Centrum nedeštruktívnej diagnostiky technologických procesov so štandardným softvérovým vybavením pre riadenie a komunikáciu

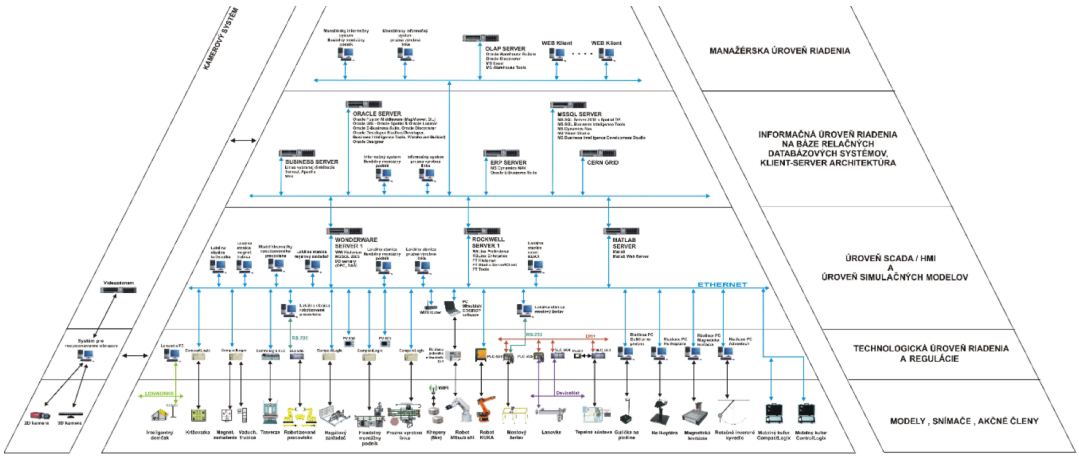
J. Jadlovský*, A. Jadlovská, S. Jadlovská, J. Čabala, M. Oravec, D. Voščeк, L. Koska, J. Socháň
Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Katedra kybernetiky a umelej inteligencie, Košice, Slovenská republika
*jan.jadlovsky@tuke.sk

***Abstract*—Jednou z výskumných aktivít Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky (CMMRaPI – kyb.fei.tuke.sk) je aj Centrum nedeštruktívnej diagnostiky technologických procesov so štandardným softvérovým vybavením pre riadeniea komunikáciu, implementované ako podaktivita 3.1/PP7 projektu TECHNICOM realizovaného Technickou univerzitou v Košiciach. Zameraním projektu je zlepšenie podmienok pre transfer výsledkov výskumu do praxe. Zameranie Centra spočíva v návrhu metodiky pre nedeštruktívnu a nekontaktnú diagnostiku technologických procesov, pričom sa hlavný dôraz kladie najmä na systémy rozpoznávania obrazu, kde obrazy sú snímané pomocou bezkontaktného skenovania prostredníctvom čierno-bielych, farebných a termovíznych kamier. Tieto zariadenia sú integrované do riadiacich systémov technologických procesov a sú prepojené s mechanickými časťami technologických zariadení alebo výrobných liniek (servomotory, mobilné roboty, manipulátory). Riešenie úloh podaktivity 3.1 projektu TECCNICOM zahŕňa širokú škálu technických, programových a sieťových prostriedkov umožňujúcich vývoj, experimentálne overenie a nasadenie navrhnutých riešení v oblasti monitorovania, diagnostiky a riadenia technologických procesov.**

I. ÚVOD

V predkladanom článku sú popísané distribuované systémy riadenia technologických procesov v celom rozsahu riadenia s dôrazom na zabezpečenie kvality a spoľahlivosti celého systému riadenia ako aj jeho jednotlivých distribuovaných častí, Obr. 1. Celý systém riadenia je budovaný tak, že popri snímačoch a akčných členoch zabezpečujúcich požadované riadenie technologického procesu, systém riadenia v rámci svojej štruktúry umožňuje implementovať súbor snímačov, ktoré v rámci procesu riadenia môžu, no nemusia mať priamy vplyv na akčný zásah, ale umožňujú získať doplňujúce informácie o procese. Jedná sa obyčajne o snímače nedeštruktívneho charakteru (kamery, resp. kamerové systémy, pyrometre, laserové snímače, ultrazvukové a indukčné snímače, snímače postavené na báze merania vírivých prúdov a pod.). Informácie z uvedených snímačov sú integrované s informáciami zo snímačov a akčných členov, ktoré sú využívané pri riadení v rámci uzavretých riadiacich a regulačných slučiek pre zabezpečenie požadovaných charakteristík technologického procesu a porovnávané s požiadavkami na technologický proces, resp. jeho kvalitu na úrovni referenčného modelu, ktorý bol pre účely zabezpečenia parametrov riadenia a požiadaviek na kvalitu vytvorený.

V nasledujúcich častiach príspevku bude popísaný prístup pri realizácii distribuovaných systémov riadenia technologických procesov (DSR TP) z hľadiska metodiky ich návrhu, algoritmov riadenia a overenia navrhnutej metodiky na úrovni modelov a simulácie. Zameriame sa aj na popis realizácie navrhnutých riešení s využitím technických, programových/simulačných a sieťových



Obr 1. Distribuovaný systém riadenia (DSR) - pyramidálny model implementovaný na KKUI FEI TU

prostriedkov s dôrazom na aplikáciu prostriedkov sledovania a riadenia kvality [1]. Vzhľadom na široký záber problematiky DSR, analýza a jeho popis je členená do nasledujúcich funkčných celkov:

A. mechatronické systémy so zameraním na *mobilnú robotiku*,

B. zložité mechatronické systémy so zameraním na návrh a realizáciu algoritmov riadenia na báze plne *aktuovaných a podaktuovaných systémov*,

C. mechatronické systémy so zameraním na *výrobné linky* s využitím priemyselných robotov a manipulátorov.

V rámci vymenovaných celkov budú aplikované systémy nedeštruktívnej diagnostiky ako napr. kamerové systémy, laserové prostriedky, a pod. ako ich integrálna súčasť.

II. NÁVRH A DIAGNOSTIKA DISTRIBUOVANÉHO RIADENIA MECHATRONICKÝCH SYSTÉMOV

A. Riešenie úloh diagnostiky mobilných robotov – pracovisko mobilnej robotiky

Riešenie úloh diagnostiky mobilných robotov spočíva v návrhu metodiky, ktorá v sebe zahŕňa modelovanie, riadenie, simuláciu a realizáciu mobilných robotov v typových aplikáciách. Riešenie úlohy si vyžaduje vytvorenie dvoch modelových aplikácii a to:

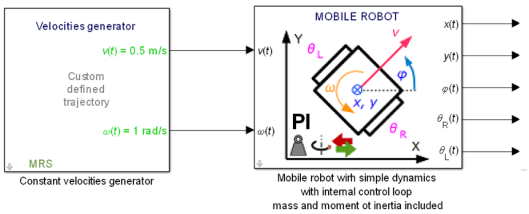
1. postupy pre odvodenie matematických modelov pre jednotlivé typy mobilných robotov a robotických systémov s navrhnutým riadiacim systémom a ich simulácia vo vhodnom programovom prostredí [24],
2. realizácia laboratórnych modelov kolesových a pásových mobilných robotov s riadiacimi systémami, senzorickým systémom a akčnými členmi.

Diagnostika mobilných robotov využíva spájanie výsledkov získavaných off-line a on-line simuláciou matematických modelov a údajov z reálnych snímačov z uvedených modelových aplikácii [25].

A1. Matematické modelovanie, riadenie a simulačné overenie modelov mobilných robotov

Mobilný robot je vo všeobecnosti možné reprezentovať ako matematický model zložený z kinematického a dynamického modelu, ktoré sú získané na základe matematicko-fyzikálnych rovníc a vzťahov. Kinematický model vyjadruje pohybové vlastnosti mobilného robota vzhľadom na konštrukciu podvozka. Dynamický model mobilného robota v sebe zohľadňuje vplyvy hmotnosti, trenia alebo dynamiky motorov na pohybové vlastnosti robota, [2]. Matematický model mobilného robota je možné implementovať v simulačnom prostredí Matlab/Simulink, pričom je s využitím tohto modelu možné ďalej overiť funkcionalitu a stabilitu riadiacich štruktúr pre zvolené ciele riadenia [19].

V navrhnutej modelovej aplikácii *A1* je vytvorená konfigurovateľná knižnica simulačných modelov mobilných robotov s diferenciálnym kolesovým podvozkom v programovom prostredí *Simulink*, pričom ukážka jedného z podsystémov/blokov je znázornená na Obr. 2. Súčasťou simulačnej knižnice sú aj vizualizačné prostriedky založené na báze funkcií knižnice *OpenGL* slúžiace pre diagnostiku chovania sa modelov pre zvolené vstupy. Matematické a simulačné modely spolu s riadiacimi algoritmami z vytvorenej simulačnej knižnice je možné aplikovať v návrhu a programovaní reálnych modelov mobilných robotov, [24]



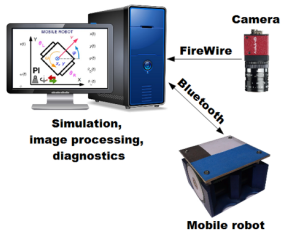
Obr 2. Simulačný model mobilného robota s diferenciálne riadeným podvozkom [24]

A2 Laboratórne modely mobilných robotov

Vývoj laboratórnych modelov mobilných robotov pozostáva z návrhu mechanickej a elektronickej časti. Mechanická časť môže byť navrhnutá a namodelovaná pomocou softvérov CAD a SolidWorks. Návrh elektroniky je možné realizovať v programe Eagle a simulácie vykonať s využitím softvéru Proteus.

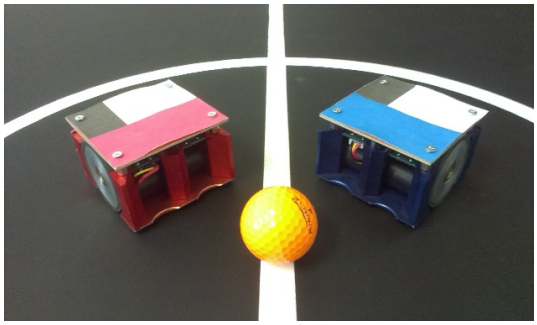
Ako riadiaci člen z hľadiska minimalizácie rozmerov, hmotnosti a spotreby sa najčastejšie využívajú jednočipové mikropočítače, v našom prípade sa prevažne jedná o Microchip, Atmel a STMicroelectronic a Raspberry Pi. Pre zabezpečenie redundancie snímaných veličín stavov mobilných robotov môžu byť využité snímače relatívnej a absolútnej polohy ako gyroskopy, kompasy, akcelerometre, ultrazvukové a infračervené snímače, vhodné kamerové systémy alebo inkrementálne snímače natočenia jednosmerných motorov s prevodovkami. Pre vzdialené ovládanie a zber údajov sú využívané štandardné bezdrôtové komunikačné rozhrania ako Bluetooth (krátke vzdialenosti) a WiFi, Obr. 3.

Od zvoleného typu riadiaceho člena sa odvíja programové vývojové prostredie (MPLAB, Atmel Studio, Keil µVision). Aplikácie pre riadenie v rámci robota sú prevažne vytvárané v programovacom jazyku C/C++ a HMI aplikácie pre riadenie robotov môžu byť naprogramované v jazykoch C# a JAVA. V druhej modelovej aplikácii *A2* boli navrhnuté a skonštruované dvojkolesové mobilné roboty kategórie MiroSot pre pracovisko mobilnej robotiky a pásový mobilný robot TrackBot, Obr.4. Vytvorené pracovisko mobilnej



Obr 3. Laboratórne pracovisko pre riadenie a diagnostiku mobilných robotov – konceptuálna schéma

robotiky umožňuje riešiť rôznorodé úlohy diagnostiky ako napríklad detekciu chýb snímačov alebo akčných členov respektíve odhalenie neštandardných stavov systému. Tieto chyby a stavy je možné odhaliť na základe spájania údajov z redundantných snímačov umiestnených na mobilnom robote, prípadne s využitím kamerových systémov pracoviska [3], [21].

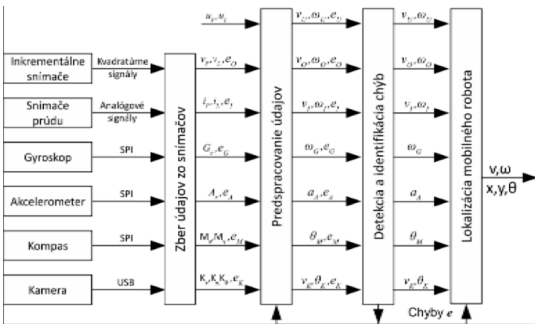


Obr 4. Mobilné roboty kategórie *MiroSot* [21], (http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/msp.php)

Metodika riešenia úloh *nedeštruktívnej diagnostiky* mobilných robotov vychádza z predpokladu, že uvažované mobilné roboty obsahujú redundantné snímače a k dispozícii sú referenčné/nominálne simulačné modely mobilných robotov (estimátory, virtuálne snímače) s cieľom zabezpečiť necitlivosť voči výskytu rôznych externých poruchových veličín, Obr.5.

S využitím známych akčných zásahov a na základe referenčných/nominálnych matematických modelov je možné odhadnúť bezporuchové chovanie sa mobilných robotov, ktoré slúži ako vzor pre odhaľovanie vopred neznámych poruchových javov pôsobiacich na systémy mobilného robota, [15]. Dáta zo snímačov mobilných robotov sú logované aj do databázy pre neskoršiu off-line diagnostiku a vyhodnocovanie kvality riadenia voči nominálnym modelom. Súčasne je možné vizualizovať ako 3D animáciu aj vzájomné porovnanie referenčného matematického modelu voči správaniu sa reálneho modelu [11], [25].

Prezentovanú navrhnutú metodiku diagnostiky je možné použiť napríklad v servisnej robotike, mobilných robotických systémoch s požiadavkou na zvýšenú spoľahlivosť prípadne s obmedzenou možnosťou servisu.



Obr 5. Bloková schémaviacúrovňového diagnostického systému mobilných robotov [15]

B. Riešenie úloh diagnostiky mechatronických systémov na báze plne aktuovaných a podaktuovaných systémov – modelové pracovisko

Oblasť riešenia úloh diagnostiky, ktoré sú zamerané na plne aktuované a podaktuované mechatronické systémy, je založená na návrhu metodiky modelovania, riadenia a simulácie mechatronických systémov s overením na typových modelových aplikáciách [4], [27].

To znamená, že riešenie úloh diagnostiky aktuovaných/podaktuovaných mechatronických systémov si vyžadovalo vytvorenie niekoľko nasledovných modelových aplikácii a to:

1. aplikácia obsahujúca postupy pre odvodenie matematických modelov pre jednotlivé typy mechatronických systémov na báze metód analytickej a experimentálnej identifikácie s navrhnutými vhodným algoritmami riadenia a ich simulácia v programovom prostredí Matlab/Simulink/aplikačné toolboxy, [6], [23],
2. aplikácia obsahuje realizáciu a testovanie navrhnutých algoritmov riadenia a diagnostiky na laboratórnych modeloch mechatronických systémov so senzorickým systémom, akčnými členmi (PLC automaty, jednočípové mikropočítače, technologické PC) a kamerovými systémami a ich následnú implementáciu do modelu DSR, [6], [13].

Diagnostika mechatronických systémov je založená na porovnávaní výsledkov získaných zo simulácie dynamiky matematických modelov mechatronických systémov s dynamikou získanou na základe dát zo snímačov v modelových aplikáciách. Pre riešenie úloh diagnostiky sú vzhľadom na charakter mechatronického systému využívané metódy online/offline experimentálnej identifikácie a rýchlej Fourierovej transformácie.

Modelové pracovisko vyvinuté pre riešenie úloh nedeštruktívnej diagnostiky mechatronických systémov je zostavené z laboratórnych modelov tvoriacich modelové aplikácie (klasické inverzné kyvadlo s lineárnym synchrónnym motorom [5], [6], [13], gulička na ploche [7], [22], hydraulický systém [8], [27], [29],), ktoré umožňujú implementovať navrhnutú metodiku modelovania, riadenia a diagnostiky vo vhodnom programovom prostredí, [22], [23].

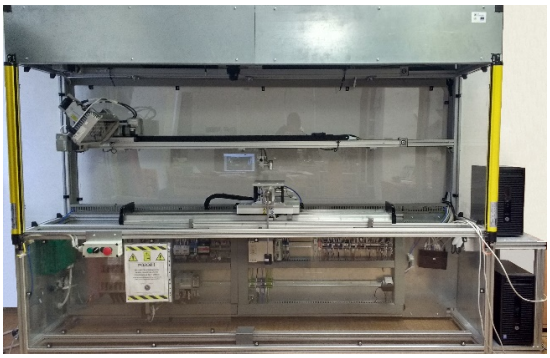
Modelová aplikácia - Multifunkčné pracovisko nedeštruktívnej diagnostiky s lineárnym synchrónnym motorom

Modelová aplikácia pozostávajúca z laboratórneho modelu jednoduchého klasického inverzného kyvadla so vstavaným lineárnym synchrónnym motorom (LSM) predstavuje inteligentný polohovací mechanický systém, ktorý umožňuje riešiť problémy presného umiestnenia v nestabilných mechanických zariadeniach, ako je napr. problém nákladu žeriavu, tj. manipuláciu s nákladom visiacom na lane s definovanými toleranciami hojdania [4], [5], [6].

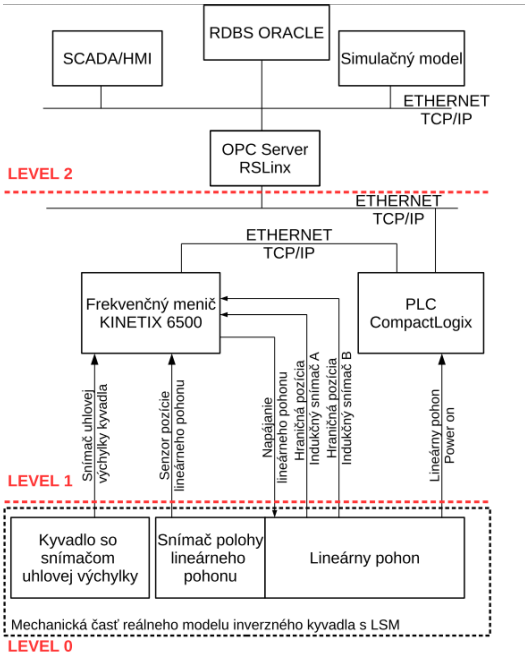
V modelovej aplikácii na Obr.6 je implementovaná metodika navrhnutá v [6], ktorá pozostáva z

matematického modelovania podaktuovaných mechatronických systémov a následnej simulácii v prostredí MATLAB / Simulink, rovnako ako aj z návrhu a implementácii algoritmov riadenia v hybridnej štruktúre pomocou priemyselného PC alebo PLC s následnou implementáciou do DSR, [13].

Aplikácia umožňuje vizualizáciu riadeného mechatronického systému v spojení so SCADA a ďalšími vyššími úrovňami infraštruktúry DSR (Obr. 1).



Obr 6. Multifunkčné pracovisko nedeštruktívnej diagnostiky s LSM (http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/multiKyv.php)



Obr 7. Implementácia laboratrneho modelu inverzného kyvadla s LSM do DSR [6]

Technické riešenie modelovej aplikácie bolo navrhnuté tak, aby odrážalo pyramidálnu infraštruktúru DSR. Jednotlivé subsystémy modelovej aplikácie sú analyzované s ohľadom na ich vzťah s definovanými úrovňami modelu DSR (Obr.7).

Úroveň modelov, senzorov a akčných členov je reprezentovaná mechanickou konštrukciou reálneho modelu inverzného kyvadla s LSM. Pozícia motora je snímaná inkrementálnym snímačom polohy s presnosťou 1000 impulzov/mm. Vozík je považovaný za súčasť pevnej časti motora (statora). Kvôli bezpečnosti sú koncové pozície statora snímané dvojicou indukčných snímačov.

Uhlová výchylka tyče kyvadla pripojenej k vozíku, je snímaná programovateľným uhlovým meničom KINAX - 2W2 s presnosťou 220 impulzov / stupeň (snímač IRC).

Na Technologickej úrovni riadenia je realizované riadenie polohy motora prostredníctvom servomotora KINETIX 6500 s frekvenčným meničom, ktorý je pripojený ku PLC automatu CompactLogix cez Ethernet. Vzhľadom k tomu, že stabilizácia systémov inverzných kyvadiel vyžaduje rýchle odozvy algoritmu riadenia, sú motor a snímače polohy kyvadla pripojené k programovateľným vstupom KINETIX 6500. Implementácia algoritmov riademia v rámci PLC automatov je vykonávanána pomocou programového prostredia RSLogix 5000.

Úroveň simulačných modelov a SCADA/HMI obsahuje simulačný model inverzného kyvadla s rýchlostným riadením, ktorý je implementovaný v prostredí MATLAB /Simulink. Parametre simulačného modelu sú určené buď meraním dostupných mechanických častí inverzného kyvadla (napríklad dĺžka tyče, hmotnosť závažia), alebo pomocou experimentálnej identifikácie. Využitím vhodných prístupov k návrhu algoritmov riadenia je vypočítaná postupnosť akčných zásahov a následne je táto postupnosť odosielaná do PLC automatu, ktorý zabezpečuje riadenie laboratórneho modelu v reálnom čase.

Prepojenie medzi *Úrovňou simulačných modelov* a *SCADA/HMI*, ktorá obsahuje simulačný model reálneho systému inverzného kyvadla (Matlab/Simulink) s *Technologickou úrovňou riadenia a regulácie* je realizované pomocou DDE/OPC protokolov s využitím nástroja RSLinx.

Navrhnutá metodika riadenia a diagnostiky závisí na znalosti parametrov modelu systému, získaných meraním alebo experimentálnou identifikáciou. Návrh a realizácia riadiacich algoritmov môže byť preto vykonávaná v reálnom čase, s vysokou presnosťou a pri dodržaní infraštruktúry DSR [13].

Ďalšou súčasťou *Multifunkčného pracoviska nedeštruktívnej diagnostiky* je kamerový systém so sadou vymeniteľných kamier, ktoré zahŕňajú termovízne kamery, riadkovú CCD kameru, plošnú čierno-bielu/farebnú CCD kameru a 3D kamery. Kamerový systém poskytuje dodatočné užitočné informácie o modeli systému, ako sú zmeny v teplote motora s ohľadom na veľkosť závažia a zmeny polohy komponentov modelu.

Rozšírenie pracoviska nedeštruktívnej diagnostiky o kamerové systémy umožňuje tiež monitorovanie povrchových chýb výrobku umiestneného na pohyblivom vozíku (pomocou rýchleho skenera založeného na plošnej kamere), a monitorovanie a klasifikáciu 3D objektov (prostredníctvom kombinácie riadkového lasera plošnej kamery, alebo pomocou 3D kamery), [11]. Predstavené modelové pracovisko nedeštruktívnej diagnostiky môže byť použité na riešenie širokého spektra úloh

modelovania, riadenia a diagnostiky technologických procesov.

Uvedená modelová aplikácia podaktuovaného systému jednoduchého inverzného kyvadla s LSM je z pohľadu kyber-fyzikálneho systému zaujímavá svojou hybridnou dynamikou. Samotný podaktuovaný systém inverzného kyvadla s LSM obsahuje spojitú dynamiku, avšak nie je možné ho riadiť pomocou jediného zákona riadenia na celom stavovom priestore, t.j. je potrebný návrh supervízneho hybridného riadenia, ktoré je zložené z výšvihového a stabilizačného algoritmu riadenia, ktorého výsledky sú zosumarizované v [6] a [13].

Ďalšie využitie modelovej aplikácie spočíva v modifikácii modelu kyvadla s LSM na model dvoj/linkových kyvadiel Acrobot a Pendubot čo predstavuje základ pre modelovanie jednoduchej kružidlovej chôdze a jej rozšírení, napríklad na model kružidlovej chôdze s kolenami [18].

Laboratórny model Výťah

Modelová aplikácia výťah je tiež začlenená do DSR na KKUI FEI TU, [26] (http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/vytah.php)

Úroveň modelov, senzorov a aktuátorov predstavuje mechanická časť pozostávajúca z kabíny, motora na ovládanie kabíny a jednotlivých snímačov.

Technologická úroveň riadenia a regulácie je reprezentovaná SLC automatom, ktorý riadi celý model výťahu. V modelovej aplikácii sa nachádza HSC modul, na ktorý je napojený IRC snímač snímajúci rýchlosť motora pre pohyb kabíny s presnosťou 400 impulzov na otáčku.

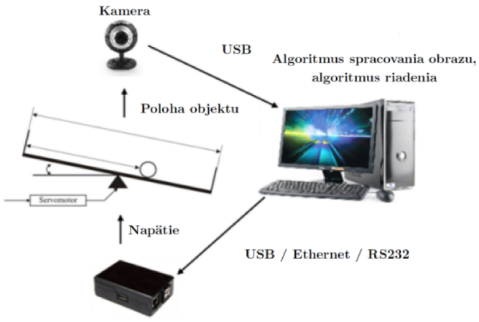
Úroveň simulačných modelov a SCADA/HMI v modelovej aplikácii predstavuje rozhranie SCADA/HMI a simulačný model modelovej aplikácie výťahu. Vyššie úrovne DSR predstavujú informačné systémy na úrovni RDBS ORACLE a multi-dimenzionálne databázy pre uvedenú aplikáciu. [16].

Modelová aplikácia výťah je ako kyber-fyzikálny systém zaujímavá z pohľadu modelovania a syntézy algoritmov riadenia hybridných systémov, nakoľko obsahuje časti so spojitou dynamikou (reguulácia rýchlosti kabíny), ako aj časti s diskrétnou dynamikou (výťah stojí, je v pohybe, je blokovaný). Konštrukcia modelovej aplikácie umožňuje realizáciu a testovanie algoritmov riadenia a diagnostiky DC motora v simulačných nástrojoch Matlab/Simulink a následné overenie s využitím SLC automatu. Algoritmy diagnostiky slúžia na monitorovanie stavu ložísk DC motora v mieste jeho uchytenia. Aplikácia súčasne umožňuje vizualizovať riadený mechatronický systém s väzbou na úroveň SCADA a vyššie úrovne informačného systému DSR, [16], [26].

Modelová aplikácia – inteligentná polohovacia plocha

Modelová aplikácia, ktorá obsahuje laboratórny model Guľôčka na ploche reprezentuje vo všeobecnosti inteligentný polohovací mechatronický systém na úrovni polohovateľnej plošiny s určením správania sa objektu nachádzajúceho sa na plošine.

Aplikácia umožňuje riešenie úloh matematického modelovania mechatronického systému, jeho simulácie v prostredí Matlab/Simulink a realizácie navrhnutých algoritmov riadenia pomocou Mikrokontrolera s diagnostikou v spojení s priemyselným PC. Modelová aplikácia súčasne umožňuje vizualizovať riadený mechatronický systém s väzbou na úroveň SCADA a vyššie úrovne informačných systémov DSR, (Obr.8).

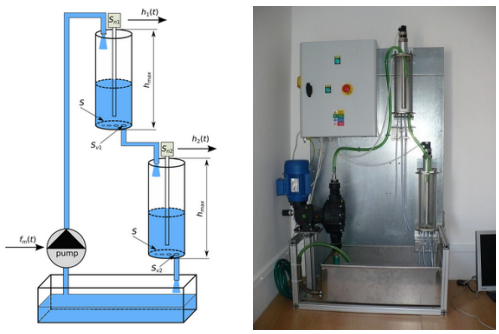


Obr 8. Laboratórne pracovisko inteligentnej polohovacej plochy – koncepčná schema (http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/gnk.php)

Komunikácia medzi laboratórnym modelom a PC je zabezpečená prostredníctvom jednočipového mikropočítača. Špecifické konštrukčné riešenie tejto modelovej aplikácie umožňuje realizáciu a testovanie navrhnutých algoritmov riadenia v rôznych programovacích jazykoch (C/C++/C#) a simulačných nástrojoch (Matlab/Simulink). Navrhnutý systém riadenia a diagnostiky modelovej aplikácie [22] je založený na znalosti parametrov riadeného systému, ktoré sú získané pomocou experimentálnej identifikácie a umožňujú porovnanie s matematickým referenčným/nominálnym modelom s využitím výstupu kamerového systému [7].

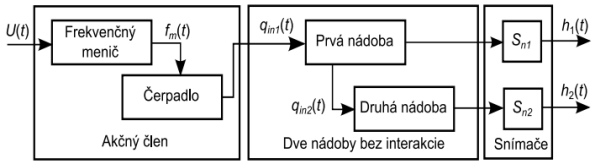
Modelová aplikácia - Hydraulický systém

Modelová aplikácia HS obsahujúca laboratórny model hydraulického systému vo všeobecnosti reprezentuje reálny systém, ktorý pozostáva zo sústavy dvoch valcových nádrží, ktoré sú zapojené v kaskáde za sebou (Obr.9, http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/hyd.php)

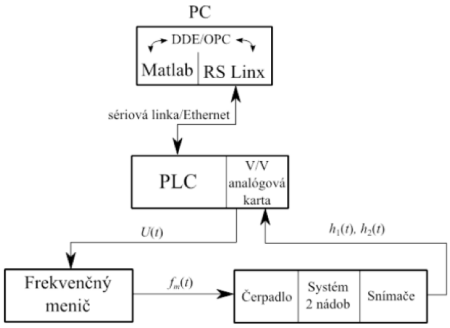


Obr 9 Laboratórne pracovisko pre riadenie a diagnostiku hydraulického systému

Kvapalina je pumpovaná do týchto nádrží z rezervoáru pomocou membránového čerpadla. Výška hladiny v oboch nádržiach je snímaná pomocou kapacitných snímačov Dinel, (Obr.10). Algoritmy riadenia môžu byť implementované priamo v PLC automate alebo nepriamo prostredníctvom pripojeného technologického PC, ktoré je súčasťou modelového pracoviska, pričom komunikácia je zabezpečená OPC/DDE rozhraním (Obr. 11).
Referenčný/nominálny matematický model tohto systému je možné získať pomocou metód analytickej alebo experimentálnej identifikácie s cieľom jeho využitia v návrhu algoritmov riadenia alebo diagnostiky laboratórneho modelu [8], [27], [29].



Obr 10 Štrukturálna schéma hydraulického systému



Obr 11. Komunikačná bloková schéma pre laboratórny model hydraulického systému

Cieľom tejto modelovej aplikácie hydraulického systému je overenie metód a návrh algoritmov diagnostiky vzhľadom na špecifický charakter tohto systému, nakoľko z pohľadu diagnostiky je dôležité ošetrenie kritických hodnôt sledovaných veličín hydraulického systému, ktoré by mohli viesť k havarijnému stavu počas prevádzky, [23].
Model hydraulického systému je možné prepísať do hybridného po častiach afinného tvaru PWA, čím sa docieli lineárna aproximácia nelineárneho dynamického systému v celom stavovom priestore, teda nielen v okolí pracovného bodu. Nakoľko PWA systémy sú vhodné na lineárnu syntézu algoritmov riadenia, tým ďaleko prevyšujú nelineárnu reprezentáciu dynamických systémov, pre ktoré neexistuje jednoduchý návrh algoritmov riadenia [17]. Opísaný prístup v modelovaní hydraulického systému ako hybridného systému typu PWA poukazuje na ďalšiu možnosť využitia laboratórneho modelu v modelovej aplikácii pri riešení výskumných úloh zameraných na hybridné systémy.

C. Flexibilné výrobné systémy, automatizované a robotizované výrobné linky

Modelová aplikácia zahŕňajúca laboratórne modely výrobných liniek, konkrétne Pružný výrobný systém (PVS) a Flexibilný montážny podnik (FMP) s robotickým ramenom Mitsubishi MELFA RV-2SDB (RR) [9], umožňuje realizovať úlohy nedeštruktívnej diagnostiky na základe referenčných matematických modelov získaných pomocou metód pre popis systémov s diskrétnymi udalosťami a to Petriho sietí [1] a grafov prechodov [10], s cieľom modelovať výrobný proces.
V návrhu distribuovaného systému riadenia výrobných liniek PVS a FMP je možné implementovať všetkých 5 úrovní pyramidálneho modelu DSR na Obr. 1.

Distribuované systémy riadenia laboratórnych modelov výrobných systémov

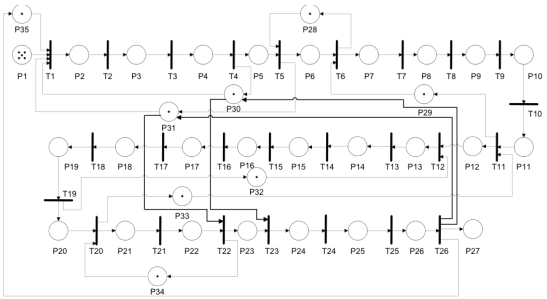
Výrobné linky PVS a FMP sú riadené pomocou PLC automatov Compact Logix, pričom snímače (optické, feromagnetické, laserové) a akčné členy (krokové motory, jednosmerné motory, pneumatické pohony) v jednotlivých manipulátoroch na postoch sú prepájané viacerými druhmi komunikačných sietí a protokolov (Ethernet, Ethernet/IP, ASi, ProfiBus, DeviceNet, FireWire, RS-232), [1], [9].
Riadenie modelov na úrovni SCADA/HMI je možné priamo prostredníctvom dotykového panelu Panel View Plus s vizualizáciou na báze FT View alebo na technologickom PC so systémom InTouch. Dáta získané z technologickej úrovne riadenia cez OPC server sú ukladané do relačných Oracle databáz pre zabezpečenie funkcionalít *riadenia výroby* (Enterprise Resource Planning- ERP/ *rozvrhovanie zdrojov* (Manufacturing Resource Planning - MRP), nad ktorými sú vytvorené multidimenzionálne databázy pre manažérsku úroveň riadenia pomocou OnLine Analytical Processing technológie v nástrojoch Oracle Discoverer, Analytic Workspace Manager, Oracle Bussiness Intelligence. Tieto nástroje využívajú údaje z výroby uložené v relačnej databáze, transformujú ich do multidimenzionálnej podoby a poskytujú možnosť rôznych uhlov pohľadu na tieto dáta. Tieto pohľady umožňujú realizovať veľké množstvo analýz, z ktorých je možné vyčítať množstvo informácií o výrobe (množstvo nepodarkov, čas výroby, prestoje na linke, efektívnosť produkcie) potrebných pre následnú optimalizáciu výrobného procesu, [28].
Zároveň obidva laboratórne modely výrobných liniek tvoriace modelové pracovisko pre nedeštruktívnu diagnostiku obsahujú post využívajúci kamerové systémy (farebné, čiernobiele) pre úlohy rozpoznávania obrazov a tvarov pričom na základe referenčného matematického modelu s dostatočnou presnosťou a parametrov snímačov je možné určiť kvalitu riadenia daného výrobného procesu. Vo všeobecnosti platí, že čím je referenčný model presnejší, tým je možné diagnostikovať viac možných chýb v prebiehajúcom výrobnom procese, [14].

Modelovanie výrobných liniek pomocou Petriho sietí

Metodológia pre popis systémov s diskrétnymi udalosťami s využitím Petriho sietí, ktoré sú definované

ako bipartitný orientovaný graf obsahujúci dva typy uzlov (miesta a prechody) môže byť použitá pre modelovanie výrobných liniek. Vytvorenie modelu pomocou Petriho sietí pozostáva z modelovania hlavných a vedľajších činností, zásobníkov a cyklenia výroby, pričom príklad pre laboratórny model PVS s využitím programového prostredia CPNtools je znázornený na Obr. 12, [28].

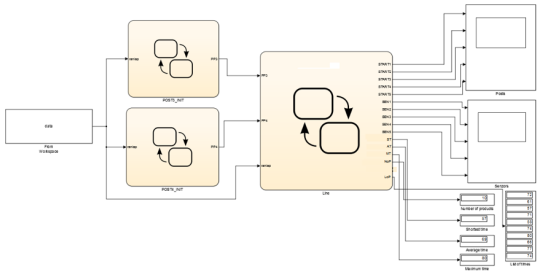
Po zadefinovaní počiatočných stavov je tento matematický model možné vyjadriť aj v maticovej forme, ktorá je vhodná pre implementáciu do simulačného prostredia Matlab pre časovú optimalizáciu prechodov medzi stavmi výrobného procesu [20].



Obr 12. Flexibilný montážny podnik (FPS) – Petriho sieť [28].

Modelovanie výrobných liniek pomocou Stateflow diagramov

Alternatívou k referenčnému modelu popísaného metódou Petriho sietí je zostavenie modelu výrobnej linky s využitím stavových diagramov a jeho následná implementácia do simulačného prostredia Matlab/Simulink s využitím aplikačného toolboxu Stateflow [12]. Ako príklad je uvedený simulačný model FMP znázornený na Obr. 13. V prípade FMP prvé dva bloky zabezpečujú inicializáciu a tretí modeluje výrobný proces na výrobnej linke [14].



Obr 13. Pružný výrobný systém - Stateflow model (http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/pvs.php)

Nedeštruktívna diagnostika výrobných liniek

Referenčný matematický model popisuje stavy a prechody výrobnej linky, čím popisuje požadované správanie sa zariadenia počas výrobného procesu. V rámci diagnostiky je možné pomocou referenčného matematického modelu identifikovať úzke, resp. kritické miesta výrobného procesu alebo určiť optimálne časy jednotlivých podprocesov. Program v PLC automate sníma prechody medzi stavmi výrobného procesu v čase a ak sa dáta zosnímané pomocou vstavaných snímačov líšia voči referenčným hodnotám, je možné včas zachytiť vznikajúcu poruchu prípadne upraviť akčný zásah pre jej potlačenie. Zavedením dodatočných kamerových systémov je možné rozšíriť možnosti už existujúcej diagnostiky a odhaliť aj chyby vo výrobnom procese spôsobené opotrebením akčných členov, náhodných dejov a podobne. Ako príklad je možné uviesť použitie termokamery pre odhalenie nežiadúceho trenia alebo prehrievania motorov akčných členov, ktoré nie je možné zachytiť vstavanými senzormi a ani voľným okom. (Obr.14).

Obr 14 Flexibilný montážny podnik laboratórny model – kamerový post (http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/fmp.php)

III. ZÁVER

Predkladaný článok zahŕňa popis výskumných aktivít Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky (CMMRaPI – kyb.fei.tuke.sk) počas riešenia podaktivity 3.1/PP7 projektu TECHNICOM. Obsahuje taktiež popis prostriedkov, prístupov a technológii zameraných na sledovanie, riadenie a diagnostiku s možnosťou sledovania kvalitatívnych parametrov výrobkov v technologickom procese ich výroby. Ide o komplexný systém meraní a diagnostiky statických a dynamických parametrov jednotlivých častí technologických procesov nedeštruktívnymi metódami s cieľom riadenia kvality výrobnej produkcie. Tieto systémy, okrem iného, využívajú laserovú technológiu, kamerové systémy pracujúce na širokom frekvenčnom spektre (termovízne kamery, čiernobiele kamery, farebné kamery) v rôznych vyhotoveniach (rýchle riadkové kamery, plošné 2D kamery, 3D kamery) s programovo nastaviteľným osvetlením z hľadiska intenzity osvetlenia, uhla nasvietenia a spektra osvetlenia (od červeného spektra, cez zelené až po modré svetlo).

Súbor uvedených senzorov je riešený v kombinácii s mechatronickými systémami (roboty, manipulátory, dopravníky a pod.), ktoré určujú vzájomnú polohu senzorov a podmienky merania tak, aby sa zachytili požadované statické a dynamické parametre výrobku, alebo výrobného procesu.

Uvedené senzory a mechatronické časti obyčajne zahŕňajú vlastné počítačové riadiace systémy čo umožňuje ich integráciu do informačných a riadiacich

systémov výrobných prevádzok zahŕňajúcich PLC riadenie, modely výroby, SCADA systémy, relačné databázové systémy a pod.

Pre vytvorenie systému sledovania kvality v laboratórnych podmienkach sme zvolili taký prístup, pri ktorom pre súbor vytypovaných modelových aplikácií (Multifunkčné pracovisko nedeštruktívnej diagnostiky, hydraulický systém, inteligentná polohovacia plocha, výrobné linky, pracovisko mobilnej robotiky a pod.) boli vytvorené matematické modely, ktoré boli odsimulované a fyzicky zrealizované s použitím reálnych snímačov a akčných členov a riadiacich systémov tak, aby sa vyskúšala funkcionalita daného modelu z hľadiska statických a dynamických vlastností ako aj väzieb na iné informačné a riadiace systémy na úrovni štandardných technických a programových rozhraní. Jedná sa teda o súbor hardvérových a softvérových aplikačných stavebnicových modulov na úrovni modelových aplikácií s otvorenými komunikačnými väzbami na rôzne úrovne riadiaceho systému (úroveň PLC, úroveň relačných databáz a pod.) so vzorovými aplikáciami na vybraných modeloch. Výhodou ponúkaných riešení je to, že sa jedná o systém postavený na báze komerčne dostupných komponentov s otvorenou architektúrou a metodikou, ktorá umožňuje užívateľsky prijateľným spôsobom integrovať prvky sledovania kvality do existujúceho informačného a riadiaceho systému.

Môžeme konštatovať, že výstupom projektu je *funkčné experimentálno-vývojové pracovisko* tvorené súborom laboratórií „*Centra nedeštruktívnej diagnostiky technologických procesov so štandardným vybavením pre riadenie a komunikáciu*“, vhodné na riešenie úloh modelovania, riadenia a diagnostiky aktuovaných /podaktuovaných systémov, systémov mobilnej robotiky a výrobných systémov nedeštruktívnymi technikami. (http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/miest/miest.php).

Pracovisko má modulárny charakter a zahŕňa technické, programové a sieťové prostriedky pre overenie navrhnutej metodiky riadenia a diagnostiky pri riešení špecifických problémov. Transformácia výstupov riešenia projektu do praxe bude spočívať v aplikácii vytvorenej metodiky riešenia širokého spektra úloh integrovanej priemyselnej výroby v súlade s konceptom Industry 4.0 spolu s technickou podporou.

POĎAKOVANIE

Príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a inovácie pre projekt: Univerzitný vedecký park TECHNICOM pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií - II. fáza, ITMS2014+: 313011D232, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

REFERENCES

[1] J. Jadlovský, M. Čopík a P. Papcun, *Distribuované systémy riadenia*, elfa Košice, 2013, 215 s., ISBN 978-80-8086-227-5

[2] J. Čerkala and A. Jadlovská, “Dynamics with Friction in Mobile Robot Simulink Model,” in *Technical Computing Bratislava 2014 Proceedings* - Saarbrücken : Lap Lambert Academic Publishing, 2015, pp. 65-81. - ISBN 978-3-659-40792-5

[3] J. Jadlovský and M. Kopčík, “Basic Motion Control of Differential-Wheeled Mobile Robot ALFRED,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing: Emergent Trends in Robotics and Intelligent Systems* - Switzerland: Springer, Vol. 316, 2015, pp. 73-80. ISSN 2194-5357

[4] A.Jadlovská and S. Jadlovská, *Moderné metódy modelovania a riadenia nelineárnych systémov*, elfa Košice, 2013, 257 p., ISBN 978-80-8086-228-2

[5] S. Jadlovská, J. Sarnovský, J. Vojtek and D. Vošček, “Advanced Generalized Modelling of Classical Inverted Pendulum Systems,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing: Emergent Trends in Robotics and Intelligent Systems* - Switzerland: Springer, 2014 Vol. 316, 2015, pp 255-264. - ISSN 2194-5357

[6] S. Jadlovská, “*Modelovanie a optimálne riadenie nelineárnych podaktuovaných dynamických systémov*”, Dizertačná práca, (školiteľ: prof. Ing. J. Sarnovský, Csc.), FEI TU Košice, 2015, s. 230

[7] M. Oravec and A. Jadlovská, “Model Predictive Control of Ball and Plate Laboratory Model,” in SAMI 2015. - Danvers: IEEE, 2015 pp. 165-170. - ISBN 978-1-4799-8220-2

[8] J. Čerkala and A. Jadlovská, “Methodology for Experimental Identification of the Laboratory Hydraulic System,” in *Annals of Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering*, Vol. 12, No. 3, 2014, pp. 33-40. - ISSN 1584-2665

[9] P. Papcun and J. Jadlovský, “Mathematical Model of Robot Melfa RV-2SDB,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing: Emergent Trends in Robotics and Intelligent Systems* - Switzerland: Springer, Vol. 316, 2015, pp. 145-154. ISSN 2194-5357

[10] J. Čabala and J. Jadlovský, “Solving Vector Optimization Problems Using Optimization Toolbox,” in *Technical Computing Bratislava 2014 Proceedings* - Saarbrücken: Lap Lambert Academic Publishing, 2015 pp. 45-64. - ISBN 978-3-659-40792-5

[11] J. Jadlovský, M. Varga and M. Kopčík, “Image Processing for Localization of Mobile Robots,” in *Electrical Engineering and Informatics 6: Proceedings of the FEE and Informatics of the TU of Košice*, FEI TU, 2015, pp. 574-577, ISBN 978-80-553-2178-3

Bola to (4 v SAMI) – od (12 – nove publikacie)

[12] J. Čabala and J. Jadlovský, “Application of Stateflow Diagrams in Production Line Modeling,” In: SAMI 2016. - Danvers : IEEE, 2016 S. 125-130. - ISBN 978-1-4673-8739-2

[13] A. Jadlovská, S. Jadlovská, D. Vošček, “Cyber-physical system implementation into the distributed control system”. In: ScienceDirect : IFAC-PapersOnLine. - Amsterdam : Elsevier, 2016 Vol. 49, No. 25 (2016), p. 031-036. - ISSN 2405-8963

[14] J. Jadlovský et al., “Modelovanie, diagnostika a optimalizácia výrobných liniek”. In: Strojárstvo. Roč. 21, č. 11 (2017), s. 104-106. - ISSN 1335-2938

[15] A. Jadlovská et al., “Návrh metodiky pre modelovanie, riadenie, simuláciu a nedeštruktívnu diagnostiku mobilných robotov”. In: Strojárstvo / Strojírenství. (2017), s. 1-10. - ISSN 1335-2938

[16] D. Vošček, A. Jadlovská, D. Grigľák, “Modelling and Analysis of the Lift System as a Hybrid System”. In: Acta Electrotechnica et Informatica. Vol. 17, No. 4 (2017), pp. 28-34. - ISSN 1335-8243

[17] D. Vošček, A. Jadlovská, “Modelling and control of a cyber-physical system represented by hydraulic coupled tanks”. In: SAMI 2017. - Danvers : IEEE, 2017 pp. 439-444. - ISBN 978-1-5090-5654-5

[18] S. Jadlovská, L. Koska, M. Kentoš, “MATLAB-based Tools for Modelling and Control of Underactuated Mechanical Systems”. In: Transactions on Electrical Engineering. Vol. 6, No. 3 (2017), p. 56-61. - ISSN 1805-3386

[19] J. Čerkala, A. Jadlovská, “Application of Neural Models as Controllers in Mobile Robot Velocity Control Loop”. In: Journal of Electrical Engineering. Vol. 68, No. 1 (2017), pp. 39-46. - ISSN 1335-3632

[20] J. Čabala and J. Jadlovský, “Solving Optimal Assembly Line Configuration Task by Multi-objective Decision Making Methods,” In: Acta Electrotechnica et Informatica. Vol. 17, No. 2 (2017), pp. 53-60. - ISSN 1335-8243

[21] M. Kopčík and J. Jadlovský, “Embedded Control System for Mobile Robots with Differential Drive”. In: Acta Electrotechnica et Informatica. Vol. 17, No. 3 (2017), pp. 42-47. - ISSN 1335-8243.

[22] M. Oravec and A. Jadlovská, "Intelligent positioning plate predictive control and concept of diagnosis system design". In: Journal of Manufacturing and Industrial Engineering (MIE). -Vol. 15, No. 1-2 (2017), pp. 1-9. - ISSN 1339-2972

[23] M. Oravec and A. Jadlovská, "Sensors fault diagnosis algorithm design of a hydraulic system".In: Acta Electrotechnica et Informatica. Vol. 17, No. 2 (2017), pp. 30-37. - ISSN 1335-8243

[24] J. Čerkala, "*Modelovanie a riadenie mobilných robotov s využitím neurónových modelov*", Dizertačná práca (školiteľ: doc. Ing. A. Jadlovská, PhD.), FEI TU Košice, 2017, s. 299

[25] M. Kopčík, "*Vytvorenie metodiky pre diagnostiku senzorických systémov v rámci distribuovaného systému riadenia so zameraním na mobilnú robotiku*", Dizertačná práca, (školiteľ: doc. Ing. J. Jadlovský, CSc.), FEI TU, 2018, s. 127

[26] N. Ferenčík, Návrh a realizácia laboratórneho modelu – výťah, Diplomová práca (vedúci DP: doc. Ing.J. Jadlovský CSc.), FEI, TU, 2016

[27] Š. Jajčišin, Š. a A. Jadlovská, "*Návrh algoritmov prediktívneho riadenia s využitím nelineárnych modelov fyzikálnych systémov*", 1. vyd - Košice : elfa – 2013, 139 s., ISBN 978-80-8086-229-9

[28] M. Čopík, "*Metodika návrhu a realizácie výrobných liniek s ohľadom na optimalizáciu času výroby*", Dizertačná práca, (školiteľ: doc. Ing. J. Jadlovský, CSc.), FEI TU, 2014

[29] Š. Jajčišin a A. Jadlovská, "Riadenie laboratórneho modelu hydraulického systemu", In: Electroscope – online časopis pro elektrotechniku, ročník 2011, číslo III. ISSN 1802-4564,