

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky

QuoVadis Research @ FEI



ročník 3, číslo 1
Februar 2020

ISSN 2585-9587

Obsah

| | |
|---|--------|
| Nepriama Optimalizácia Nastavenia Valcovacích Medzier Profilovej Valcovacej Trate | |
| <i>Tomáš Borovský, František Ďurovský</i> | 4-12 |
| Natural User Interfaces of Computer Systems and Their Evaluation | |
| <i>Lukáš Galko, Jaroslav Porubán</i> | 12-19 |
| Výskum vplyvu inteligentných sietí na distribučnú sústavu | |
| <i>Michal Ivančák, Juraj Kurimský</i> | 19-28 |
| Hierarchical Text Classification with Convolutional Neural Networks | |
| <i>Milan Krendzelak, František Jakab</i> | 28-35 |
| Analýza vlastností experimentálneho hybridného FSO/RF systému | |
| <i>Michal Márton, Ľuboš Ovseník</i> | 35-41 |
| Cognitive Healthcare Platform – Case Study based on Quality-Enabled Decentralized IoT Architecture | |
| <i>Jozef Mocnej, Iveta Zolotová</i> | 41-48 |
| Modelovanie synchronizačných problémov kompozície komponentov pomocou Petriho sietí a lineárnej logiky | |
| <i>Ján Perháč, Valerie Novitzká</i> | 48-55 |
| Porovnanie impulzového a M-sekvenčného UWB radaru pre odhad hrúbky steny | |
| <i>Miroslav Repko, Ján Gamec</i> | 55-61 |
| Integrovaný UWB radar emitujúci M-postupnosť na báze ASIC obvodov | |
| <i>Stanislav Slovák, Pavol Galajda</i> | 61-68 |
| Vývoj pohonu so spínaným reluktančným motorom | |
| <i>Ľuboš Suchý, Želmíra Ferková</i> | 68-80 |
| Riadenie šmyku robotickej platformy s využitím kamerových systémov | |
| <i>Róbert Üveges, František Ďurovský</i> | 80-90 |
| Hybridné modely kyber-fyzikálnych systémov a ich aplikácia v rámci distribuovaného systému riadenia | |
| <i>Dominik Vošček, Anna Jadlovská</i> | 90-104 |

Hybridné modely kyber-fyzikálnych systémov a ich aplikácia v rámci distribuovaného systému riadenia

Ing. Dominik Vošček

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Technická univerzita, Košice

dominik.voscek@tuke.sk

doc. Ing. Anna Jadlovská, PhD.

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Technická univerzita, Košice

anna.jadlovaska@tuke.sk

Abstrakt—Tento článok prezentuje prehľad dosiahnutých výsledkov počas trvania doktorandského štúdia, ktoré sú komplexne spracované v rámci dizertačnej práce *Hybridné modely kyber-fyzikálnych systémov a ich aplikácia v rámci distribuovaného systému riadenia*. Hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh metodiky pre modelovanie, analýzu a riadenie hybridných systémov v kontexte kyber-fyzikálnych systémov s ich následnou implementáciou do distribuovaného systému riadenia, ktorá pozostáva z vybraných metód a algoritmov riadenia. Navrhnutá metodika je v rámci dizertačnej práce overená s využitím simulačných a reálnych modelových aplikácií tvoriacich experimentálne pracovisko, ktoré je súčasťou Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky na KKUI FEI TU v Košiciach ako aj experimentu ALICE CERN. Metodika a overenie jej návrhu je spracované v dizertačnej práci v štyroch scenároch a dvoch výskumných úlohach experimentu ALICE CERN. Softvérový výstup dizertačnej práce je implementovaný v prostredí *MATLAB/Simulink*, v jazyku C++ a v nástroji WinCC OA.

Kľúčové slová—modelovanie, experimentálna identifikácia, hybridný systém, optimálne riadenie, optimalizácia krdľa častíc, explicitné prediktívne riadenie, supervízne riadenie, distribuovaný systém riadenia, detector control system

Abstrakt—This article presents an overview of the results achieved during the doctoral studies, which is comprehensively elaborated within the thesis *Hybrid models of cyber-physical systems and their application within distributed control system*. The main aim of the thesis is to design a methodology for modeling, analysis and control design of hybrid systems in the context of cyber-physical systems with their subsequent implementation into the distributed control system that consists of selected control methods and algorithms. The proposed methodology is validated within the thesis using simulation and laboratory model applications forming an experimental workplace, which is a part of the Center of Modern Control Techniques and Industrial Informatics at KKUI, FEI, TU in Košice as well as at ALICE CERN experiment. The methodology and its verification is elaborated in the thesis within four case studies and two research tasks at the ALICE CERN experiment. The software output of the thesis is implemented in the simulation environment *MATLAB/Simulink*, in C++ language and in WinCC OA application.

Index Terms—modeling, experimental identification, hybrid system, optimal control, particle swarm optimization, explicit model predictive control, supervisory control, distributed control system, detector control system

I. ÚVOD

Kyber-fyzikálne systémy (CPS) je možné definovať ako integrálnu súčasť fenoménu Industry 4.0 pričom spájajú fy-

zické a výpočtové procesy systému a postupne si zabezpečujú vedúce postavenie v oblasti integrovaných systémov s významným ekonomickým a sociálnym dopadom [1]. CPS prispievajú rozhodujúcim spôsobom k riešeniu spoločenských výziev, akými sú napr. zlepšenie zdravotnej starostlivosti, zvládanie starnúceho obyvateľstva, podpora prechodu na obnoviteľné zdroje energie, zmena klimatických podmienok, plánovanie inteligentných miest a iné. Mnohé z týchto oblastí sú kľúčom k riešeniu spoločenských výziev ako v súčasnosti, tak aj v budúcnosti [2].

Zvládnutie návrhu, analýzy a implementácie komplexných CPS je dôležité aj preto, aby jednotlivé priemyselné odvetvia boli schopné implementovať obchodné modely založené na CPS. Súčasná CPS sú však často navrhované a udržiavané s neznámymi rizikami a vysokými nákladmi. Z tohto pohľadu je možné definovať v oblasti CPS mnoho výskumných výziev, medzi inými napríklad:

- analýza a návrh architektúry CPS,
- bezpečnosť CPS,
- robustnosť CPS,
- verifikácia CPS,
- **modelovanie a riadenie hybridných systémov (HS) v kontexte CPS.**

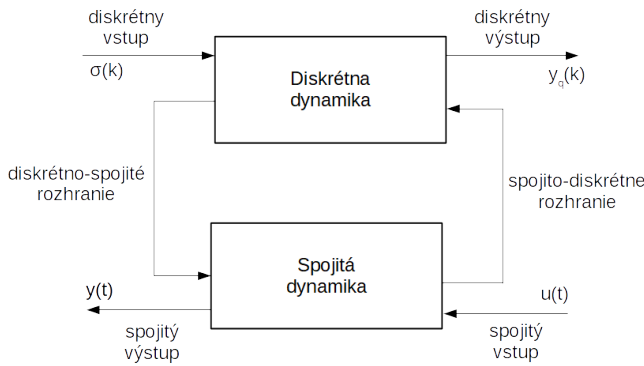
V tomto článku sa budeme zaoberať návrhom metodiky pre modelovanie a riadenie HS v kontexte CPS v rámci modelových aplikácií na KKUI FEI TU a experimentu ALICE CERN, čo predstavuje jednu z uvedených výziev CPS.

Výskum v oblasti HS poskytuje modelovaciu platformu pre CPS a systematické metódy potrebné na ich návrh, analýzu a verifikáciu [3].

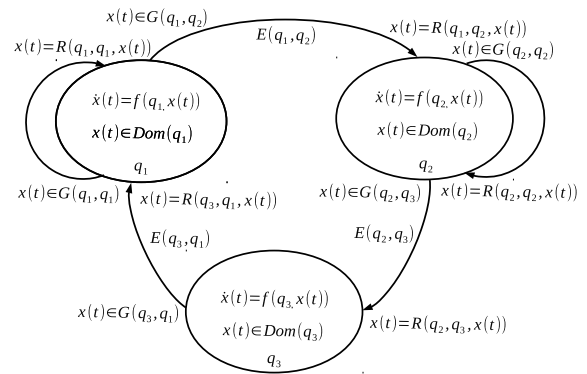
Hybridné systémy predstavujú komplexné systémy, ktoré obsahujú spojitú dynamiku so vstupom $u(t)$ a výstupom $y(t)$ (modelovanú napríklad diferencnými alebo diferenciálnymi rovnicami), diskretnú dynamiku so vstupom $\sigma(t)$ a výstupom $q(t)$ (Petriho siete, konečné stavové automaty) a ich rozhrania [4]. Túto štruktúru je možné vidieť na Obr. 1.

II. HYBRIDNÉ AUTOMATY

Jedným zo základných matematických modelov na popis hybridných systémov je reprezentácia v tvare hybridného automatu, ktorá je rozšírením formalizmu konečných stavových



Obr. 1: Základná štruktúra hybridného systému [5]



Obr. 2: Grafická reprezentácia hybridného automatu

automatov o spojitú dynamiku v jednotlivých diskretných stavoch [6].

Hybridný automat si je teda možné predstaviť ako n -tícu $H = (Q, X, f, \text{Init}, \text{Dom}, E, G, R)$, kde:

- Q predstavuje konečnú množinu stavov, ktorá môže nabíadať hodnoty $\{q_1, q_2, \dots, q_{max}\}$,
- $X \subseteq \mathbb{R}^n$ je stavový priestor, v ktorom sa vyvíja spojitá dynamika hybridného automatu H ,
- $f: Q \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, definuje spojitý priebeh vývoja spojitého stavového vektora $\mathbf{x}(t)$ v stave q ,
- $\text{Init} \subseteq Q \times X$ určuje množinu možných počiatkových stavov,
- $\text{Dom} : Q \rightarrow 2^X$ predstavuje pre $\forall q \in Q$ oblasť v stavovom priestore $\text{Dom}(q) \subseteq X$, v rámci ktorej je možný vývoj spojitého stavu systému $\mathbf{x}(t)$,
- množina hrán $E \subseteq Q \times Q$, predstavuje také páry (q_i, q_j) medzi ktorými je možný prechod,
- hraničné podmienky prepnutia, ktoré priradia každej hrane $(q_i, q_j) \in E$ množinu $G(q_i, q_j)$, pre ktorú je definovaný prechod spojitého stavu $\mathbf{x}(t)$ zo stavu q_i do stavu q_j ,
- množina prechodov $R: E \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, ktorá definuje pre každú hranu $(q_i, q_j) \in E$ a spojitý stav $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ skok spojitého stavu počas prechodu zo stavu q_i do stavu q_j [7].

Stav hybridného automatu H je možné teda určiť ako ako dvojicu prvkov $(q, \mathbf{x}(t)) \in Q \times \mathbb{R}^n$, kde $\mathbf{x}(t) \in X$ a $q \in Q$.

A. Grafická reprezentácia hybridného automatu

V mnohých prípadoch je vhodné znázorniť HS ako orientovaný graf. Vrcholy grafu predstavujú jednotlivé diskretné stavy $q \in Q$ a hrany E definujú jednotlivé možné prechody medzi týmito diskretnými stavmi. Každý vrchol je popísaný pomocou množiny počiatkových stavov Init , spojitkej dynamiky f a oblasti, v ktorej sa daný systém vyvíja Dom . Každý hrane G sa priradí podmienka prepnutia R a prechodová funkcia hybridného automatu [8]. Grafické znázornenie daného popisu orientovaného grafu je ukázané na Obr. 2.

III. NÁVRH METODIKY PRE MODELOVANIE, ANALÝZU A RIADENIE HS S VIACERÝMI SPOJITÝMI DYNAMIKAMI

Pre CPS, ktoré je možné popísať pomocou matematického aparátu hybridných systémov bola navrhnutá metodika, ktorá zahŕňa dve skupiny hybridných systémov, a to:

- hybridné automaty s definovanou spojitou dynamikou v každom diskretnom stave a
- hybridné automaty s diskretnými stavmi bez definovanej spojitkej dynamiky.

Pre obidve skupiny hybridných systémov pozostáva metodika z troch hlavných modulov:

- **Modelovanie HS** - modul slúži na vytvorenie matematickej reprezentácie CPS a ich následnej úprave do tvaru vhodného pre nasledovnú analýzu a návrh riadenia
- **Analýza HS** - modul sa zaoberá analýzou a verifikáciou CPS v už vytvorenej matematickej reprezentácii HS
- **Riadenie HS** - modul používa výstupy predošlých modulov na návrh algoritmov riadenia zabezpečujúcich požadované správanie HS v kontexte CPS

Nakoniec po aplikovaní týchto troch modulov na CPS je možné dosiahnuté výstupy modulov aplikovať priamo na HS v rámci distribuovaného systému riadenia.

Modul **Modelovanie** ako taký pozostáva zo štyroch krokov:

- **M1** - tento krok predstavuje zadefinovanie jednotlivých prvkov n -tice hybridného automatu tak ako boli uvedené v časti II. Zároveň správna realizácia tohto kroku predstavuje dôležitý predpoklad správneho definovania dynamiky celého CPS v podobe hybridného systému.
- **M1.1** - tento krok je obzvlášť vhodný pre hybridné systémy bez definovanej spojitkej dynamiky v niektorých diskretných stavoch, nakoľko pomocou lineárnej temporálnej logiky sa dajú charakterizovať takéto systémy.
- **M2** - nasledujúci krok navrhutej metodiky zahŕňa vytvorenie orientovaného grafu prechodov hybridného systému, pričom tento graf slúži na jednoduchšiu čitateľnosť správania sa celého systému ako celku ale aj na odhalenie nezrovnalostí a nesprávne zadefinovaných prvkov n -tice hybridného automatu.
- **M3** - v rámci tohto kroku je odvodená lineárna aproximácia spojitkej dynamiky tých diskretných stavov, v ktorých

uvažujeme návrh algoritmov riadenia vychádzajúcich z lineárnej syntézy.

M4 - niektoré algoritmy riadenia sú využívané kvôli svojej zložitosti len v rámci systémov s dynamikou definovanou v diskretnom čase, t.j. na základe periódy vzorkovania, napr. explicitné prediktívne riadenie založené na modeli. Na základe tohto predpokladu je v tomto kroku vytvorená lineárna aproximácia spojitej dynamiky v diskretnom čase pre jednotlivé diskkrétne stavy.

Po vytvorení matematickej reprezentácie CPS v podobe hybridného systému je nutné túto matematickú reprezentáciu validovať a následne analyzovať vlastnosti hybridného systému s ohľadom na nasledovné kroky metodiky.

Nasledujúci modul **Analýza** je zložený zo štyroch krokov:

A1 - tento krok predstavuje implementáciu matematickej reprezentácie CPS v podobe HS do zvoleného programového prostredia. Pre systémy s definovanou spojitou dynamikou v každom diskretnom stave bolo zvolené využitie s-funkcií simulačného prostredia MATLAB/Simulink a aplikačného toolbox-u HYSDEL. Pre systémy s diskretnými stavmi bez spojitej dynamiky sme zvolili implementáciu v rámci aplikačného toolbox-u Stateflow simulačného prostredia MATLAB/Simulink.

A2 - po vykonaní implementácii HS prebehne analýza a porovnanie matematických reprezentácií spojitej dynamiky diskretných stavov v nelineárnej a lineárnej podobe v okolí vypočítaného ustáleného stavu.

A3 - Validácia HS ako celku prebieha na základe analýzy v otvorenom regulačnom obvode.

A4 - posledný krok modulu **Analýza** hybridných systémov zahŕňa vytvorenie fázových portrétov ako pre nelineárnu tak aj pre lineárnu spojité dynamiku a vyšetrovanie správania sa HS v rámci jednotlivých diskretných stavoch.

Následne po úspešnej validácii matematickej reprezentácie CPS v podobe HS a následnej analýze systému je možné navrhnúť vybrané metódy a algoritmy riadenia na uvažovaný CPS v rámci modulu **Riadenie**.

Modul **Riadenie** pozostáva z troch krokov:

R1 - návrh explicitného prediktívneho riadenia založeného na modeli vychádza z lineárnej aproximácie spojitej dynamiky v diskretnom čase jednotlivých diskretných stavov.

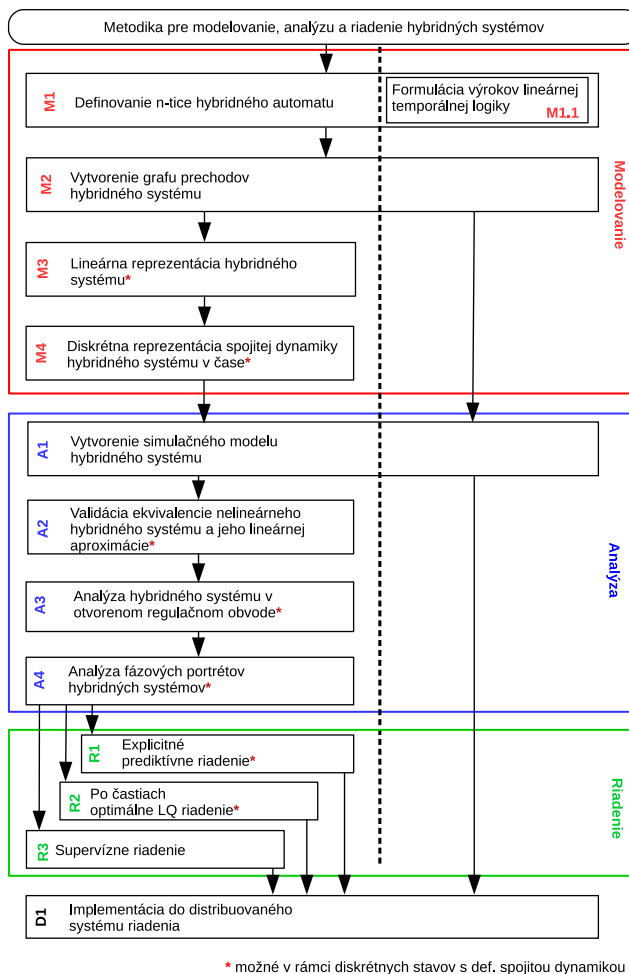
R2 - návrh po častiach spojitého optimálneho LQ riadenia vychádza z lineárnej aproximácie spojitej dynamiky diskretného stavu či už v spojitom alebo diskretnom čase.

R3 - návrh supervízneho riadenia, ktoré predstavuje návrh rôznych algoritmov riadenia v súčinnosti s prepínacím mechanizmom, ktorý určuje aktívny algoritmus riadenia aplikovaný na HS v danom čase.

Posledný krok navrhutej metodiky predstavuje implementáciu do distribuovaného systému riadenia:

D1 - Implementácia do distribuovaného systému riadenia predstavuje posledný krok navrhutej metodiky zahŕňa implementáciu algoritmov riadenia do distribuovaného systému riadenia CPS a ich verifikáciu

Predstavená metodika je graficky znázornená na Obr. 3.



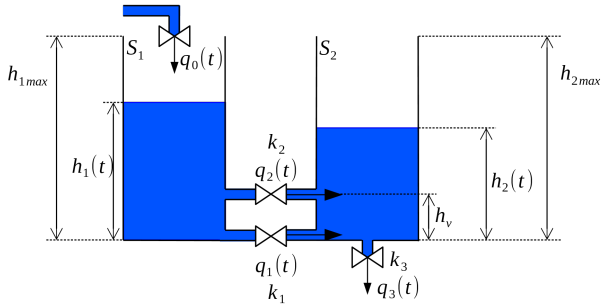
Obr. 3: Návrh metodiky pre modelovanie, analýzu a riadenie hybridných dynamických systémov

IV. MODELOVANIE, ANALÝZA A RIADENIE SIMULAČNÉHO MODELU HYBRIDNÉHO HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU - SCENÁR 1

Prvý scenár v dizertačnej práci sa zaoberá simulačným modelom hybridného hydraulického systému. Hydraulický HS sa skladá z dvoch nádob, ktoré sú spojené dvomi ventilmi tak, ako je to znázornené na Obr. 4. Úrovně výšky kvapaliny v jednotlivých nádobách sú označené ako $h_1(t)$ pre prvú a $h_2(t)$ pre druhú nádobu. Prítok $q_0(t)$ predstavuje vstup do HS. Ventily nádrží sú popísané parametrami k_1, k_2, k_3 s príslušným označením prietoku kvapaliny $q_1(t), q_2(t), q_3(t)$. Spoločný ventil k_1 môže byť otvorený alebo zatvorený. Ventil k_2 sa nachádza vo výške h_v . Nádrže sú valcovitého tvaru, preto je možné plochu prierezu nádob uvažovať ako konštantnú a to S_1 pre prvú a S_2 pre druhú nádobu.

Zvolený hydraulický systém vykazuje hybridný charakter, nakoľko nastáva prechod medzi jednotlivými diskretnými stavmi systému, a to ak jedna z výšky hladín nádob $h_1(t)$ alebo $h_2(t)$ prekročí výšku h_v v spoločnom hornom ventile

k_2 . Dôsledkom toho je, že systém má 4 rôzne diskrétny stavy s otvoreným spodným ventilom k_1 . Keď je ventil k_1 zatvorený, existujú ďalšie 4 diskrétny stavy systému. Celkovo sa teda môže systém nachádzať v jednom z ôsmich rôznych diskretných stavov, ktoré sú označené ako \mathcal{A} až \mathcal{H} , čo je graficky znázornené na Obr. 5.



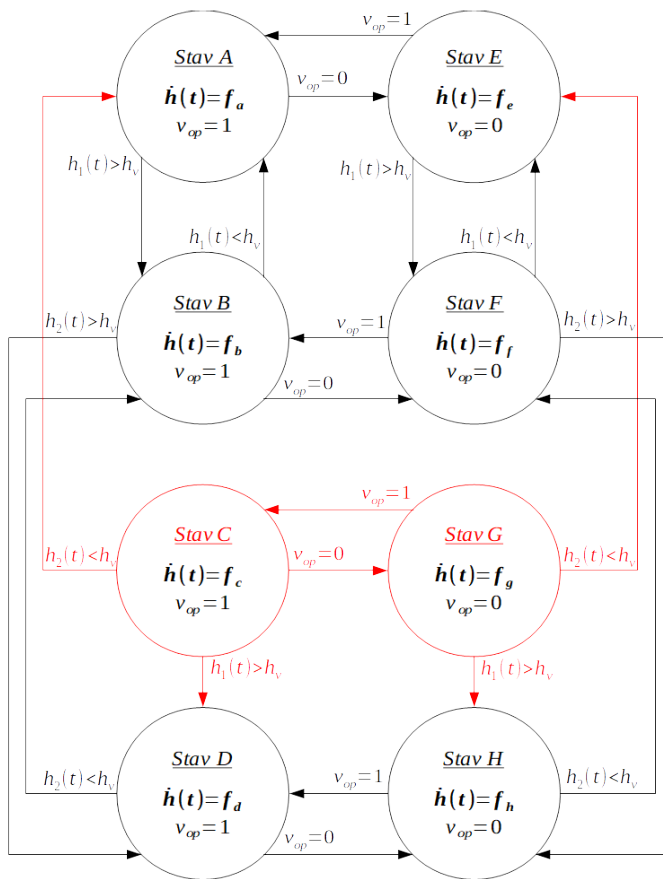
Obr. 4: Schéma hydraulického hybridného systému

pričom bolo využité prostredie s -funkcií, ako aj aplikačného toolboxu HYSDEL.

| D. stav | Podmienka pre $h_1(t)$ | Podmienka pre $h_2(t)$ | Ventil k_1 |
|---------------|------------------------|------------------------|--------------|
| \mathcal{A} | $h_1(t) \leq h_v$ | $h_2(t) \leq h_v$ | otvorený |
| \mathcal{B} | $h_1(t) > h_v$ | $h_2(t) \leq h_v$ | otvorený |
| \mathcal{C} | $h_1(t) \leq h_v$ | $h_2(t) > h_v$ | otvorený |
| \mathcal{D} | $h_1(t) > h_v$ | $h_2(t) > h_v$ | otvorený |
| \mathcal{E} | $h_1(t) \leq h_v$ | $h_2(t) \leq h_v$ | zatvorený |
| \mathcal{F} | $h_1(t) > h_v$ | $h_2(t) \leq h_v$ | zatvorený |
| \mathcal{G} | $h_1(t) \leq h_v$ | $h_2(t) > h_v$ | zatvorený |
| \mathcal{H} | $h_1(t) > h_v$ | $h_2(t) > h_v$ | zatvorený |

Tabuľka I: Diskrétny stavy hydraulického hybridného systému

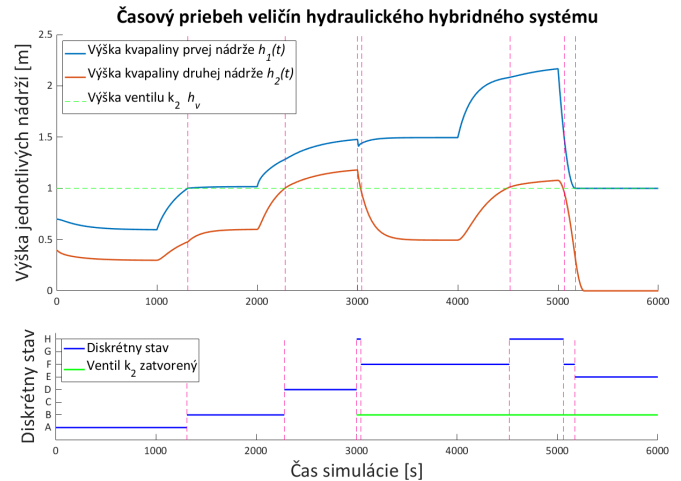
Odozva v rámci otvoreného regulačného obvodu, slúži na sledovanie časových priebehov či už stavového vektora $\mathbf{x}(t)$ alebo výstupu systému $\mathbf{y}(t)$ a prechodov medzi jednotlivými diskretnými stavmi pri zvolenom vstupe $\mathbf{u}(t)$. Prechody medzi diskretnými stavmi hydraulického HS sú znázornené na Obr. 6.



Obr. 5: Graf prechodov hydraulického HS

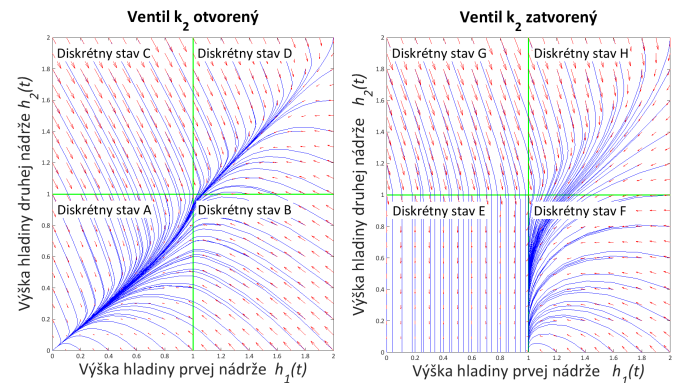
Podmienky, definujúce diskretny stavy hydraulického HS, sú uvedené v Tab. I.

Po ukončení modulu **Modelovanie** navrhnutej metodiky je možné vykonať kroky v rámci modulu **Analýza** pre hydraulický HS. Nevyhnutným predpokladom pre analýzu je implementácia HS v simulačnom prostredí MATLAB/Simulink



Obr. 6: Časový priebeh veličín hydraulického hybridného systému

Taktiež je možné využiť analýzu v podobe fázových portrétov, čo je znázornené na Obr. 7.



Obr. 7: Fázový portrét nelineárnej reprezentácie hydraulického hybridného systému

Nakoľko Jakobiho matice pre hydraulický HS mohli byť získané len pre niektoré diskkrétne stavy, t.j. $\{\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{D}, \mathcal{F}, \mathcal{H}\}$, stavové riadenie bolo navrhnuté len pre tieto stavy. Stavový vektor pre hydraulický HS je definovaný ako $\mathbf{x}(t) = [h_1(t) \ h_2(t)]^T$ a vstup $u(t) = q_0(t)$.

Hlavný rozdiel oproti jednoduchému LQ algoritmu riadenia je v minimalizácii funkcionálu v každom prvku množiny *Domain* hybridného automatu. Cieľom po častiach optimálneho LQ riadenia je potom zabezpečiť, aby stav systému spĺňal podmienku $\Delta \mathbf{x}(\infty) = 0$ z akéhokoľvek počiatočného stavu $\Delta \mathbf{x}(0)$ a zároveň minimalizovať funkcionál:

$$J(x_0, u) = \int_0^{\infty} (\Delta \mathbf{x}^T \mathbf{Q}_q \Delta \mathbf{x} + \Delta u^T \mathbf{R}_q \Delta u) dt \quad (1)$$

kde $\mathbf{Q}_q \geq 0$ a $\mathbf{R}_q > 0$ sú váhové matice pre stav a vstup systému príslušných rozmerov pre diskkrétne stav q . Na základe minimalizácie funkcionálu je možné vypočítať spätnoväzobné zosilnenie $\mathbf{k}_q = \mathbf{R}_q^{-1} \mathbf{B}_q^T \mathbf{S}_q$ kde matica \mathbf{S}_q je riešenie maticovej Riccatiho algebraickej rovnice:

$$0 = -\mathbf{Q}_q - \mathbf{A}_q^T \mathbf{S}_q - \mathbf{S}_q \mathbf{A}_q + \mathbf{S}_q \mathbf{B}_q \mathbf{R}_q^{-1} \mathbf{B}_q^T \mathbf{S}_q \quad (2)$$

kde $\mathbf{A}_q, \mathbf{B}_q$ sú matice dynamiky a vstupu pre jednotlivé diskkrétne stavy. Spätnoväzobný zákon riadenia je potom možné definovať ako:

$$\Delta u_{FBq}(t) = -\mathbf{k}_q^T \Delta \mathbf{x}(t) \quad (3)$$

V prípade potreby je možné akýkoľvek prvok stavového vektora $\mathbf{x}(t)$ riadiť na nový ustálený stav $y_{ref}(t)$. Výstup hydraulického HS je definovaný ako $y(t) = h_2(t)$. Na základe toho je možné dosiahnuť požadovanú hodnotu $y_{ref}(t) = h_{2ref}(t)$ pridaním dopredného zosilnenia N pre q -tý diskkrétne stav:

$$N_q = \frac{-1}{\mathbf{C}_q (\mathbf{A}_q - \mathbf{B}_q \mathbf{k}_q)^{-1} \mathbf{B}_q} \quad (4)$$

a zákon riadenia pre doprednú zložku má potom tvar:

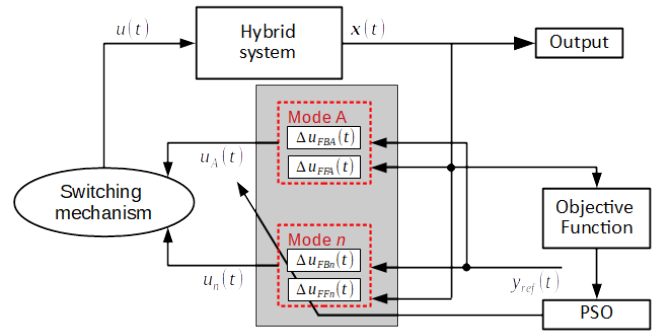
$$\Delta u_{FFq}(t) = N_q \Delta y_{ref}(t) \quad (5)$$

Celkový zákon riadenia $u(t)$ aplikovaný na systém je potom súčtom spätnoväzbových a dopredných riadiacich zložiek:

$$\Delta u_q(t) = \Delta u_{FBq}(t) + \Delta u_{FFq}(t) \quad (6)$$

Akčný zásah definovaný pomocou (6) je implementovaný na nelineárnu reprezentáciu hydraulického HS.

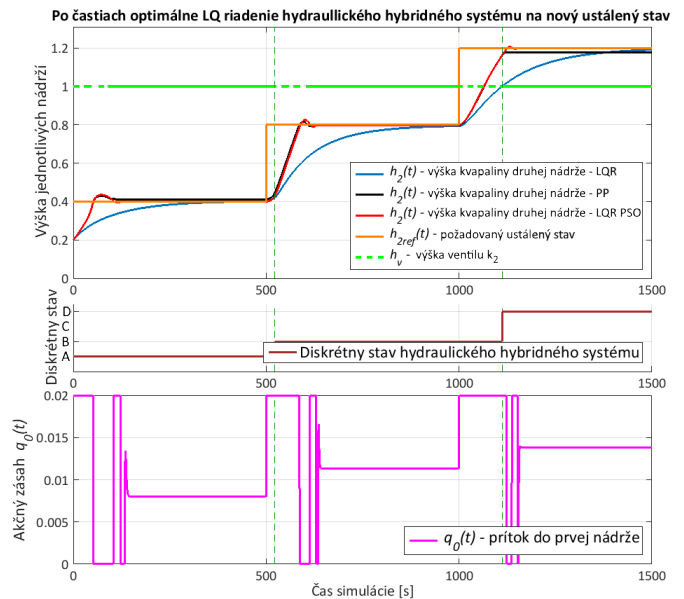
V rámci návrhu po častiach optimálneho LQ riadenia je využitý metaheuristický algoritmus optimalizácie krdľ'a častíc (particle swarm optimization - PSO), tak ako je to znázornené na Obr. 8.



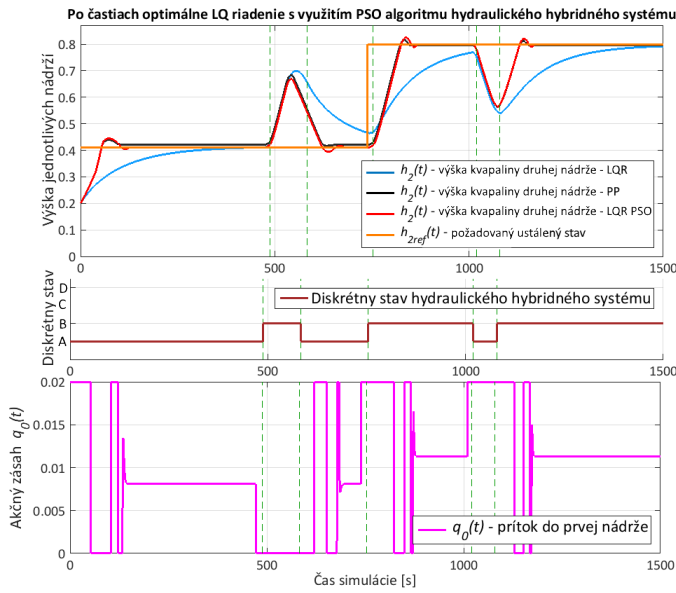
Obr. 8: Schéma po častiach optimálneho LQ riadenia na základe PSO algoritmu

Overenie navrhovaného algoritmu riadenia sa uskutočnilo na základe zmeny požadovaného ustáleného stavu, ako aj na základe kompenzácie poruchy. Cieľom algoritmu riadenia bolo v prvom prípade dosiahnuť prechod z diskkrétneho stavu \mathcal{A} do stavu \mathcal{D} cez stav \mathcal{B} , tak ako to je znázornené na Obr. 9. Obr. 10 znázorňuje výsledky kompenzácie pôsobenia poruchy na zvolený systém.

Je možné vidieť, že v oboch prípadoch po častiach optimálne LQ riadenie na základe PSO algoritmu dosiahlo najlepší časový priebeh či už v sledovaní nového ustáleného stavu alebo pri kompenzácii pôsobenia poruchy na systém.



Obr. 9: Sledovanie nového ustáleného stavu hydraulického HS



Obr. 10: Po častiach optimálne LQ riadenie hydraulického HS s kompenzáciou poruchy

Výsledky prvého scenára boli publikované v [9].

V. MODELOVANIE, ANALÝZA A RIADENIE Modelovej aplikácie Výťah - SCENÁR 2

Scenár 2 sa zaoberá modelovaním a analýzou Modelovej aplikácie Výťah (MAV). MAV obsahuje diskrétny stavy bez definovanej spojitej dynamiky, preto sa na ňu vzťahuje časť navrhovanej metodiky, ktorá je znázornená v rámci pravej časti Obr. 3. Modelová aplikácia Výťah, ktorej funkčnosť je inšpirovaná laboratórnym modelom výťahu (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/vytah.php>), je opísaná z hľadiska konštrukcie v [10] a je zobrazená na Obr. 11.



Obr. 11: Modelová aplikácia Výťah (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/vytah.php>)

Popis a prehľad fyzikálnych veličín sú uvedené v Tab. II a parametre MAV v Tab. III.

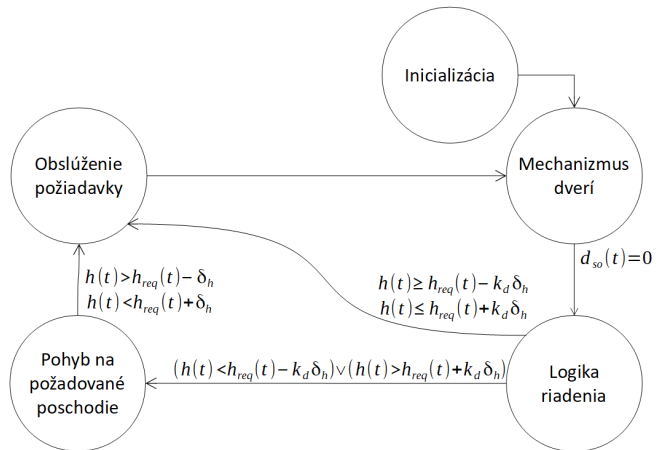
| Označenie | Definičný obor | Popis |
|--------------|---------------------------------|--------------------------|
| $h(t)$ | $\langle h_1; h_4 \rangle$ | výška MAV |
| $d(t)$ | $\langle 0; d_{max} \rangle$ | pozícia dverí |
| $h_{req}(t)$ | $\{h_1; h_2; h_3; h_4\}$ | požadovaná výška |
| $\tau(t)$ | $\langle 0; \tau_{max} \rangle$ | časovač |
| $v_d(t)$ | $\{-v_{dlin}; 0; +v_{dlin}\}$ | rýchlosť otvárania dverí |
| $v_h(t)$ | $\{-v_{hlin}; 0; +v_{hlin}\}$ | rýchlosť pohybu výťahu |

Tabuľka II: Fyzikálne veličiny Modelovej aplikácie Výťah

| Označenie | Hodnota | Popis |
|--------------|-------------------------|----------------------------|
| h_{dif} | 1.5 [m] | výška poschodia |
| h_1 | 0 [m] | výška prvého poschodia |
| h_2 | $h_1 + h_{dif}$ [m] | výška druhého poschodia |
| h_3 | $h_1 + 2h_{dif}$ [m] | výška tretieho poschodia |
| h_4 | $h_1 + 3h_{dif}$ [m] | výška štvrtého poschodia |
| d_{max} | 1.2 [m] | šírka 1 strany dverí |
| δ_d | 0.01 [m] | tolerancia polohy dverí |
| δ_h | 0.03 [m] | tolerancia polohy výťahu |
| τ_{max} | 3 [s] | maximálna hodnota časovača |
| v_{dlin} | 1 [ms ⁻¹] | rýchlosť otvárania dverí |
| v_{hlin} | 0.1 [ms ⁻¹] | rýchlosť pohybu výťahu |

Tabuľka III: Parametre Modelovej aplikácie Výťah

MAV je matematicky popísaná ako hybridný systém na znázornenie prechodov medzi jednotlivými diskretnými stavmi. Pri vytvorení HS MAV bolo potrebné zostrojiť graf prechodov medzi jednotlivými diskretnými stavmi systému, pričom uzly reprezentujú tieto stavy a hrany zobrazujúce prechody medzi stavmi. Graf prechodov MAV je ilustrovaný na Obr. 12 a zobrazuje diskretné stavy najvyššej úrovne, pričom jednotlivé diskretné stavy majú vlastné grafy prechodov o jednu úroveň nižšie.



Obr. 12: Graf prechodov Modelovej aplikácie Výťah na najvyššej úrovni

V zadanom formalizme hybridných automatov je možné MAV definovať nasledovne:

a) MAV obsahuje 5 diskretných stavov

$$Q = \{q_1 - inicializácia, q_2 - mechanizmus dverí,$$

q_3 – logika riadenia,

q_4 – pohyb na požadované poschodie,

q_5 – obsluženie požiadavky}

b) pre stavový priestor, v ktorom sa vyvíja spojitá dynamika platí

$$\mathbf{X} = \langle 0 - \delta_h, h_4 + \delta_h \rangle \times \langle 0 - \delta_d, 2d_{max} + 2\delta_d \rangle$$

c) dynamika systému \mathbf{f} pre jednotlivé diskkrétne stavy s definovanou spojitou dynamikou

- q_2 - diskkrétne stav *Mechanizmus dverí*
 - otváranie dverí $v_d(t) = -v_{din}$
 - zatváranie dverí $v_d(t) = v_{din}$
 - časovač $\dot{\tau}(t) = 1$
- q_4 - diskkrétne stav *Pohyb na požadované poschodie*
 - pohyb smerom hore $v_h(t) = v_{hlin}$
 - pohyb smerom dole $v_h(t) = -v_{hlin}$

d) množinu možných počiatkových stavov MAV je možné určiť ako

$$\text{Init} = h_1 \times 2d_{max}$$

e) pre domény jednotlivých stavov s definovanou spojitou dynamikou potom platí:

- $Dom(q_2)$ - diskkrétne stav *Mechanizmus dverí*

$$Dom(q_2) = h_1 \times \langle 0 - \delta_d, 2d_{max} + 2\delta_d \rangle \cup$$

$$\cup h_2 \times \langle 0 - \delta_d, 2d_{max} + 2\delta_d \rangle \cup$$

$$\cup h_3 \times \langle 0 - \delta_d, 2d_{max} + 2\delta_d \rangle \cup$$

$$\cup h_4 \times \langle 0 - \delta_d, 2d_{max} + 2\delta_d \rangle$$

- $Dom(q_4)$ - diskkrétne stav *Pohyb na požadované poschodie*

$$Dom(q_4) = \langle 0 - \delta_h, h_4 + \delta_h \rangle \times 2d_{max} + 2\delta_d$$

f) množina hrán E je definovaná ako $E(q_1, q_2)$, $E(q_2, q_3)$, $E(q_3, q_4)$, $E(q_3, q_5)$, $E(q_4, q_5)$ a $E(q_5, q_1)$,

g) hraničné podmienky prepnutia daného systému sú znázornené na Obr. 12,

h) množina prechodov R je reprezentovaná identickým zobrazovaním.

Následne bude popísané správanie sa MAV pomocou lineárnej temporálnej logiky.

Logika a parametre MAV

Funkcionalitu MAV je možné opísať pomocou lineárnej temporálnej logiky, nakoľko spomínaná aplikácia obsahuje diskkrétne stavy bez definovanej spojitaj dynamiky. Podľa nomenklatury lineárnej temporálnej logiky a jej operátorov:

- $\mathcal{G}p$ pre *vždy p*,
- $\mathcal{F}p$ pre *raz určite p*,
- $\mathcal{X}p$ pre *nasledujúci krát p*
- $p\mathcal{U}q$ pre *raz q začne platiť a dovtedy platí p*

a na základe už uvedenej funkcionality a grafu prechodov MAV je možné uviesť nasledujúce atomické propozície v rámci LTL [11]:

- h_i MAV sa nachádza na i -tom poschodí,
- d_i dvere na i -tom poschodí sú otvorené,
- r_i je aktívna požiadavka na i -tom poschodí,
- d_{so} v priestore dverí sa nachádza prekážka.

Uvažujúc tieto atomické propozície môže byť pre MAV definovaná množina piatich formúl LTL Φ_i :

F1) dvere sú "bezpečné", t.j. dvere na danom poschodí sú zatvorené, ak sa tam nenachádza MAV

$$\Phi_1 = \mathcal{G}(\bigwedge_{i=1,2,3,4} (\neg h_i \rightarrow \neg d_i)). \quad (7)$$

F2) akákoľvek požiadavka bude nakoniec obslužená,

$$\Phi_2 = \mathcal{G}(\bigwedge_{i=1,2,3,4} (r_i \rightarrow \mathcal{F}(h_i \wedge d_i))). \quad (8)$$

F3) pohyb MAV na vyššie poschodia je možný, len ak neexistuje požiadavka na nižšie poschodia

$$\Phi_3 = \mathcal{G}(\bigwedge_{i=1,2,3,4} h_i \wedge r_{j < i} \rightarrow \mathcal{X}((\bigwedge_{k=i+1, \dots, i_{max}} \neg h_k) \mathcal{U}(h_j \wedge d_j))) \quad (9)$$

F4) ak sa v priestore dverí nachádza prekážka dvere ostanú otvorené a výška MAV sa nemení, až kým sa v priestore dverí prekážka nebude nachádzať

$$\Phi_4 = \mathcal{G}(\bigwedge_{i=1,2,3,4} h_i \wedge d_{so} \rightarrow \mathcal{X}((\bigwedge_{i=1,2,3,4} h_i \wedge d_i) \mathcal{U}(\neg d_{so}))) \quad (10)$$

F5) Nakoniec bude aktívna iba jedna požiadavka, t.j. existuje čas, po ktorom nebude aktívna žiadna požiadavka

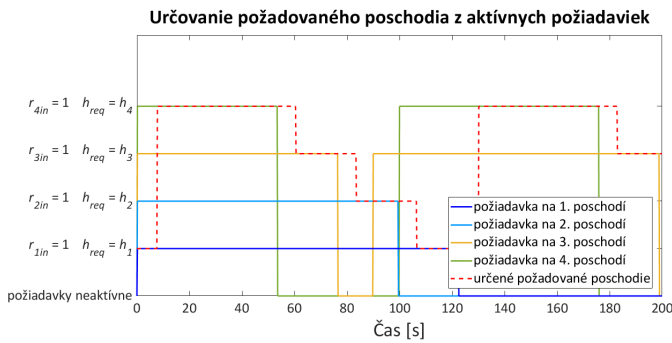
$$\Phi_5 = \mathcal{F}\mathcal{G}(\bigwedge_{i=1,2,3,4} (\neg r_i)). \quad (11)$$

MAV pracuje na princípe zberu zhora nadol. Účelom tohto scenára je preto overiť správanie sa MAV pri súčasne aktívnych viacerých požiadavkách. Paralelne sa sleduje správanie MAV pri aktivácii požiadavky na hornom poschodí, zatiaľ čo na dolných poschodiach stále existujú aktívne požiadavky, výsledky sú znázornené na Obr. 13.

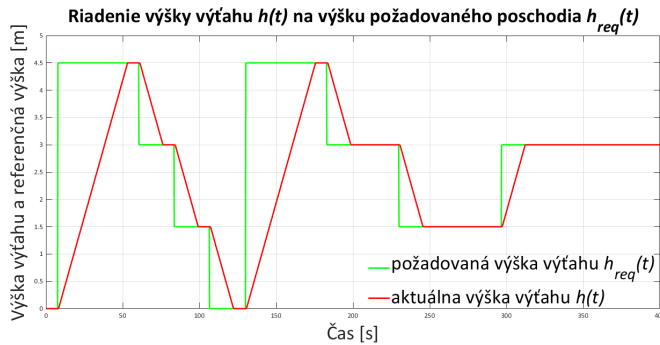
Následne prebehlo overenie pohybu MAV na základe zmien požadovaného poschodia h_{req} . Zmena výšky $h(t)$, v závislosti od zmeny skutočnej požadovanej výšky $h_{req}(t)$, je zobrazená na Obr. 14.

Nakoniec bola vykonaná verifikácia funkčnosti mechanizmu dverí boli sledované tri signály, konkrétne poloha dverí $d(t)$, prekážka v priestore dverí $d_{so}(t)$ a časovač $\tau(t)$. Časový priebeh týchto troch signálov je znázornený na Obr. 15.

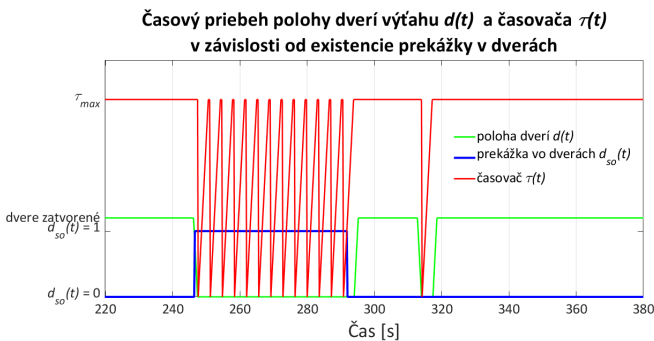
Výsledky druhého scenára boli spublikované v [12].



Obr. 13: Spracovanie aktívnych požiadaviek Modelovej aplikácie Výt'ah



Obr. 14: Pohyb MAV vzhľadom na požadované poschodie



Obr. 15: Časový priebeh funkcionality dverí s prekážkou v priestore dverí

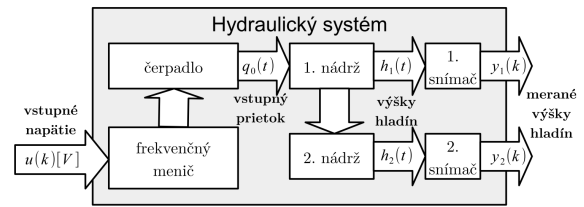
VI. MODELOVANIE, ANALÝZA A RIADENIE Modelovej aplikácie hydraulického systému - SCENÁR 3

Scenár 3 v dizertačnej práci sa zaoberá modelovaním, analýzou a riadením Modelovej aplikácie hydraulického systému (MAHS). MAHS predstavuje laboratórny model hydraulického systému (nádoby bez interakcie) a je zobrazená na Obr. 16.

MAHS pozostáva z dvoch valcových nádrží bez interakcie medzi nimi. Kvapalina je privádzaná do prvej nádrže pomocou membránového čerpadla $q_0(t)$. Z prvej nádrže $h_1(t)$ následne prúdi kvapalina do druhej nádrže $h_2(t)$ pôsobením hydrostatického tlaku a z nej vyteká do rezervoáru.



Obr. 16: Modelová aplikácia hydraulického systému (MAHS) (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/hyd.php>)



Obr. 17: Schématické znázornenie MAHS

Matematická reprezentácia MAHS bola na základe empirického pozorovania správania volená v podobe PWA systému.

Namerané dáta pri $u(k) = \{5, 6, 7\}$ boli následne upravené do tvaru vhodného pre potreby identifikácie pomocou funkcie *ssest* aplikačného toolboxu System Identification simulačného prostredia MATLAB, ktorý využíva algoritmus metódy najmenších štvorcov. Tvar matematického modelu bol volený ako:

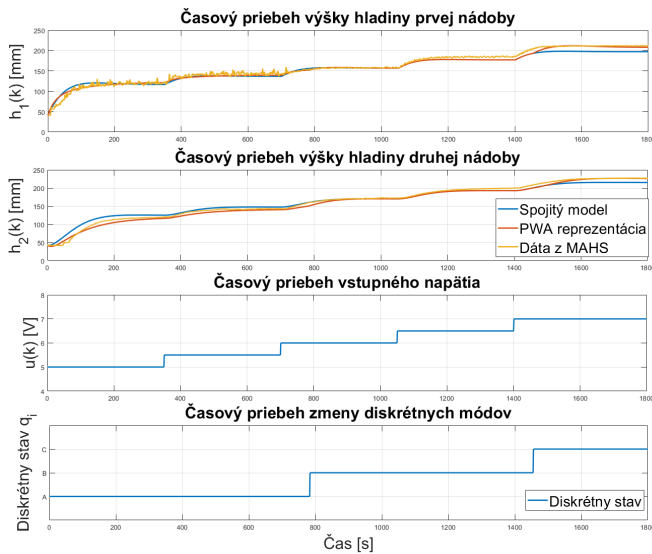
$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{F} \Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{G} \Delta u(k), \\ \Delta \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}(k) \end{aligned} \tag{12}$$

kde tvar matíc dynamiky \mathbf{F} a vstupu \mathbf{G} boli zvolené na základe uvažovania jednotkovej diagonálnej matice \mathbf{C} .

Po implementácii jednotlivých matematických reprezentácií MAHS či už do *s*-funkcií alebo v rámci aplikačného toolboxu HYSDEL, bola verifikovaná táto aproximácia stavového opisu voči dátam z MAHS.

Výsledné porovnanie týchto zápisov je zobrazené na Obr. 18. Ako je možné postrehnúť, matematická reprezentácia využívajúca PWA formalizmus pokrýva správanie sa MAHS v celom rozsahu prípustných hodnôt oboch nádrží. V spodnej časti grafu sú zobrazené prechody medzi diskretnými stavmi MAHS.

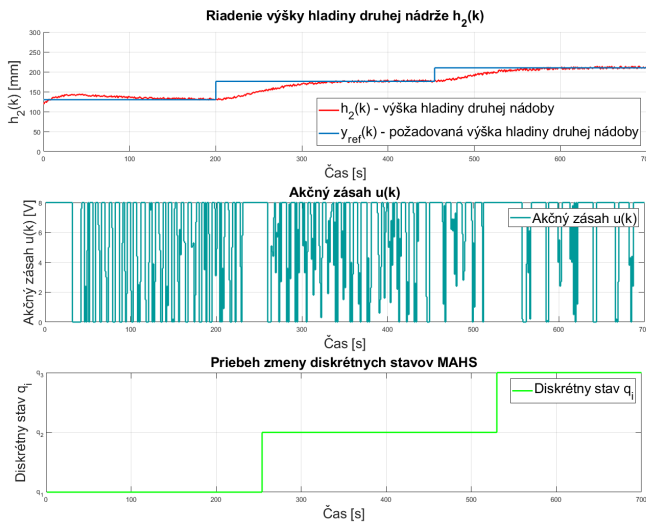
V rámci modulu **Riadenie** navrhutej metodiky bol navrhnutý algoritmus po častiach spojitého optimálneho LQ riadenia a explicitné prediktívne riadenie založené na modeli.



Obr. 18: Časové priebehy jednotlivých hladín v nádržiach pre rôzne reprezentácie MAHS

Po častiach spojité LQ riadenie bolo navrhnuté na základe rovnakej metodiky ako to bolo uvedené v rámci Scenáru 1. Zmena ustáleného stavu MAHS je definovaná pre výšku hladiny druhej nádoby, t.j. $y_{ref}(k) = h_2(k)$.

Výsledky uvedeného po častiach spojitého LQ riadenia sú uvedené na Obr. 19. Na základe výsledkov je možné vidieť, že výška hladiny $h_2(k)$ sleduje požadovanú zmenu ustáleného stavu $y_{ref}(k)$ naprieč všetkými diskretnými stavmi MAHS.



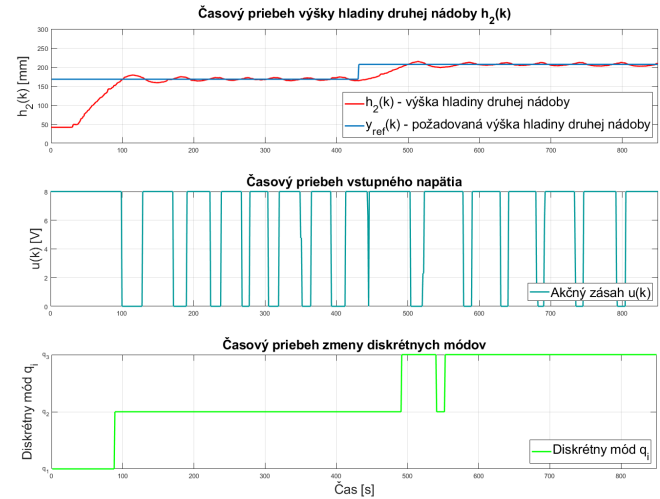
Obr. 19: Riadenie výšky hladiny druhej nádrže $h_2(k)$ na základe po častiach spojitého LQ riadenia

Druhá metóda riadenia aplikovaná na MAHS predstavuje explicitné prediktívne riadenie založené na modeli so sledovaním referenčnej trajektórie s funkcionálom definovaným ako:

$$J_{MPC} = \sum_{k=0}^{N-1} [y(k) - y_{ref}(k)]^T Q [y(k) - y_{ref}(k)] + u^T(k) R u(k)$$

v. n. $\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}\mathbf{u}(k), k = 0, 1, \dots, N-1,$
 $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(k),$
 $\mathbf{u}_{min} \leq \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{u}_{max}, k = 0, 1, \dots, N-1,$
 $\mathbf{y}_{min} \leq \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \leq \mathbf{y}_{max}, k = 0, 1, \dots, N-1.$ (13)

pričom výsledky sú znázornené na Obr. 20.



Obr. 20: Riadenie výšky hladiny druhej nádrže $h_2(k)$ na základe explicitného prediktívneho riadenia

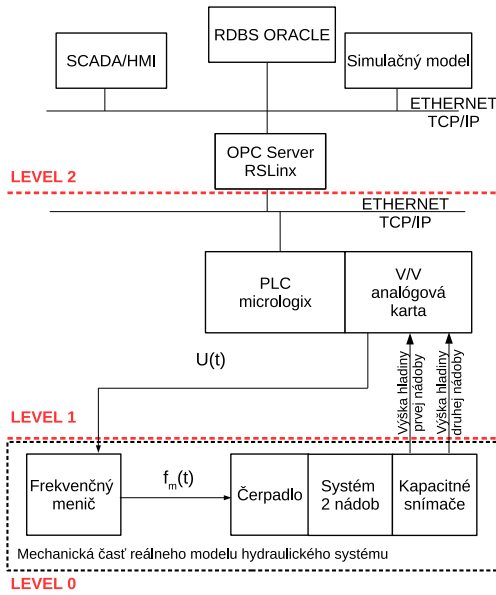
Na základe výsledkov modulu **Riadenie** navrhutej metodiky pre modelovanie, analýzu a riadenie HS aplikovaných na MAHS je možné zhodnotiť, že uvedené metódy a algoritmy riadenia splnili ciele riadenia, a to sledovanie nového ustáleného stavu $y_{ref}(k) = h_2(k)$.

Začlenenie *Modelovej aplikácie hydraulického systému* do DSR je znázornené na Obr. 21.

VII. SUPERVÍZNE RIADENIE MODELOVEJ APLIKÁCIE INVERZNÉHO KYVADLA NA VOZÍKU S LINEÁRNÝCH SYNCHRÓNNYM MOTOROM - SCENÁR 4

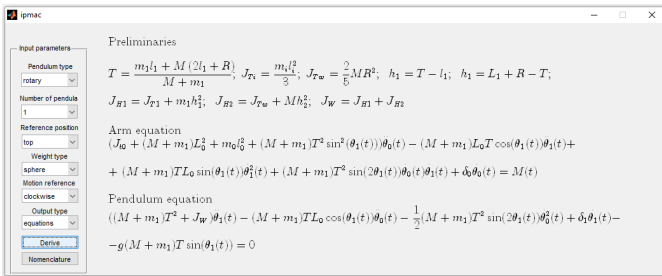
V rámci dizertačnej práce som sa zaoberal aj podaktuovanými systémami. Tie sú definované ako systémy s viac stupňami voľnosti ako akčných zásahov. Na základe Brockettovej podmienky platí, že pre podaktuované systémy nie je možné navrhnuť jednotný zákon riadenia v rámci ich celého stavového priestoru. Preto je na daný typ systémov aplikované supervízne riadenie, čo predstavuje krok R3 predstavenej metodiky.

Objektom záujmu je systém inverzného kyvadla s lineárnym synchronným motorm, ktorý je systémom v rámci Multifunkčného pracoviska nedeštruktívnej diagnostiky. Matematický model vychádza z Lagrangeových rovníc II. druhu a preto



Obr. 21: DSR architektúra pre Modelovú aplikáciu hydraulického systému

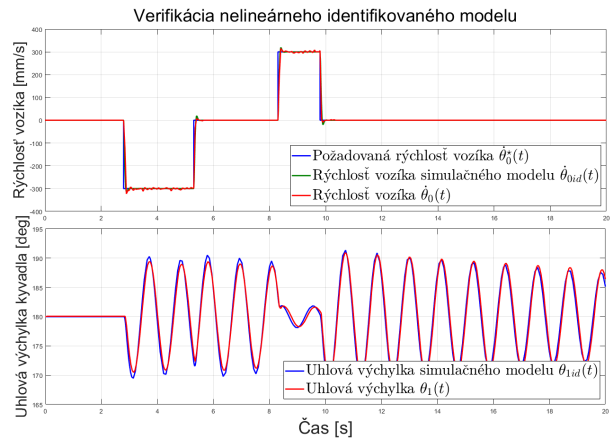
je kinetická $E_k(\theta(t), \dot{\theta}(t))$ a potenciálna $E_p(\theta(t))$ energia definovaná pre dva hmotné body - pre polohu vozíka $\theta_0(t)$ a pre uhlovú výchylku kyvadla $\theta_1(t)$. Odvodenie matematického modelu inverzného kyvadla s lineárnym synchronným motorom je implementované vo funkciách, ktoré sú súčasťou knižnice *IPMaC* [13], [14] pričom *Inverted Pendula Model Equation Derivator* predstavuje grafické rozhranie, ktoré zobrazuje pohybové rovnice v symbolickej alebo $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ forme a je zobrazené na Obr.22.



Obr. 22: Grafické užívateľské rozhranie *Inverted Pendula Model Equation Derivator_v3*

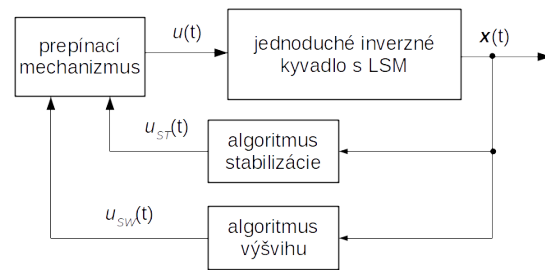
Po vygenerovaní matematického modelu uvedeného systému bol experimentálno-analytickou identifikáciou získaný celkový model laboratórneho systému, pričom jeho overenie je znázornené na Obr. 23. Je možné pozorovať, že vytvorený simulačný model kopíruje časové priebehy stavových veličín uvedeného systému.

Cieľ riadenia pre podaktuované systémy je zvyčajne definovaný ako stabilizácia systému vo zvislej vzpriamenej (obráteňnej) nestabilnej polohe pri nenulových počiatkových podmienkach alebo za pôsobenia poruchového signálu [15]. Nakoľko systém inverzného kyvadla nespĺňa Brockettovu nevyhnutnú



Obr. 23: Validácia časového priebehu rýchlosti vozíka $\dot{\theta}_0(t)$ a uhlovej výchylky kyvadla $\theta_1(t)$ simulačného modelu a Modelovej aplikácie s LSM

podmienku [16], je potrebné použiť hybridnú riadiacu štruktúru - supervízne riadenie tak, ako je to vidieť na Obr. 24 [5].



Obr. 24: Hybridná riadiaca štruktúra pre návrh algoritmov systému inverzného kyvadla na vozíku

Výstupy implementovanej hybridnej riadiacej štruktúry na laboratórnom modeli inverzného kyvadla s lineárnym synchronným motorom sú znázornené na Obr. 25.

Celková implementácia inverzného kyvadla na vozíku s lineárnym synchronným motorom a teda aj *Multifunkčného pracoviska nedeštruktívnej diagnostiky* do DSR je ukázaná na Obr. 26 [17].

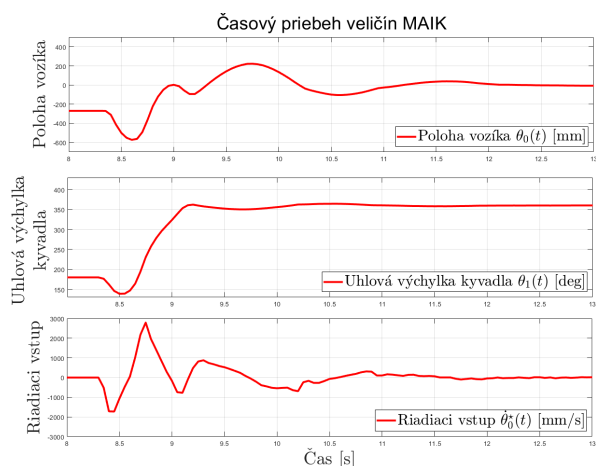
Výsledky Scenáru 4 boli publikované v rámci [18].

VIII. MODERNIZÁCIA KOMUNIKAČNO-RIADIACEJ ARCHITEKTÚRY DCS ALICE CERN

V rámci dizertačnej práce som sa venoval aj dvom výskumným úlohám experimentu ALICE CERN. Na základe modernizácie jednotlivých detektorov experimentu ALICE CERN vyplývajú výskumné úlohy.

A. Emulátor architektúry riadiaceho systému detektora

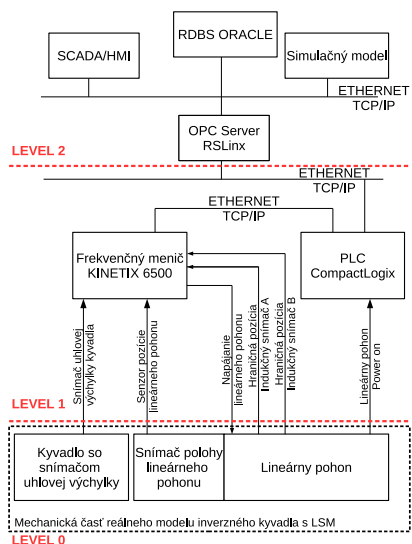
Prvá výskumná úloha predstavuje návrh, implementáciu a verifikáciu komunikačno-riadiacej architektúry riadiaceho systému detektora (detector control system - DCS).



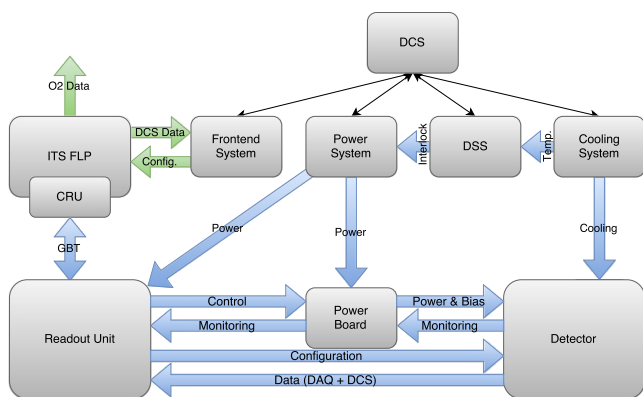
Obr. 25: Časový priebeh pozície vozíka $\theta_0(t)$, uhlovej výchylky kyvadla $\theta_1(t)$ a akčného zásahu $\dot{\theta}_0^*(t)$ pre MAIK_LSM

DCS slúži prevažne na konfiguráciu, kalibráciu, monitorovanie a riadenie napájania a chladenia samotných pixelových detektorov.

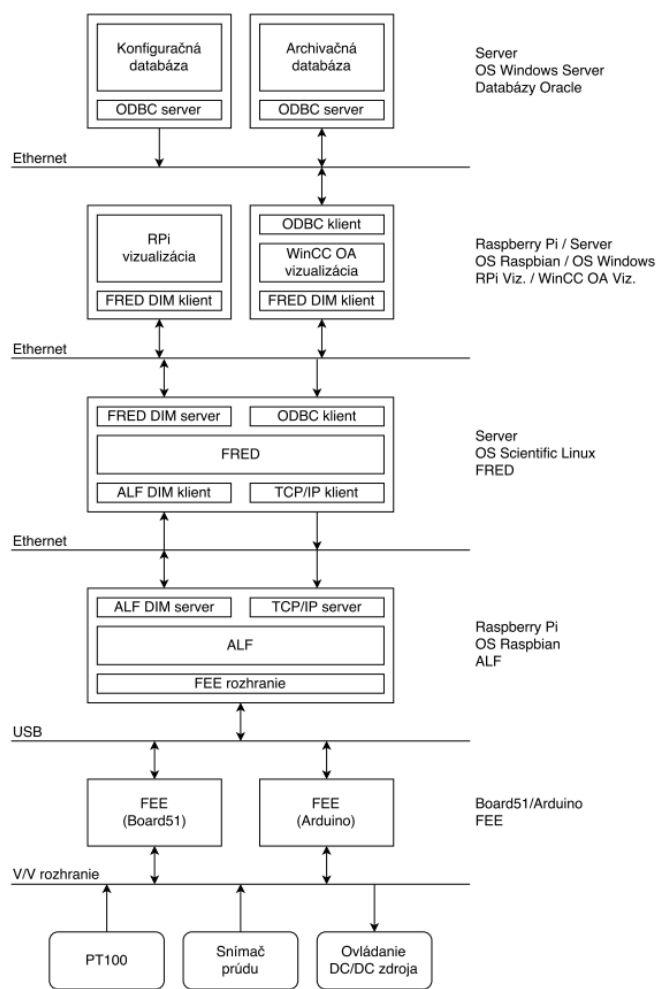
Na základe konzultácií a požiadaviek bolo vytvorené testovacie pracovisko *Emulátor DCS architektúry* v rámci Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky, ktoré bolo vyvinuté riešiteľmi projektu za účelom emulácie časti DCS a využíva alternatívne hardvérové prostriedky, nakoľko hardvér, ktorý je použitý v rámci modernizácie experimentu ALICE CERN je vo vývoji a nie je k dispozícii pre vývoj na vysunutých výskumných pracoviskách. Cieľom testovacieho pracoviska *Emulátor DCS architektúry* je navrhnuť a programovo realizovať univerzálne API, slúžiace pre riadenie a zber dát z neštandardných zariadení vyvinutých pre experiment ALICE CERN (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/cern.php>). Konceptná schéma emulátora DCS je znázornená na Obr. 28.



Obr. 26: Implementácia *Viacúčelového pracoviska nedeštruktívnej diagnostiky* do architektúry DSR

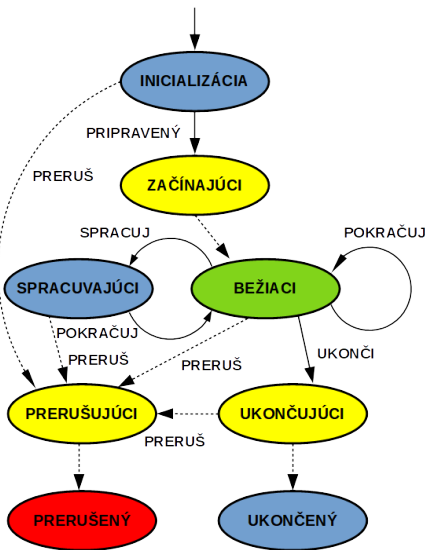


Obr. 27: Schematické zobrazenie DCS pre detektor ITS



Obr. 28: Konceptná schéma *Emulátora DCS architektúry* pre detektor ITS

Jadrom riadiaceho systému detektora je systém ALFRED (ALICE Low Level Frontend Device), ktorého konečný stavový automat je znázornený na Obr. 29.



Obr. 29: Konečno stavový automat komunikačno-riadiacej architektúry ALFRED

Uvedený emulátor bol spublikovaný v [19] a [20].

B. Generátor zát'áže DCS architektúry

Druhou výskumnou úlohou, ktorou som sa zaoberal bolo vytvorenie nástroja na validáciu návrhu komunikačno-riadiacej architektúry v podobe generátora údajov, ktorý simuluje priebeh experimentu. Generátor zát'áže DCS teda slúži ako testovacie pracovisko pre overenie konečnej priepustnosti medzi architektúrou DCS a SW archivačných systémov. Cieľom je overiť či systémy v rámci experimentu ALICE CERN budú schopné zvládnuť objem dát generovaných v rámci plánovanej modernizácie LHC.

Architektúra ADAPOS, zabezpečujúca archiváciu dát z DCS, sa skladá z troch aplikácií: *jadro* (engine - E), *terminál* (terminal - T) a *generátor zát'áže* (load generator - LG). Podľa špecifikácií navrhnutá architektúra ADAPOS musí spĺňať nasledovné kritériá [21]:

- 1) nestratiť alebo poškodiť údaje,
- 2) zachovať poradie zmien DPE,
- 3) spracovávať údaje najpredvídateľnejšou priepustnosťou a latenciou,
- 4) stabilita navrhutej architektúry,
- 5) umožniť redundantné inštancie pre maximalizáciu celkovej robustnosti a udržateľnosti,
- 6) obmedziť výskyt zbytočných prestojov.

Podobne ako bolo uvedené v rámci Scenáru 2 bude pre návrh a implementáciu využítá metodika pre *Modelovanie, analýzu a riadenie hybridných systémov* s využitím lineárnej temporálnej logiky, nakoľko generátor zát'áže v rámci komunikačno-riadiacej architektúry DCS predstavuje hybridný systém s diskretnými módmami bez definovanej spojitej dynamiky, čo je zobrazené v pravej časti Obr. 3.

Generátor zát'áže DCS v podobe hybridného automatu $H = (Q, X, f, \text{Init}, \text{Dom}, E, G, R)$ je možné zapísať ako:

- množina stavov $Q = \{ \text{Prípravený}, \text{Začínajúci}, \text{Bežiaci}, \text{Pozastavený}, \text{Prerušujúci}, \text{Ukončujúci}, \text{Prerušený}, \text{Ukončený} \}$,
- stavový priestor X - generátor dát obsahuje iba 1 diskretný mód so spojitou dynamikou a tým je mód *Bežiaci*, kde sa postupne vyvíja stav jednotlivých dátových bodov, teda $X \in \mathbb{R}^n$
- spojitá dynamika f definovaná pre diskretný mód *Bežiaci*

$$x(k) = \bar{x}(z\Delta x/100.0 + 1), \quad z \in \langle -1, 1 \rangle \quad (14)$$

kde $x \in \mathbb{R}^n$, \bar{x} predstavuje strednú hodnotu dátového bodu, Δx - maximálnu prípustnú odchýlku v %,

- množina *Init* je definovaná ako prvok množiny diskretných módmov Q *Prípravený*,
- množina *Dom* pre diskretný mód *Bežiaci* je definovaná ako n -rozmerný priestor $\text{Dom}(\text{Bežiaci}) = \mathbb{R}^n$,
- množina hrán E nebude uvedená z dôvodu obsiahlosti ale bude graficky znázornená v rámci grafu prechodov generátora dát,
- hraničné podmienky prepnutia G sú splnené na základe signálov od operátora alebo automatických signálov v rámci generátora dát čo bude znova viditeľné na grafe prechodov generátora dát,
- nakoľko generátor dát obsahuje iba 1 diskretný mód s definovanou spojitou dynamikou, množina prechodov R je prázdna.

Atomické propozície generátora zát'áže budú označené ako s pre stavy a c pre signály hybridného automatu generátora dát:

- $s_i; \quad i \in \{ I - \text{prerušený}, F - \text{ukončený}, R - \text{bežiaci}, P - \text{pozastavený}, S - \text{prípravený}, FC - \text{ukončujúci}, IC - \text{prerušujúci}, SC - \text{začínajúci} \}$
- $c_j; \quad j \in \{ I - \text{preruš}, R - \text{pokračuj}, F - \text{ukonči}, S - \text{začni} \}$

a na základe týchto atomických propozícií je možné zadefinovať nasledovné formuly lineárnej temporálnej logiky:

- generátor dát beží práve vtedy, ak je v diskretnom móde *Prípravený* - s_S a dostane signál *Začni* - c_S alebo je v móde *Pozastavený* - s_P a obdrží signál *Pokračuj* - c_R :

$$\Phi_1 = \mathcal{G}((s_S \wedge c_S) \vee (s_P \wedge c_R) \rightarrow s_R), \quad (15)$$

- ak sa generátor zát'áže nachádza v diskretnom móde *Bežiaci* - s_R alebo *Pozastavený* - s_P a obdrží signál *Ukonči* - c_F , tak prechádza do módu *Ukončujúci* - s_{FC} , kde pri neobdržaní signálu *Preruš* - c_I automaticky prechádza do módu *Ukončený* - s_F :

$$\Phi_2 = \mathcal{G}((s_R \vee s_P) \wedge c_F \rightarrow \mathcal{X}(s_{FC} \wedge \neg c_I) \cup s_F), \quad (16)$$

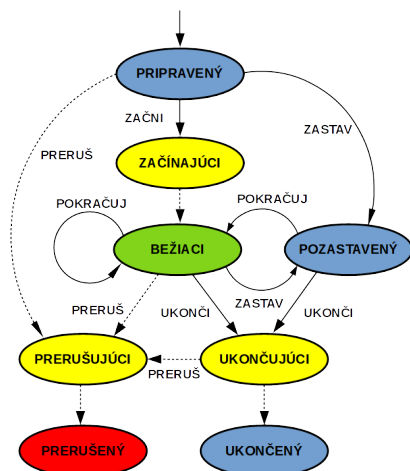
- ak sa generátor dát nachádza v diskretnom móde *Prípravený* - s_I , *Bežiaci* - s_R alebo *Ukončujúci* - s_{FC} a zároveň obdrží signál *Preruš* - c_I tak automaticky prejde do módu *Prerušujúci* - s_{IC} a následne do módu *Prerušený* - s_I :

$$\Phi_3 = \mathcal{G}((s_{FC} \vee s_S \vee s_R) \wedge c_I \rightarrow \mathcal{X}_{s_{IC}} \cup s_I), \quad (17)$$

- generátor dát sa nakoniec nachádza v diskretnom móde *Prerušený* - s_I alebo *Ukončený* - s_F :

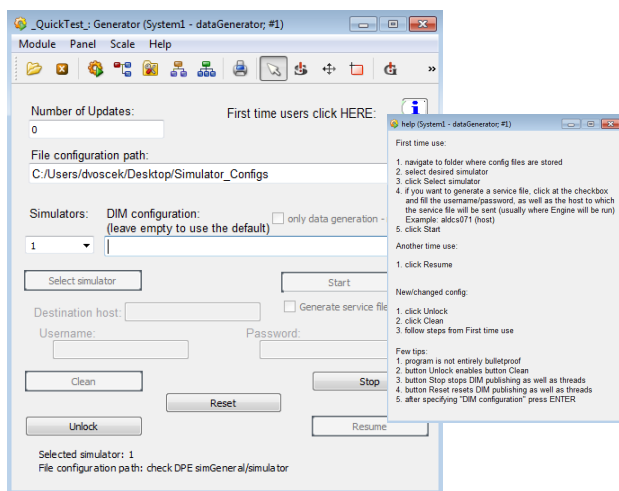
$$\Phi_4 = \mathcal{FG}(s_F \vee s_I). \quad (18)$$

Na základe popisu generátora zát'áže pomocou hybridného automatu s využitím lineárnej temporálnej logiky je možné zostrojiť orientovaný graf v podobe ako je uvedený na Obr. 30.



Obr. 30: Konečno-stavový automat generátora zát'áže pre DCS ALICE CERN

Pre vývoj a testovanie generátora zát'áže bolo vytvorené grafické užívateľské rozhranie v nástroji WinCC OA, Obr. 31, ktoré má implementovanú spomínanú funkcionálnosť.



Obr. 31: Užívateľské prostredie generátora zát'áže implementované vo WinCC OA

Testovanie uvedenej architektúry pomocou dlhodobého testu trvalo 37 dní. Systém pozostával zo 70 až 100 Generátorov dát, pričom každý obsahoval 1000 parametrov rôzneho dátového typu, ako aj intervalu aktualizácie. V rámci tohto dlhodobého testu bolo spracovaných 50 356 458 541 aktualizácií

parametrov, čo predstavuje ekvivalent objemu dát pre ALICE DCS v rámci trvania 4 rokov. Priemerná zát'áž bola 15 400 aktualizácií za sekundu, pričom maximálna bola vyše 30 000 aktualizácií za sekundu.

V rámci druhého testu, ktorý bol zameraný na meranie výkonu danej architektúry bolo implementovaných 100 Generátorov zát'áže pričom každý z nich publikoval 1 000 aktualizácií za sekundu, teda v celkovom objeme 100 000 aktualizácií za sekundu. Doba trvania testu bola stanovená na 3 hodiny, počas ktorých bolo publikovaných 1 080 000 hodnôt parametrov čo predstavuje ekvivalent objemu dát pre ALICE DCS v rámci trvania 1 mesiaca. Tento test navyše overoval schopnosť celej architektúry nestratiť alebo poškodiť údaje, zachovať poradie zmien DPE ako aj stabilitu celej architektúry. To bolo dosiahnuté tak, že ku 100 systémom Generátora zát'áže boli pridané dáta zo senzorov fyzikálnych veličín okolia experimentu ALICE a tie boli na druhej strane architektúry validované a vyčítavané v rovnakom poradí v akom prichádzali do systému ADAPOS.

IX. ZÁVER A DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Riešenia cieľov dizertačnej práce bolo zamerané na návrh metodiky pre modelovanie, analýzu a riadenie hybridných systémov či už pre systémy s viacerými spojitými dynamikami alebo pre systémy vyžadujúce supervízne riadenie a následne implementáciu tejto metodiky do distribuovaného systému riadenia. Dosiahnuté výsledky je možné rozdeliť do troch základných oblastí, či už v oblasti modelovania, analýzy alebo návrhu algoritmov riadenia hybridných systémov.

V rámci riešenia dizertačnej práce boli zostavené dva simulačné modely v programovom prostredí MATLAB/Simulink, na základe ich nelineárnych matematických modelov, ktoré sme získali analytickou identifikáciou fyzikálnych systémov *Hydraulický hybridný systém* a *Modelová aplikácia Výťah* (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/vytah.php>), kde pre druhú spomenutú bol využitý aj formalizmus lineárnej temporálnej logiky. Pre laboratórne modely *Modelová aplikácia hydraulického systému* (predstavujúci dve nádrže bez interakcie, <http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/hyd.php>) a *Modelová aplikácia Inverzného kyvadla* s lineárnym synchronným motorom (<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/multiKyv.php>) sme získali ich matematický model experimentálnou identifikáciou s využitím funkcionality Identification a Signal Processing toolbox-u programového prostredia MATLAB/Simulink. Získané matematické modely uvedených aplikácií boli následne využité v rámci analýzy a návrhu radiacich algoritmov. V rámci riešenia výskumných úloh pre experiment ALICE CERN bol vytvorený emulátor Detector Control System-u ako aj Generátor zát'áže na otestovanie navrhutej architektúry, pričom bol taktiež využitý formalizmus hybridných systémov s využitím lineárnej temporálnej logiky.

Medzi dosiahnuté výsledky v oblasti analýzy hybridných systémov patrí verifikácia a validácia jednotlivých matematických modelov uvedených aplikácií, ako aj implementácia výskumných úloh v rámci experimentu ALICE CERN a ich následná verifikácia priamo na výskumnom pracovisku.

V rámci oblasti návrhu riadenia hybridných systémov boli navrhnuté algoritmy po častiach optimálneho LQ riadenia s využitím optimalizácie kfdl'a častíc ako aj explicitného prediktívneho riadenia. Tieto algoritmy boli verifikované ako na simulačných tak aj laboratórnych systémoch (*Hydraulický hybridný systém, Modelová aplikácia hydraulického systému*) v riadiacich štruktúrach, ktoré boli volené na základe definovaných cieľoch riadenia. Pre *Modelovú aplikáciu inverzného kyvadla* s lineárnym synchronným motorom bolo navrhnuté adaptívne supervízne riadenie pozostávajúce z algoritmu výšvihy kyvadla a zo stabilizujúceho algoritmu.

Využitie modelové aplikácie laboratórnych modelov vytvárajú experimentálne pracovisko, ktoré je možné využiť pre overenie algoritmov modelovania, analýzy a riadenia hybridných systémov na základe navrhutej metodiky. Dosiahnuté výsledky sú spracované v štyroch scenároch a v rámci dvoch výskumných úloh pre experiment ALICE CERN.

POĎAKOVANIE

Dizertačná práca bola riešená v rámci projektov:

- **Univerzitný vedecký park Technicom pre inováčné aplikácie s podporou znalostných technológií - II.fáza**, kód ITMS:313011D232, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja, Centrum pre nedeštruktívnu diagnostiku technologických procesov so štandardným softvérovým vybavením pre riadenie a komunikáciu (aktivita 3.1, PP7), (2015 - 2017) (10%),
- **ALICE KE FEI TUKE (0222/2016 - 2/2016-DOT) Experiment ALICE na LHC v CERN: Štúdium silno interagujúcej hmoty v extrémnych podmienkach**, (2016-2020) (20%),
- grant FEI TUKE 2015-33 s názvom **Výskumné laboratórium nelineárnych podaktuovaných systémov** (Research laboratory for nonlinear underactuated systems), (1/2017 - 12/2017) (20%),
- **KEGA 072 TUKE – 4/2018: Implementácia výsledkov vedeckého výskumu v oblasti modelovania a simulácie kyberfyzikálnych systémov do výučby – tvorba moderných vysokoškolských učebníc**, (2018-2020) (50%).

LITERATÚRA

- [1] E. A. Lee, "Cyber physical systems: Design challenges," in *11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*. IEEE, 2008, pp. 363–369.
- [2] J. Wan, H. Yan, H. Suo, and F. Li, "Advances in cyber-physical systems research." *TIIS*, vol. 5, no. 11, pp. 1891–1908, 2011.
- [3] R. Baheti and H. Gill, "Cyber-physical systems," *The impact of control technology*, vol. 12, no. 1, pp. 161–166, 2011.
- [4] A. J. Van Der Schaft and J. M. Schumacher, *An introduction to hybrid dynamical systems*. Springer London, 2000, vol. 251.
- [5] J. Lunze and F. Lamnabhi-Lagarigue, *Handbook of hybrid systems control: theory, tools, applications*. Cambridge University Press, 2009.
- [6] H. Lin, P. J. Antsaklis *et al.*, "Hybrid dynamical systems: An introduction to control and verification," *Foundations and Trends® in Systems and Control*, vol. 1, no. 1, pp. 1–172, 2014.
- [7] J. Lygeros, K. H. Johansson, S. N. Simic, J. Zhang, and S. S. Sastry, "Dynamical properties of hybrid automata," *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 48, no. 1, pp. 2–17, 2003.
- [8] J. Lygeros, C. Tomlin, and S. Sastry, "Hybrid systems: modeling, analysis and control," *preprint*, 1999.
- [9] D. VOŠČEK, A. JADLOVSKÁ, and D. GRIGL'ÁK, "Modelling, analysis and control design of hybrid dynamical systems (in print)," *Journal of Electrical Engineering*, 2019, ISSN 1339-309X.
- [10] N. Ferenčík, J. Jadlovský, M. Kopčík, and I. Zolotová, "Pi control of laboratory model elevator via ladder logic in plc," in *Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII), 2017 IEEE 15th International Symposium on*. IEEE, 2017, pp. 000 383–000 386.
- [11] M. Y. Vardi, "An automata-theoretic approach to linear temporal logic," in *Logics for concurrency*. Springer, 1996, pp. 238–266.
- [12] D. VOŠČEK, A. JADLOVSKÁ, and D. GRIGL'ÁK, "Modelling and analysis of the lift system as a hybrid system," *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 17, no. 4, pp. 28–34, 2017.
- [13] S. Jadlovska, J. Sarnovský, J. Vojtek, and D. Vošček, "Advanced generalized modelling of classical inverted pendulum systems," in *Emergent trends in robotics and intelligent systems*. Springer, 2015, pp. 255–264.
- [14] S. Jadlovska and J. Sarnovský, "Modelling of classical and rotary inverted pendulum systems—a generalized approach," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 64, no. 1, pp. 12–19, 2013.
- [15] A. Jadlovska and S. Jadlovska, *Modern Methods of Modeling and Control of Nonlinear Systems*, Košice: ELFA press, 2013.
- [16] F. Ceragioli, "Some remarks on stabilization by means of discontinuous feedbacks," *Systems & control letters*, vol. 45, no. 4, pp. 271–281, 2002.
- [17] A. Jadlovska, S. Jadlovska, and D. Vošček, "Cyber-physical system implementation into the distributed control system," in *14th IFAC International conference on Programmable devices and embedded systems*, 2016, pp. 375–380, ISSN : 2405-8963.
- [18] —, "Cyber-physical system implementation into the distributed control system (preprint)," in *14th IFAC International conference on Programmable devices and embedded systems*, 2016, pp. 375–380, ISSN : 2405-8963.
- [19] J. Jadlovský, A. Jadlovska, S. Jadlovska, M. Kopčík, J. Čabala, M. Oravec, D. Vošček, M. Tkáčik, P. Chochula, and O. Pinazza, "Communication architecture of the detector control system for the inner tracking system," 2017, pp. 1930–1933.
- [20] —, "A novel general purpose data acquisition board with a dim interface," 2017.
- [21] J. Lång, A. Augustinus, P. Bond, P. Chochula, L. Lechman, O. Pinazza, and A. Kurepin, "Adapos: An architecture for publishing alice dcs conditions data," pp. 482–485, 2017.