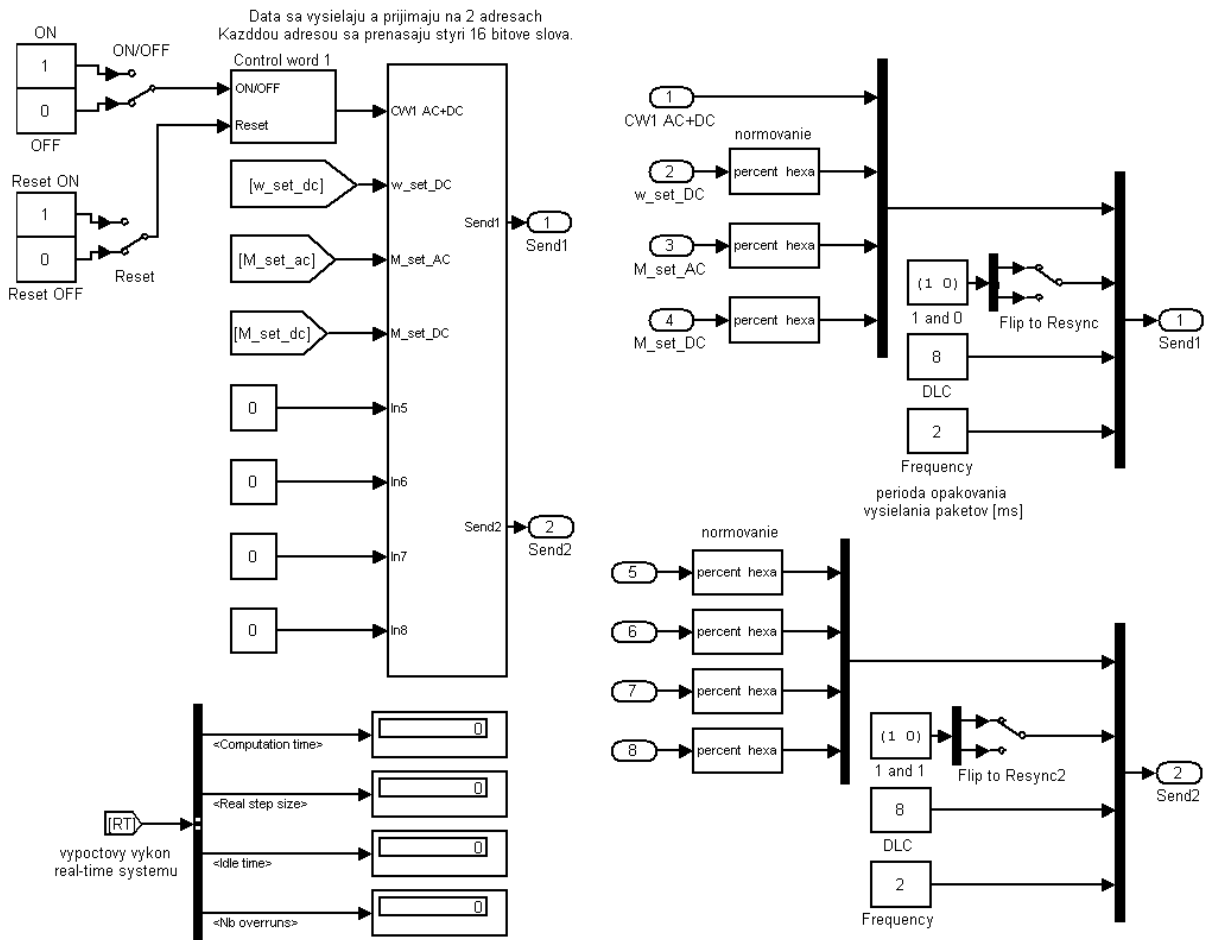
- 1) navíjačka (v absolútnych veličinách)
- 2) bloky pre normovanie
- 3) emulátor (v pomerných hodnotách)
- 4) blok pre reguláciu ťahu
- 5) bloky pre komunikáciu po CAN zbernici a pre vyhodnocovanie výkonu RT systému

Riadiace obvody väčšiny komerčných meničov pracujú v pomerných veličinách, preto je výhodné navrhnúť emulátor pre prácu s pomernými veličinami. Pri správnom nastavení noriem v blokoch normovania je možné pripojiť namiesto navíjačky ľubovoľný model pracujúci v absolútnych veličinách. Do štruktúry modelu v Target PC nie je možné za behu simulácie zasiahnuť a jedinou možnosťou je vytiahnuť si potrebné veličiny do konzoly. Tok dát v zostave *Target PC-Command Station* (ďalej len *master-konzola*) je nasledovný:

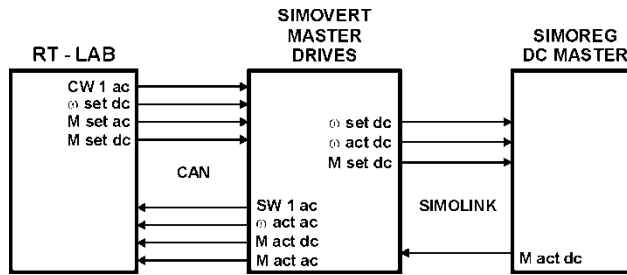
- model v *masteri* vypočíta referenčné veličiny v pomerných hodnotách, ktoré sú posielané do *konzoly*
- v *konzole* sa referenčné veličiny normujú z pomerných hodnôt do hexadecimálneho vyjadrenia a spolu s riadiacim slovom sa posielajú naspať do *mastera*, ktorý zabezpečuje komunikáciu po CAN zbernici
- v *konzole* je možné ovládať meniče - cez zmenu príslušných bitov riadiaceho slova sa meniče zapínajú a kvituje sa porucha
- v *masteri* je realizovaný výber konkrétnych signálov z dát prijatých po CAN zbernici a ich normovanie z hexadecimálneho vyjadrenia do pomerných veličín, signály sa následne privádzajú ako spätná väzba do príslušných modelov, alebo sa posielajú do *konzoly*, kde sú filtrované takým spôsobom, aby sa dali on-line vizualizovať štandardnými blokmi.



obr. 5: Časť subsystému *master*: navíjačka, regulácia ťahu, normovacie bloky a emulátor



obr. 6: Časť subsystému *konzola*: ovládanie meniča, normovanie, zobrazenie výpočtového výkonu

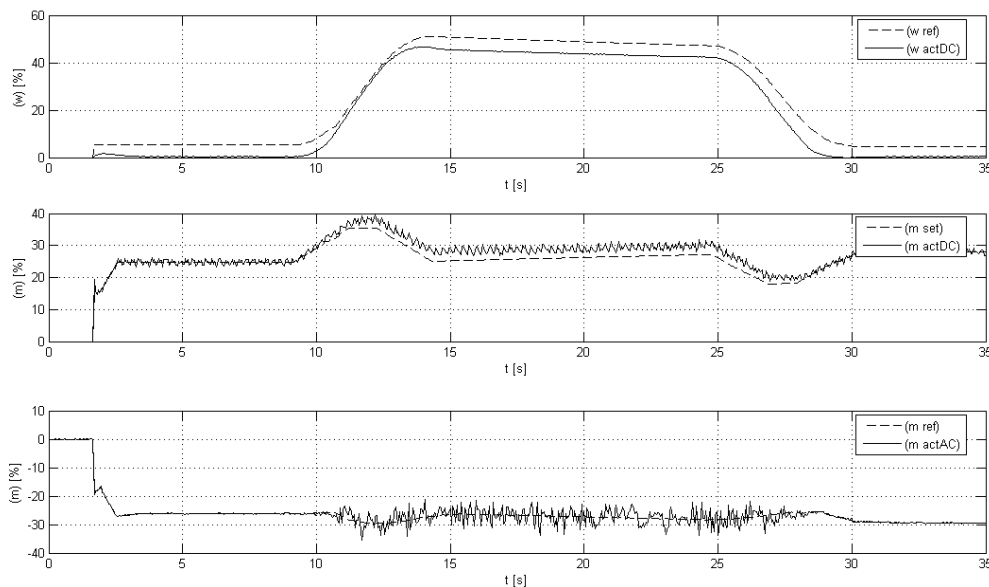


obr. 7: Tok signálov medzi jednotlivými časťami zostavy

Na obr. 7 je znázornený tok signálov medzi systémom RT-LAB a meničmi, ako aj medzi meničmi navzájom. Z modelu v systéme RT-LAB sú do jednosmerného meniča privádzané žiadané hodnoty otáčok a momentu, pričom menič pracuje buď v otáčkovom alebo momentovom režime, a podľa toho je v meniči nastavený aj zdroj žiadanej hodnoty. Do striedavého meniča je z emulátora privádzaný zaťažovací moment, u ktorého sú zohľadnené aj zmeny momentu zotrvačnosti zariadenia [5],[6]. Aby zaťažovací pohon bol schopný čo najpresnejšie emulovať premenlivý záťažný moment, musí byť vybavený rýchlou reguláciou momentu. Je výhodné použiť striedavý menič s vektorovým riadením, u ktorého je doba nárastu momentu rádovo v jednotkách milisekúnd. Aktuálne otáčky sú vyhodnocované inkrementálnym snímačom a zo striedavého meniča sa posielajú do systému RT-LAB.

5 Experimentálne výsledky

HIL hybridný model so systémom RT-LAB v uvedenej zostave bol vyskúšaný pre emuláciu pohonu priemyselnej navíjačky [3] s $P_N = 315 \text{ kW}$, $n_N = 1450 \text{ ot.min}^{-1}$ a $J=240 \text{ Nm}$. Namerané boli časové odozvy znázornené na obr. 8.



obr. 8: Časové odozvy emulátora

V čase $t=2\text{s}$ sa začína napínanie pásu. Navíjanie zvitku začína v čase $t=10\text{s}$ rozbehom na max. rýchlosť. Po dosiahnutí max. rýchlosti v čase $t=14\text{s}$ sa so zväčšujúcim sa priemerom zvitku úmerne znižuje jeho uhlová rýchlosť tak, aby rýchlosť podávania pásu materiálu do navíjačky bola konštantná.

Záver

Pre elektrické pohony existuje viacero konceptov HIL simulácie. Prezentovaná koncepcia je tzv. HIL simulácia na mechanickej úrovni, kde modelom je nahradená len nadradená regulácia a vo zvyšku regulačnej slučky sú reálne komerčné zariadenia, čo zvyšuje presnosť modelovania. Výhodou je použitie pomerných veličín, najmä pri testovaní pohonov veľkých výkonov, ktoré je potrebné zaťažovať vysokými záťažovými momentami a momentami zotrvačnosti [4]. Takéto podmienky sa v laboratóriu nie sú reálne, ale je možné ich namodelovať. Z obr. 8 je zrejmé, že zostava umožňuje overovanie riadiacich algoritmov pre meniče v laboratórnych podmienkach tým, že dovoľuje simulovať premenlivé zaťaženie M_z a premenlivý moment zotrvačnosti J_z bez mechanických zásahov do pohonu. M_z a J_z generovaný nadradeným riadením môže predstavovať reálne zaťaženie tak samostatného pohonu, ako aj pohonu zaradeného do výrobnéj linky vrátane vzájomných väzieb cez spracovávaný materiál. Zostava sa dá využiť pre overovanie regulácie pohonov liniek, robotov ako aj overovanie reakcie zariadenia v kritických stavoch. Uplatnenie nájde aj vo výučbe riadenia elektrických pohonov a mechatronických systémov.

Podakovanie: Autori vyslovujú vďaka Agentúre na podporu výskumu a vývoja za podporu projektu APVV-0095-07 a Vedeckej grantovej agentúre Ministerstva školstva Slovenskej Republiky za podporu projektu VEGA No. 1/0099/09, v rámci ktorých vznikla táto práca.

Literatúra

- [1] BOUSCAYROL A.: Different types of Hardware-In-the-Loop simulation for electric drives. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 6-7,2008, str. 2146 – 2151. ISBN 978-1-4244-1665-3.
- [2] MACKO R., ŽALMAN M., UHRÍČEK M.: Programovateľný emulátor mechanických záťaží pre motory. AT&P žurnál 2/2005. ISSN 1335-2237. str. 92-95.
- [3] ĎUROVSKÝ F., FEDÁK V., KYSLAN K., FETYKO J.: Emulation of a winder drive. In: International Conference on Electrical Drives and Power Electronics. Dubrovnik, HR. 11-2009, ISBN 978-953-6037-55-1.
- [4] FETYKO J., ĎUROVSKÝ F., REINER J., FEDÁK V.: Load Share Control of Roughing Mill Vertical Rolls at Hot Strip Rolling Mill. In: Electrical Drives and Power Electronics: EDPE 2007. 9,2007. Vysoké Tatry, Slovakia. ISBN 978-80-8073-868-6.
- [5] ĎUROVSKÝ F., FETYKO J., FEDÁK V.: Emulátor záťažového momentu so zlepšenou dynamikou. In: Automatizácia a riadenie v teórii a praxi ARTEP 2009. Stará Lesná, SR. 3-2009, s. 82-1-82-13. ISBN 978-80-553-0164-4.
- [6] ĎUROVSKÝ F., FETYKO J., FEDÁK V.: Testovanie pohonov s emulátorom záťažového momentu. In: Strojárstvo. roč. 8, č.5 (2009), s. 8/1-8/5. Dostupné na: <www.strojarstvo.sk> ISSN 1335-2938.
- [7] ĎUROVSKÝ F.: Riadenie priemyselných pohonov. Habilitačná práca. 2009. Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrotechniky, mechatroniky a priemyselného inžinierstva.
- [8] RT-LAB Version 8.1: User Guide [online]. [cit. 2009-04-08]. Dostupné na : <<http://www.opal-rt.com/support/download-archives>>
- [9] Matlab – The Language of Technical Computing. Mathworks, www.mathworks.com

Karol Kyslan, Peter Keusch
Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektrotechniky, mechatroniky a priemyselného inžinierstva
Letná 9, 042 00 Košice
karol.kyslan@tuke.sk, peter.keusch@tuke.sk