



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Teze inaugurační přednášky ke jmenování profesorem

Metódy soft computingu v identifikácii smart systémov

Soft computing methods in identification of smart systems

Autor: **doc. Ing. Alexander Hošovský, PhD.**

Studijní obor: Aplikovaná informatika

Zlín, duben 2024

© Alexander Hošovský

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Qualifying Lecture for Professorship.**

Publikace byla vydána v roce 2024

Klíčová slova: soft computing, identifikácia, neurónové siete, soft pohony, spotreba plynu.

Key words: soft computing, system identification, neural networks, soft actuators, gas consumption.

Práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7678-237-2

Abstrakt – (Resumé)

Predložené tézy prednášky k menovaniu profesorom predstavujú prierez výsledkov výskumu uchádzača v oblasti identifikácie systémov s využitím metód soft computingu. Hlavnými aplikačnými oblasťami výskumu je oblasť predikcií spotrieb energií v budovách a oblasť soft pohonov a systémov využívajúcich tieto pohony. V prvej oblasti je dôraz kladený na identifikáciu predikčných modelov pre predpovede spotreby plynu v rôznych typoch budov založených na regresných modeloch s chybami vo forme časových radov. Metódy soft computingu sú využité pre paralelné NAR modely zložiek vlnkového rozkladu optimalizovaných pomocou bGA algoritmu. V oblasti soft pohonov sú metódy soft computingu využité pre 3 typy systémov (manipulátor s 3 stupňami voľnosti poháňaný fluidnými svalmi, rameno so spojitou kinematikou a Peano-HASEL pohon), kde sa aplikovali dopredné neurónové siete pre identifikáciu trenia v kĺboch a aproximáciu statických charakteristík pohonov, ansámbl rekurentných sietí pre black box modelovanie dynamiky a hierarchické LMN modely pre modelovanie priamej kinematiky.

Abstract

The presented theses of the lecture for the appointment as a professor represent a cross-section of the applicant's research results in the field of system identification using soft computing methods. The main application areas of the research are the area of predictions of energy consumption in buildings and the area of soft actuators and systems using soft actuators. In the first area, the emphasis is placed on the identification of prediction models for gas consumption forecasts in different types of buildings based on regression models with errors in the form of time series. Soft computing methods are used for parallel NAR models of wavelet decomposition components optimized using the bGA algorithm. In the field of soft actuators, soft computing methods are used for 3 types of systems (a manipulator with 3 degrees of freedom driven by fluid muscles, an arm with continuous kinematics and a Peano-HASEL drive), where forward neural networks were applied to identify friction in joints and approximate the static characteristics of fluidic muscles, an ensemble of recurrent networks for black box dynamics modeling and hierarchical LMN models for direct kinematics modeling.

Obsah

1	Úvod	5
2	Metódy soft computingu v identifikácii smart systémov.....	7
3	Predikcia spotreby energií v budovách s využitím soft computingu	8
3.1	Problém predikcie dennej spotreby plynu v rôznych typoch budov využitím metód soft computingu	9
3.2	Identifikácia regWANN modelu.....	10
3.3	Optimalizácia regWANN modelu	14
3.4	Výsledky aplikácie regWANN modelu pre 7-dňové predpovede	14
4	Metódy soft computingu v identifikácii systémov so soft pohonmi.....	17
4.1	Soft computing pre identifikáciu systémov so soft pohonmi	18
4.2	Manipulátor s 3 stupňami voľnosti poháňaný fluidnými svalmi.....	19
4.3	Identifikácia dynamiky pohonu Peano-HASEL	22
4.4	Identifikácia kinematiky spojitého fluidného ramena s 2 segmentami	26
5	Prínosy pre vedu, prax a pedagogickú činnosť	29
6	Záver.....	31
7	Zoznam použitej literatúry	31
8	Zoznam použitých symbolov a skratiek.....	34
9	Koncepcia vedeckej činnosti a výučby	37
10	Prílohy	39
10.1	Tvorivá a publikačná činnosť	39
10.2	Pedagogická činnosť a výchova doktorandov	48
10.3	Odborný životopis.....	49

1 ÚVOD

Predkladané tézy sú prierezom vedeckej činnosti uchádzača, ktorej sa venuje počas svojho pôsobenia na Fakulte výrobných technológií so sídlom v Prešove, Technickej univerzity v Košiciach. Výskumná činnosť uchádzača bola od začiatku jeho pôsobenia na fakulte orientovaná na modelovanie a riadenie systémov a procesov s podporou metód soft computingu s aplikáciou v oblastiach soft pohonov a robotiky a predikcie časových radov.

Uchádzač začal svoju vedeckú činnosť v oblasti modelovania a riadenia systémov poháňaných umelými svalmi na doktorandskom štúdiu, ktoré úspešne zakončil v r.2008 obhájením práce na tému „Riadenie polohového servosystému na báze pneumatických umelých svalov s aplikáciou akceleračnej slučky“. Od ukončenia doktorandského štúdia uchádzač rozšíril oblasť záujmu o bio-inšpirované výpočtové metódy patriace do oblasti soft computingu s ich využitím pre modelovanie resp. identifikáciu a riadenie systémov využívajúcich pneumatické umelé svaly a neskôr fluidné svaly. Táto oblasť bola neskôr rozšírená aj na iné typy soft pohonov, predovšetkým polymérového typu. Rozšírenie aplikačných možností pre metódy soft computingu bolo možné vďaka spolupráci s partnermi v praxi z oblasti energetiky, kde sa ako perspektívna ukázala oblasť predpovedí spotrieb energií v reálnych objektoch ako sú bytové a nebytové typy budov.

Výskum realizovaný v predmetných oblastiach bol podporený viacerými projektami, v ktorých mal uchádzač niektorú z kľúčových úloh (vedúci projektu, zástupca vedúceho projektu, osoba zodpovedná za aktivitu) počas ktorých mal možnosť viesť výskumný tím pracujúci na konkrétnom probléme. Pre oblasť umelých svalov bol dôležitým výskumným projektom ŠF EÚ „Výskum a vývoj inteligentných nekonvenčných aktuátorov na báze umelých svalov“ a pre oblasť aplikácie metód soft computingu v riadení procesov výskumný projekt ŠF EÚ „Výskum a vývoj inteligentných systémov riadenia výroby a dodávky tepla na báze biomasy“. Ďalšiu podporu pre tento smer poskytli projekty Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR a SAV (VEGA) „Výskum metód modelovania a kompenzácie hysterézy v pneumatických umelých svaloch a mechanizmoch nimi poháňaných pre zvýšenie presnosti regulácie s podporou výpočtovej inteligencie“ a Výskum inteligentného manipulačného zariadenia na báze pneumatických umelých svalov s tromi stupňami voľnosti“ ako aj práve prebiehajúce projekty „Výskum modelovania a riadenia soft robotických ramien so spojitou kinematikou na báze fluidných svalov s využitím bio-inšpirovaných výpočtových metód“ a „Výskum hybridných predikčných modelov spotreby energií s využitím výpočtovej inteligencie“. Rovnako významným bol projekt Agentúry na podporu výskumu a vývoja (APVV) s názvom „Prediktívny systém monitorovania a vyhodnocovania účinnosti výroby a dodávky tepla s využitím techník výpočtovej inteligencie“.

V uvedených projektoch sa buď pod priamym vedením uchádzača v rámci projektu, prípadne aktivity alebo v spolupráci s ním riešili problémy identifikácie

systemov vykazujúcich nelineárne a časovo premenné chovanie v oblasti soft robotiky s aplikáciou rôznych typov architektúr modelov z oblasti soft computingu (dopredné a rekurentné neurónové siete, fuzzy systémy, neuro-fuzzy systémy) ako aj metaheuristické algoritmy pre ich optimalizáciu (simulované žihanie, evolučné algoritmy). Špecifickejšia oblasť aplikácie boli rigidné mechanizmy s jedným alebo viacerými stupňami voľnosti poháňané fluidnými svalmi, vrátane multiparalelného zapojenia. V poslednom období bola oblasť aplikácie rozšírená aj na ďalšie typy soft pohonov, predovšetkým polymérového typu (zahŕňajúca pohony na báze dielektrických elastomérov (DEA), iónových kompozitov polymér-kov (IPMC) a hydraulicky zosilnených samoliečiacich sa elastomérov (HASEL)).

Spolupráca fakulty s praxou umožnila implementovať spôsob zberu dát z meračov tepla v rôznych budovách po celej krajine. To vytvorilo predpoklad pre riešenie aplikovaného problému predikcie spotrieb energií v týchto objektoch s možnosťami podpory efektívneho manažmentu energetiky budov. V rámci riešenia tejto problematiky boli využité metódy soft computingu v identifikácii predikčných modelov pre predpovede dennej spotreby plynu vo viacerých typoch budov. Výsledkom výskumu bolo navrhnutie bGA-optimalizovaného regWANN modelu umožňujúceho 7-dňovú predpoveď dennej spotreby plynu v rôznych typoch budov.

Niektoré z výsledkov výskumu vedeného na pracovisku alebo ako výstup spolupráce s inými inštitúciami boli uverejnené v rôznych časopisoch (vrátane troch patriacich do D1 kategórie). Okrem publikácií bol pôvodcom alebo spolupôvodcom 19 patentov a 15 úžitkových vzorov z ktorých väčšina je viazaná na výskum v oblasti identifikácie systémov s podporou využitia metód soft computingu.

2 METÓDY SOFT COMPUTINGU V IDENTIFIKÁCIÍ SMART SYSTÉMOV

Smart systémy možno všeobecne považovať za technické systémy, ktorých charakteristiky umožňujú dosahovať optimálne chovanie pozorované v biologických systémoch prostredníctvom emulácie ich schopnosti adaptácie a integrovaného dizajnu [1]. Možno teda hovoriť o systémoch pozostávajúcich zo snímačov a pohonov, ktoré sú integrálnou súčasťou samotného systému. Vzhľadom k súčasnému rozmachu oblastí ako sú umelá inteligencia alebo IoT, je možné od smart systémov očakávať rozšírenie ich možností pre dosiahnutie vyššie uvedeného optimálneho chovania v reálnom prostredí. K hlavným charakteristikám smart systémov teda patria:

- I. Interkonektivita – prepojenie a schopnosť komunikovať medzi rôznymi komponentami a subsystémami
- II. Autonómne chovanie – schopnosť rozhodovať a pracovať bez intervencie ľudí
- III. Adaptabilita – schopnosť modifikácie chovania v odozve na zmeny v prostredí/podnetoch
- IV. Účinnosť – optimalizácia využitia energie a prevádzkových vlastností

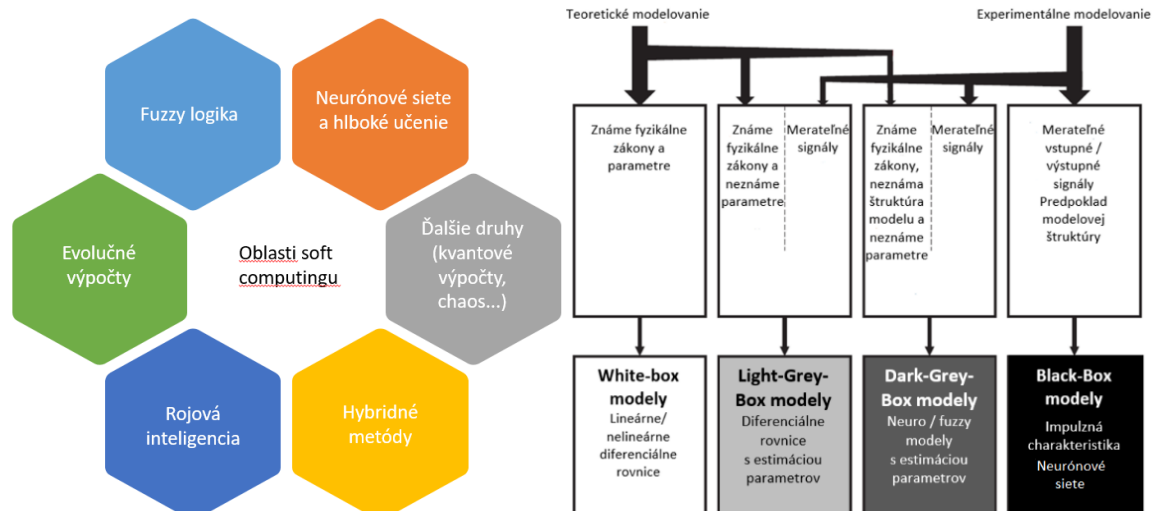
Smart systémy ako také nachádzajú využitie v rôznych oblastiach, pričom ich forma je rôznorodá a môže siahať od smart pohonov pozostávajúcich z konvenčných komponentov integrovaných v jednom celku až po smart pohony na báze smart aktívnych materiálov. Ďalšou z oblastí, kde niektoré komponenty môžu vykazovať charakteristiky smart systémov je oblasť smart meteringu v energetike a prevádzke budov.

Dostupnosť modelov systémov je zásadným prvkom pri návrhu riadenia (model-based control design), jeho optimalizácii alebo predikcii či simulácii jeho chovania. Smart systémy sa typicky vyznačujú charakteristikami, ktoré odvedenia analytických modelov sťažujú (nelineárne a časovo premenné chovanie, prítomnosť javov ako je hysteréza alebo creep a pod.). Aj z tohto dôvodu má v oblasti smart systémov a tvorbe ich modelov zásadný význam identifikácia. Typy na dátach založených modelov patriacich do oblasti identifikácie sú uvedené na Obr. 2-1.

Soft computing je oblasťou výpočtových metód, ktoré poskytujú približné riešenia výpočtovo zložitých problémov, kde získať presné riešenia môže byť príliš časovo náročné alebo nemožné. Viaceré z týchto metód sú inšpirované biologickými procesmi a predstavujú veľmi účinné nástroje na riešenie praktických problémov. K hlavným oblastiam patria:

- I. Neurónové siete a hlboké učenie
- II. Fuzzy logika a fuzzy systémy
- III. Evolučné výpočty

- IV. Rojová inteligencia
- V. Hybridné metódy
- VI. Ďalšie typy (metódy využívajúce chaos, kvantové metódy atď.)



Obr. 2-1 Metódy soft computingu a typy modelov

Metódy soft computingu majú v oblasti identifikácie nelineárnych systémov význam napr. z dôvodu univerzálnych aproximačných vlastností, možnosti automatickej extrakcie príznakov, schopnosti modelovať zložité dynamické systémy alebo riešenia NP-tiažkých výpočtových problémov.

3 PREDIKCIA SPOTREBY ENERGIÍ V BUDOVÁCH S VYUŽITÍM SOFT COMPUTINGU

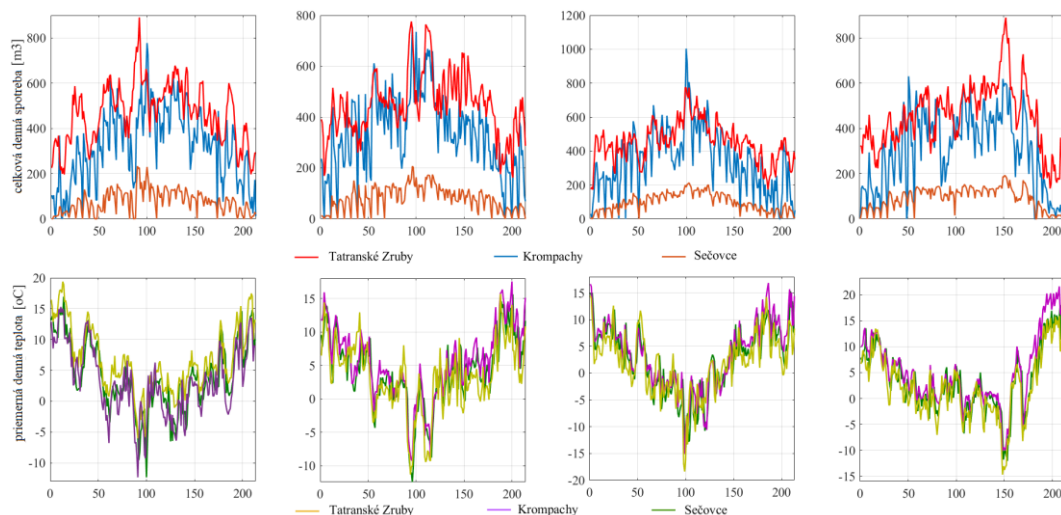
Predikcia spotreby energií je dôležitým aspektom prevádzky budov z pohľadu snahy zefektívniť ich energetické ukazovatele ako aj redukovať potenciálny vplyv na prostredie. V niektorých oblastiach sú dôležité krátke predikčné horizonty (napr. elektrická energia), inde môže mať väčší význam predikcia celkovej dennej spotreby (napr. plyn). Podmienky danej aplikácie obvykle určujú vhodnosť predikčného modelu [2]. Pre predikciu spotreby energií v rôznych typoch budov bolo úspešne použitých viacero prístupov. Aj keď ich univerzálne akceptovaná klasifikácia nie je k dispozícii, v [3] sú uvedené 3 oblasti do ktorých spadá väčšina volených metód: oblasť inžinierskych metód, oblasť štatistických metód a oblasť metód umelej inteligencie. Inžinierske metódy využívajú štandardné výpočty založené na známych fyzikálnych javoch (v tomto prípade z oblasti termodynamiky a špecifickejšie energetiky budov) a vyžadujú znalosť veľkého množstva fyzikálnych premenných a hodnôt parametrov. V porovnaní s týmto prístupom na dátach založené prístupy a nimi identifikované predikčné modely typicky nemajú súvislosť s fyzikálnymi zákonmi charakterizujúcimi prebiehajúce procesy (to platí predovšetkým pre modely

typu „black box“, pri vytváraní „grey box“ modelov je možné prístup založený na znalostiach a prístup založený na dátach kombinovať).

Z pohľadu vytvárania predikčných modelov je možné konštatovať, že problém predikcie spotreby energií v budovách je problémom predikcie časových radov, a aplikácia jednotlivých prístupov v rôznych aplikačných oblastiach môže zdieľať spoločné znaky (a ich závery je možné do istej miery zovšeobecniť) [4],[5]. Všeobecne možno konštatovať, že procesy charakterizujúce spotreby energií v budovách sú z fyzikálneho hľadiska veľmi zložité a tvorba predikčných (dynamických) modelov s vyššou presnosťou môže byť náročná. Z tohto dôvodu je využívanie AI/ML v danej oblasti veľmi perspektívne a je predmetom intenzívneho výskumu. Je však potrebné konštatovať, že časové rady reálnych procesov je často možné s určitou presnosťou modelovať aj pomocou lineárnych modelov typu AR(I)MA/SAR(I)MA, ktoré sú pre oblasť predikcie (napr. aj spotreby energií) s obľubou využívané či už samostatne alebo v kombinácii s inými typmi modelov. Z oblasti AI/ML sa pre problém predikcie spotrieb energií aplikujú najčastejšie práve neurónové siete s rôznymi typmi architektúr (FFNN alebo RBF v podobe NARX modelov, prípadne rekurentné siete rôzneho typu) alebo neuro-fuzzy modely (napr. ANFIS). Okrem samotných rôznych typov architektúr modelov je možné charakteristiky modelov pre účely predikcie spotreby energií zlepšiť použitím rôznych metód spracovania signálov. Okrem FFT je v danej oblasti obzvlášť vhodná WT, ktorá (na rozdiel od FFT) umožňuje lokalizáciu nielen vo frekvencii ale aj čase. Mimo štandardných plytkých neurónových sietí sa v súlade so súčasným trendom rozvoja hlbokého učenia veľmi často aplikujú aj modely využívajúce hlboké architektúry, predovšetkým rekurentné siete typu LSTM alebo GRU a ich variácie.

3.1 Problém predikcie dennej spotreby plynu v rôznych typoch budov využitím metód soft computingu

V prebiehajúcom výskume predikcií spotreby energií na FVT TUKE boli využívané reálne dáta z budov prevádzkovaných pre rôzne účely. Pri riešení problému predikcie spotreby plynu boli z dôvodu účelnosti a charakteristiky dát zvolené tri typy budov charakterizované rôznymi profilmi spotreby plynu: základná škola v Krompachoch, zdravotnícke zariadenie v Sečovciach a hotel/ubytovňa v Tatranských Zruboch. Primárne dáta záujmu predstavovali celkové denné spotreby plynu v jednotlivých budovách udané v m³. Hoci išlo primárne o problém riešenia časových radov so samotnou spotrebou ako hlavnou premennou, prirodzene silná korelácia tejto premennej s vonkajšou teplotou dávala predpoklad pre jej využitie pri identifikácii predikčných modelov. Využitie dáta predstavovali obdobie 4 rokov (2014, 2015, 2016 a 2017) s tým, že pre samotnú identifikáciu boli využité len vykurovacie sezóny so začiatkami prvého októbra a koncami prvého mája (čomu odpovedal počet vzoriek 213 alebo 214 pri prestupnom roku) (Obr. 3-1).



Obr. 3-1 Historické dáta celkovej dennej spotreby plynu a priemerných denných teplôt v troch rôznych typoch budov

Dáta na Obr. 3-1 potvrdzujú silnú koreláciu spotreby plynu v skúmaných budovách s vonkajšou teplotou, pričom dobre viditeľná je aj sezónnosť časových radov. Táto skutočnosť podporuje využitie regresných typov modelov pre časové rady so sezónnym charakterom, teda napr. typ regSARMA, ktorý možno definovať takto:

$$y_t = \beta_1 x_{t1} + \beta_2 x_{t2} + \dots + \beta_k x_{tk} + \mu_t \quad (3.1)$$

kde μ_t – je ARMA process s nulovou strednou hodnotou s nasledujúcim tvarom:

$$a(L)\mu_t = b(L)\varepsilon_t \quad (3.2)$$

pričom $t = 1, \dots, K$, y_t – časový rad odozvy, β_1, \dots, β_k – regresné koeficienty pre k prediktorov, ε_t – rad inovácií, $L^j y_t = y_{t-j}$ diferenčný operátor, $a(L) = (1 - a_1 L - \dots - a_p L^p)$ nesezónny autoregresný polynóm p -tého stupňa, $b(L) = (1 + b_1 L + \dots + b_q L^q)$ nesezónny polynóm kľzavého priemeru q -tého stupňa. Ak sú rezíduá získané po aplikácii rovnice (3.1) korelované, je možné pomocou LS získať $\hat{\beta}$ a pokračovať v modelovaní rezíduí pomocou modelovania časových radov [6].

3.2 Identifikácia regWANN modelu

Na základe podmienok určených dátami a predmetnými objektmi boli stanovené 3 ciele:

- I. Odvodiť predikčný model typu regARMA/SARMA rigoróznym spôsobom tak, aby bolo možné hodnotiť zlepšenia na základe štandardného modelu s čo najlepšou kvalitou
- II. Navrhnuť model so zlepšenými charakteristikami s jednoduchým použitím pre tepelné zdroje, kde je prístup k širokému spektru meteorologických dát obmedzený
- III. Systematizovať proces identifikácie a predikcie pre týždňový predikčný horizont pre potenciálne použitie modelu v reálnom čase

Pri navrhovaní vylepšeného modelu bolo snahou zachovať princíp reg(S)ARMA modelov v zmysle využitia teplotnej regresie a modelovania rezíduí ako časového radu. Vhodnosť tohto prístupu potvrdili počiatkové experimenty s priamou aplikáciou navrhnutých metód na časový rad spotrieb plynu bez využitia priemernej vonkajšej teploty. Navyše, na základe analýzy dát z predošlého výskumu bola potvrdená multiperiodicita časových radov prezentovaná prítomnosťou cyklov s rôznou periódou, ktoré charakterizujú špecifické detaily jednotlivých profilov spotrieb v daných budovách [7].

V súvislosti s týmito pozorovaniami sa ako vhodné javilo využitie vlnkovej transformácie v MRA (multiresolution analysis) forme. Pokiaľ sa uvažuje diskrétna vlnková transformácia (DWT) platí (za predpokladu $s = 2^j$ a $\tau = m2^j, j, m \in \mathbb{Z}$)

$$Wf(m, j) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{m2^j, 2^j}^*(t)dt \text{ a } \psi_{m2^j, 2^j}(t) = \frac{1}{2^{j/2}}\psi\left(\frac{t-m2^j}{2^j}\right) \quad (3.3)$$

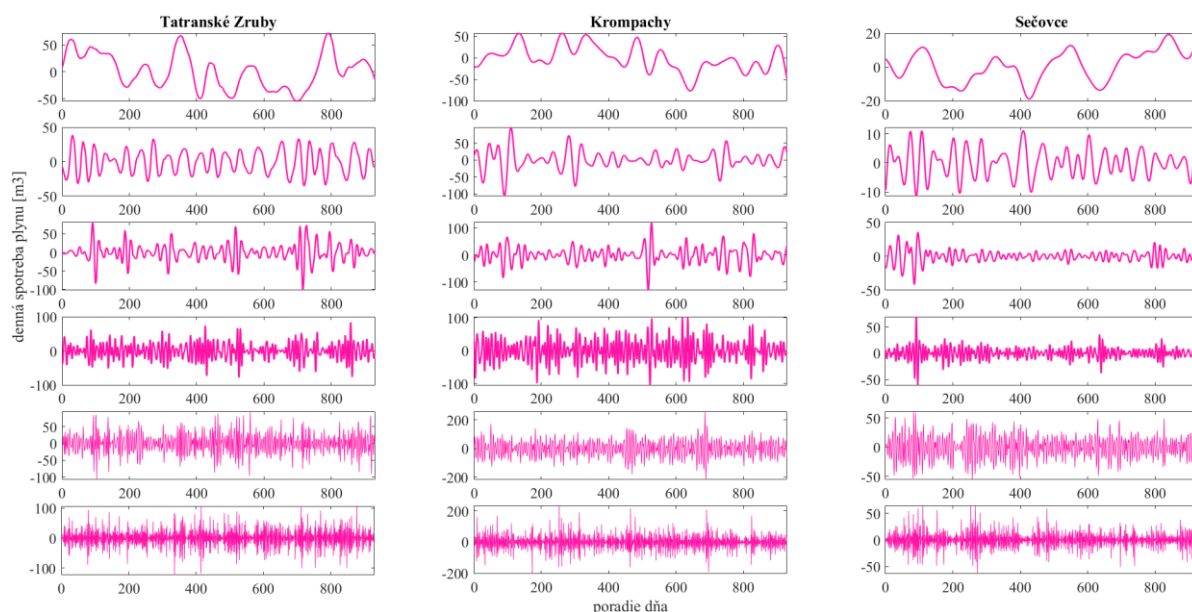
kde s – škály a τ – translácie (získané zo spojitaj WT len pre určité hodnoty s, τ). Aplikáciou definície škálovacej funkcie pre spojitú WT možno signál rozložiť [8]:

$$x(t) = \sum_m a_{m, j_0} \phi_{m, j_0}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_m d_{m, j_0} \psi_{m, j_0}(t) = A_{j_0} + \sum_{j=1}^{j_0} D_j \quad (3.4)$$

kde $\{a_{m, j_0}\}$ sú koeficienty aproximácie na danej škále, a $\{d_{m, j_0}\}, j = 1, \dots, j_0$, sú koeficienty detailov na tejto a všetkých jemnejších škálach. Rozklad časových radov spotrieb pre materský typ vlnky db5 a úroveň dekompozície 5 (A5+D1+D2+D3+D4+D5) je na Obr. 3-2.

V oblasti predpovedí časových radov sa typicky používajú 2 prístupy, a to prístup priamej predpovede alebo prístup rekurzívnej predpovede. Častejšie využívaným je prístup rekurzívnej predpovede, kde pre jednokrokovú predpoveď možno písať [9]:

$$y_t = \psi(\mathbf{x}_{t-1}; \boldsymbol{\theta}) + e_t \text{ a } \mathbf{x}_t = [y_t, \dots, y_{t-n_e+1}]' \quad (3.5)$$



Obr. 3-2 Dekompozícia rezíduí spotrieb energií pomocou vlniek typu db5 a úrovňou dekompozície 5 na aproximáciu a detaily

kde ψ je funkcia ktorú realizuje estimovaný model, θ je vektor parametrov modelu, a n_e je vložený (embedding) rozmer.

Rekurzívny prístup pre m -krokovú predpoveď možno vyjadriť

$$\hat{\psi}^{(m)}(\mathbf{x}_t) = \hat{\psi} \left([\hat{\psi}^{(m-1)}(\mathbf{x}_t), \dots, \hat{\psi}^{(m-p)}(\mathbf{x}_t)]' \right) \quad (3.6)$$

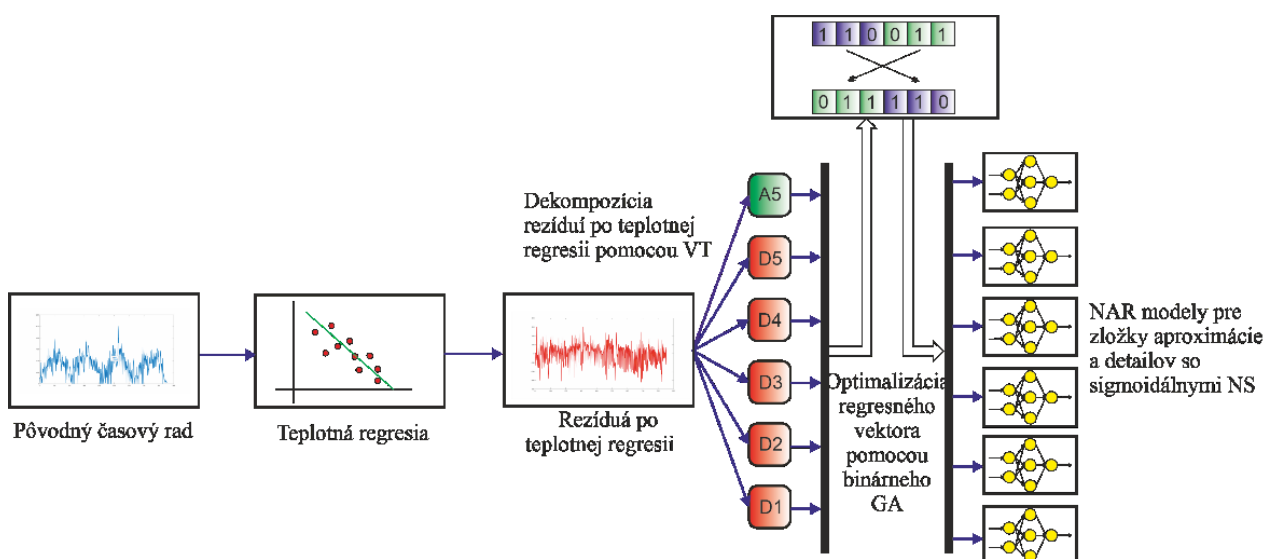
kde $m > 0$, $\hat{\psi}$ je funkcia ψ ale s estimovanými parametrami $\hat{\theta}$ a p je estimovaný vložený rozmer. Pri využití sigmoidálnej neurónovej siete pre realizáciu funkcie $\hat{\psi}$ má vzťah podobu

$$\hat{\psi}^{(m)}(\mathbf{x}_t) = \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{e^{(b_k(x_t - c_k))_{+1}} + 1} \left(\left[\left(\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{e^{(b_k(x_t - c_k))_{+1}} + 1} \right)^{(m-1)}, \dots, \left(\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{e^{(b_k(x_t - c_k))_{+1}} + 1} \right)^{(m-p)} \right]' \right) \quad (3.7)$$

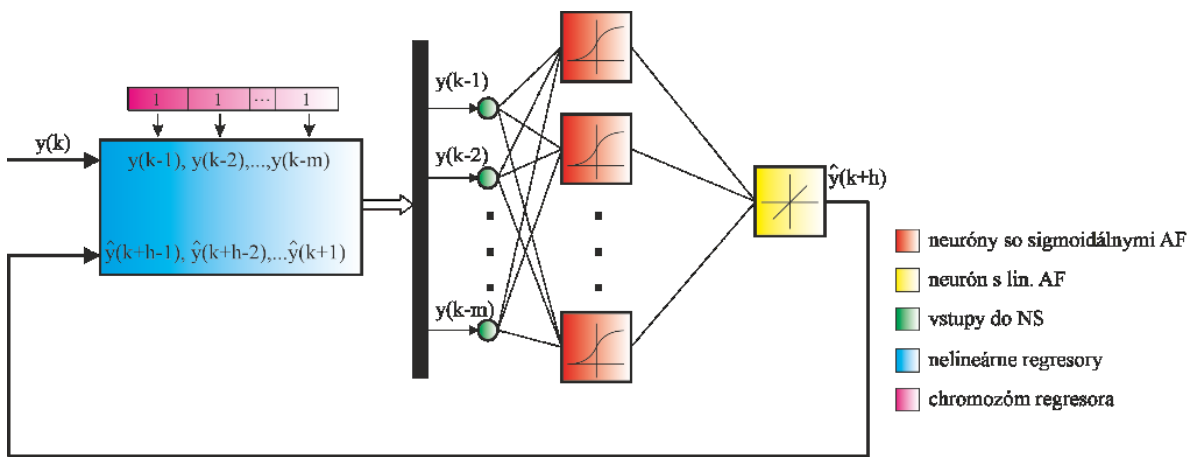
kde n – počet neurónov a a_k, b_k, c_k sú parametre k -tého neurónu.

Vo výskume bol zavedený model regWANN, kde predpona reg súvisí s využitím teplotnej regresie a WANN, znamená model založený na neurónových sieťach a vlnkovej dekompozícii. Pre každú zo zložiek rozloženého signálu bol využitý samostatný model. Keďže však vzťah medzi vloženým rozmerom n_e a odhadovaným rozmerom p bol po WT rozklade stratený, bol pre hľadanie regresorov použitý vyhľadávací algoritmus. Konkrétne išlo o binárny genetický algoritmus (bGA), ktorého chromozómy pozostávali z binárneho vektora, kde logická jednotka odpovedala prítomnosti a logická nula neprítomnosti príslušného oneskorenia v regresnom vektore. Tento prístup je možné pozorovať na schéme na Obr. 3-3.

Samotná implementácia využitia tohto modelu pre 7-dňovú predpoveď dennej spotreby plynu je naznačená v schéme na Obr. 3-4. Keďže ide o rekurzívny spôsob predpovede, model na základe optimalizovaných regresorov pre jednotlivé zložky v danom časovom kroku generuje 1-krokovú predpoveď, ktorá je h -násobne opakovaná (v našom prípade $h = 7$) a privedená späť na vstup cez spätnú väzbu.



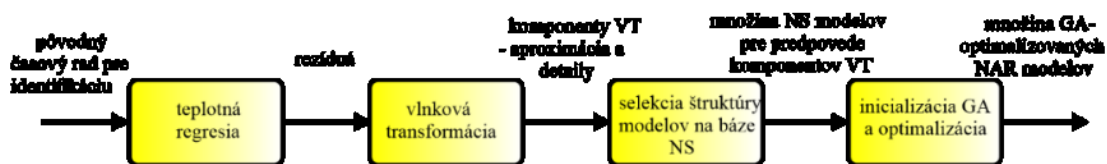
Obr. 3-3 Schéma vylepšeného regWANN modelu s optimalizáciou pomocou bGA



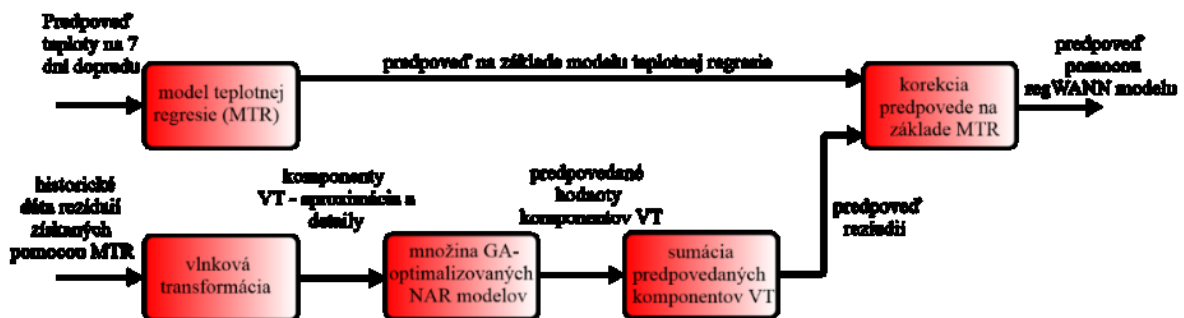
Obr. 3-4 7-dňová predpoveď pomocou identifikovaného regWANN modelu

Ako súčasť realizácie výskumu bola spracovaná metodológia pre využitie regWANN modelu pre predpovede dennej spotreby plynu v budovách. Jej podrobná podoba bola publikovaná v [2]. Primárne je rozdelená do 2 hlavných častí, z ktorých jedna je identifikácia a druhá je predpoveď. Hoci je uvádzaná pre predikčný horizont $h = 7$, je možné ju v danej podobe použiť aj pre iné hodnoty h (pozn. je potrebné si však uvedomiť, že zásadným prvkom je teplotná regresia, ktorá si vyžaduje predpovede dennej teploty okolia pre daný časový horizont, čím presnosť pri použití modelu pre $h > 7$ nezanedbateľne klesá). Prehľadne je uvedená metodológia zobrazená na Obr. 3-5, kde kroky odpovedajúce procesu identifikácie v navrhnutom spôsobe sú predpokladane realizované „offline“ a kroky odpovedajúce procesu predpovedí „online“ (resp. offline s využitím predpovedí teploty a len historickými dátami spotreby).

Proces identifikácie



Predpovede



Obr. 3-5 Postup identifikácie a predpovede spotrieb plynu pomocou regWANN modelu

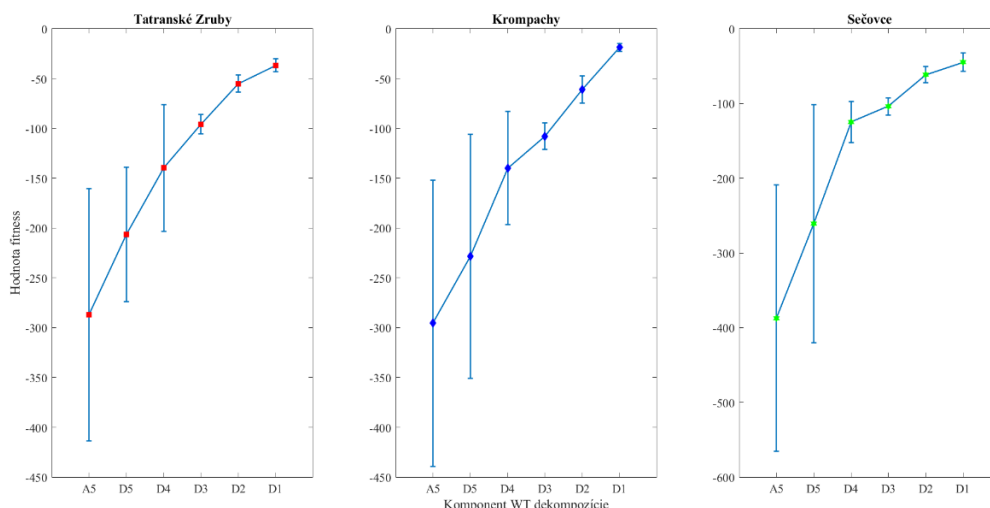
3.3 Optimalizácia regWANN modelu

Štruktúra WANN modelu podľa Obr. 3-3 odpovedá paralelnému zapojeniu NAR-NN modelov, ktorých počet v navrhovanom prístupe odpovedá počtu zložiek dekomponovaného časového radu. NAR modely využívajú autoregresiu minulých vzoriek pre určenie nasledujúcej, pričom zložky regresného vektora môžu mať rôzne hodnoty a môžu tiež byť rôznym spôsobom kombinované v závislosti od systému resp. procesu, ktorý je cieľom identifikácie [10]. Pre optimalizáciu regresných vektorov bol zvolený bGA algoritmus, ktorý pracuje priamo s binárnym kódovaním chromozómov. Selekcia chromozómov do reprodukčnej skupiny bola volená pomocou turnajovej metódy s malým zastúpením elitných jedincov. Definovaná fitness funkcia zohľadňovala ako hodnotu fitu (NRMSE) pri predpovediach na validačnej množine, tak aj počet regresorov v jednotlivých regresných vektoroch a mala podobu:

$$F = - \left(K_e \times NRMSE + K_r \times \frac{K}{|\{x \in \mathcal{R} | x=1\}|} \right) \quad (3.8)$$

kde K_e je váha chybového kritéria (nastavená na 0.5), K_r je váha veľkosti regresného vektora (nastavená na 0.5), a K je normalizačná konštanta (nastavená na 300).

Ako je možné vidieť z grafov fitness funkcií pre NAR-NN modely jednotlivých komponentov pre všetky 3 budovy (Obr. 3-6), A5 komponent predstavoval najnižšiu priemernú hodnotu fitness funkcie s najväčším rozptylom. To bolo spôsobené najväčšou citlivosťou F na zmeny regresorov pre tento komponent ako aj veľkým vplyvom na výslednú hodnotu chyby. Jemnejšie detaily potrebovali viac regresorov (vyššia hodnota F) a vplyv na chybu bol menší.



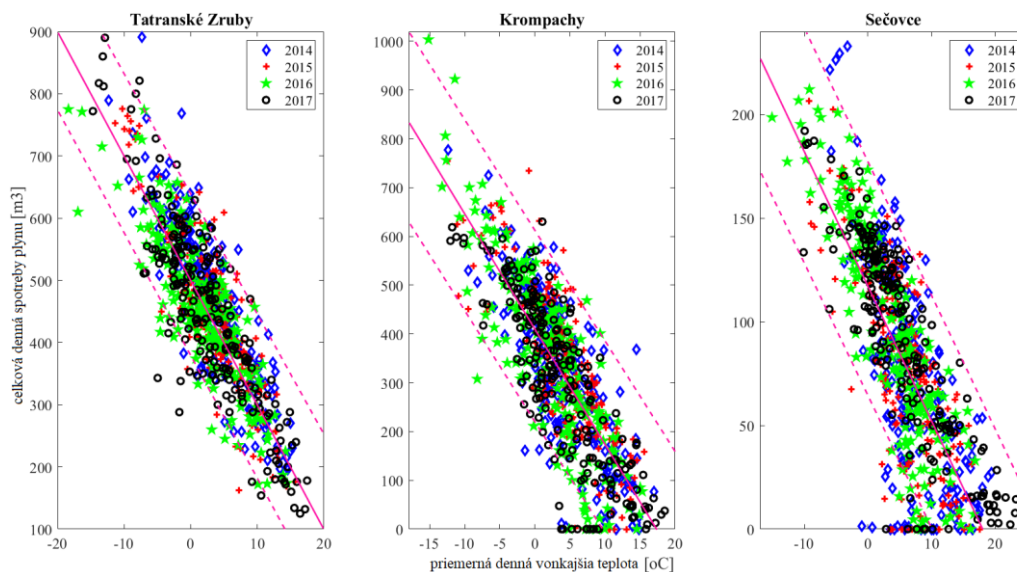
Obr. 3-6 Grafy fitness funkcie s chybovými úsečkami pre komponenty WT dekompozície

3.4 Výsledky aplikácie regWANN modelu pre 7-dňové predpovede

Pre účely predpovedí denných spotrieb plynu bol odvodený predikčný model na báze modelov (S)ARMA ako aj vylepšený model s rozkladom pomocou WT a optimalizovanými NAR-NN modelmi. V oboch prípadoch bolo prvým zásadným krokom vytvorenie rezíduí vo forme časových radov po použití regresného modelu

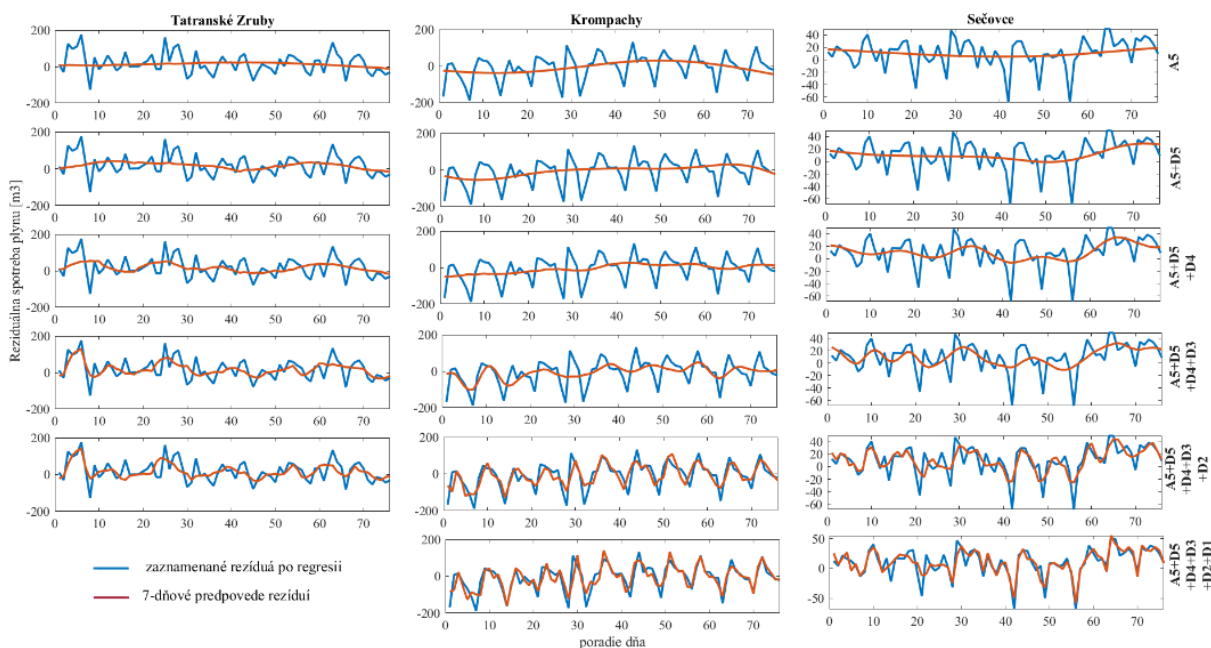
spotreby plynu a vonkajšej teploty. Výsledky identifikovaných modelov pre jednotlivé typy budov v Tatranských Zruboch, Krompachoch aj Sečovciach je možné vidieť na Obr. 3-7. Spolu so samotným výstupom modelu (plná čiara) sú vyznačené aj 95% predikčné hranice (prerušované čiary). Napriek silnej korelácii oboch veličín je zrejmé, že použitie jednoduchého regresného modelu pre predpovede spotreby vedie k značným chybám v predpovediach a žiadnym spôsobom nezohľadňuje históriu spotrieb, s ktorými je spotreba o nasledujúcich 7 dní tiež korelovaná. V zobrazených dátach je možné pozorovať aj rozdiely v profiloch spotrieb jednotlivých budov, kde spotreba plynu v Tatranských Zruboch nikdy neklesala na nulu na rozdiel od Sečoviec a Krompách. Vysokú mieru korelácie potvrdzujú aj hodnoty koeficientu determinácie R^2 , ktorý mal pre TZ hodnotu 0,7382, pre S hodnotu 0,6319 a pre K hodnotu 0,6646.

Pre zvýšenie presnosti predpovedí je potrebné modelovať rezíduá po aplikácii regresného modelu ako časový rad. Rozklad jednotlivých rezíduí pomocou WT ukázal predovšetkým v prípade zdravotníckeho zariadenia a najmä základnej školy prítomnosť periodicky sa opakujúcich cyklov (najvýraznejšie sa prejavoval týždenný, zastúpené však boli aj iné hodnoty periód). Uvedené cykly sú dobre viditeľné na rozkladoch signálov pomocou WT na príslušnej úrovni detailu (Obr. 3-2).



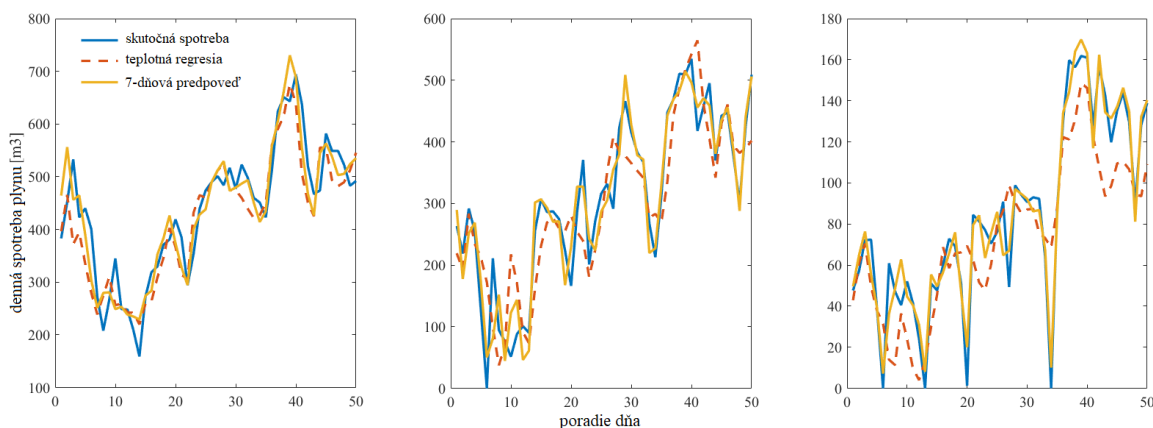
Obr. 3-7 Regresný model dennej spotreby plynu a vonkajšej teploty pre 3 skúmané objekty

Kvalita regresných modelov s modelovanými časovými rezíduami je určovaná (po samotnej regresii) práve modelovaním v časovej oblasti. Pri využití WT sa problém presnosti samotných rezíduí transformoval na problém presnosti modelovania jednotlivých zložiek rozkladu (teda aproximácie a detailov). Presnosť modelovania každej zo zložiek potom pri finálnej sumácii ovplyvňovala presnosť predpovedí získaných pomocou tohto typu predikčných modelov. Na Obr. 3-8 je možné pozorovať porovnanie reziduálnych priebehov (vyznačených modrou) a presnosti ich modelovania pri zaradovaní jednotlivých modelov pre 7-dňové predpovede. Dáta prezentujú 76-dňový testovaný časový úsek. Pre Tatranské Zruby je o jeden priebeh menej z dôvodu, že D1 zložku rozkladov nebolo možné týmto spôsobom modelovať.

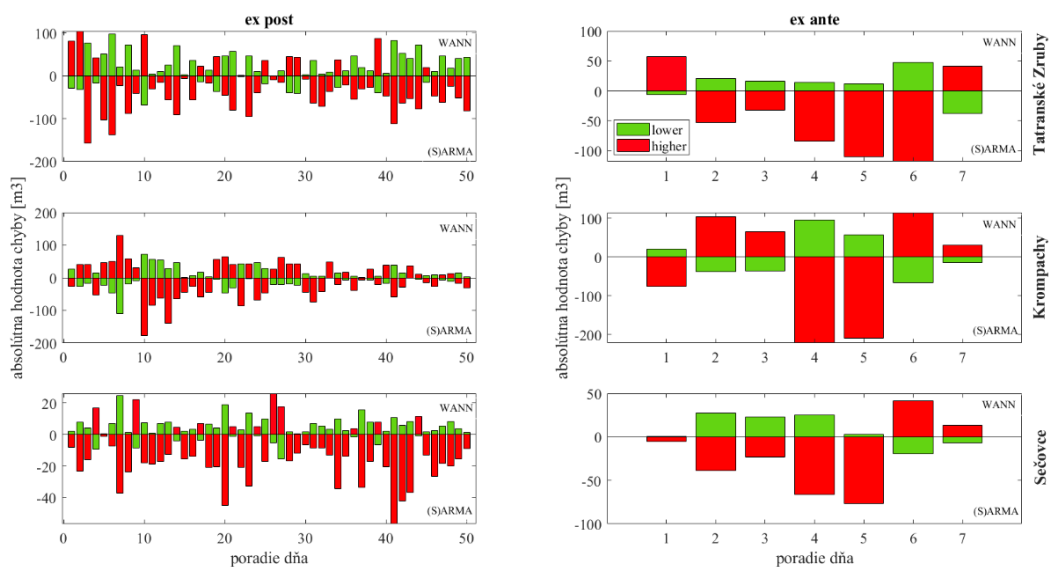


Obr. 3-8 7-dňové predpovede pre rezíduá po teplotnej regresii a vplyv jednotlivých zložiek na výslednú presnosť

Výsledky použitia regWANN modelu boli porovnávané s reg(S)ARMA modelmi dvoma spôsobmi, pričom prvým boli predpovede *ex post*, kedy boli pre regresiu využité teploty skutočne zaznamenané v daných dňoch a druhým boli predpovede *ex ante*, kedy boli pre regresiu použité teploty predpovedané na týždeň dopredu od daného dňa. Práve druhý spôsob predstavuje analógiu reálneho použitia predikčného modelu v prevádzke. Pri testovaní *ex ante* bol počet vzoriek obmedzený práve z dôvodu všeobecnej nedostupnosti historických dát predpovedí počasia a boli využité len dáta, ktoré boli zozbierané počas prípravy a mohli byť otestované (7 dní). Porovnaním priebehov pre *ex post* predpovede na 7 dní počas 50-dňového časového úseku je možné vidieť výrazné zlepšenie presnosti predikcie v porovnaní s využitím teplotnej regresie u všetkých typoch budov.



Obr. 3-9 Výsledky použitia regWANN modelu pre *ex post* predpovede počas 50 dní



Obr. 3-10 Porovnanie výsledkov $reg(S)ARMA$ modelov s $regWANN$ modelom pre *ex ante* a *ex post* predpovede

Finálne porovnanie kvality oboch typov modelov ($reg(S)ARMA$ a $regWANN$) je možné vidieť na Obr. 3-10 vyjadrené pomocou stĺpcových grafov, kde y-ová os odpovedá absolútnym hodnotám chyby pre jednotlivý typ modelu a rôzne dni predpovedí (*ex ante* aj *ex post*). V tomto prípade je možné pozorovať významné zlepšenie kvality predpovedí aj voči $reg(S)ARMA$ modelom pre každú z budov, pričom zlepšenia predstavovali percentuálne hodnotu od 18% do 57%. V prípade $regWANN$ modelu bola zaznamenaná aj určitá schopnosť kompenzovať výrazne nepresné predpovede teploty na týždeň dopredu, v súvislosti s neočakávaným náhlym poklesom teploty v testovanom období [2]. Prístup regresného $ARMA/SARMA$ modelu bol využitý v prebiehajúcim riešení aj pre iný typ budovy v práci [11].

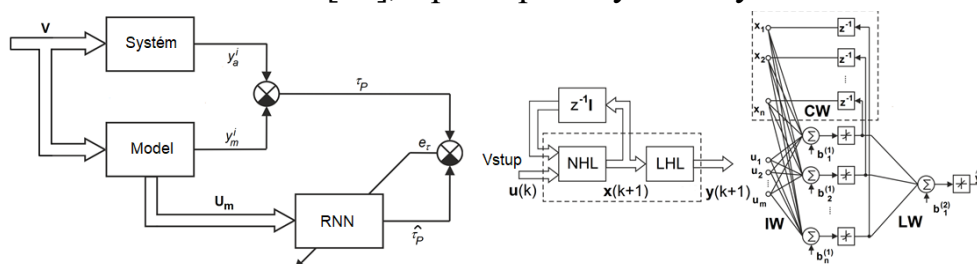
4 METÓDY SOFT COMPUTINGU V IDENTIFIKÁCIÍ SYSTÉMOV SO SOFT POHONMI

Soft robotika sa za posledné dve dekády stala jednou z najperseptívnejších oblastí robotiky všeobecne, s čím súvisí aj veľmi intenzívny rozvoj v tejto oblasti za posledné roky. Aj napriek dominancii tradičnej priemyselnej robotiky v oblasti automatizácie výroby, aj v tejto oblasti dochádza k zmenám konceptu s predpokladanou väčšou mierou interakcie robot-človek a z toho vyplývajúcich potrieb bezpečnosti a nielen výpočtovej ale aj štrukturálnej flexibility. Soft robotika je teda časťou robotiky zaoberajúca sa zariadeniami, ktoré sú prirodzene poddajné a dochádza v nich k veľkým deformáciám bez poškodenia. Základom soft robotov sú práve soft pohony, ktoré môžu byť napríklad integrálnou súčasťou samotného ramena robota. Samotné soft pohony sú obvykle tvorené materiálmi, ktorých modul pružnosti v ťahu je typicky menej ako 10^9 Pa [12] – v soft robotike sa typicky využívajú rôzne druhy polymérov (môže ísť o rôzne druhy gumených alebo elastomérnych materiálov a iné). Použitie týchto pohonov pomerne výrazne odlišuje charakteristiky takýchto robotov od

charakteristík štandardných priemyselných robotov využívajúcich konvenčné rigidné pohony ako sú napr. elektrické motory. Materiály soft robotov preto majú typicky nelineárne a časovo premenné charakteristiky s výraznou hysterézou a creep efektom, čo spôsobuje, že soft roboty vykazujú zložité chovanie. Aj napriek výraznému pokroku v analytickom modelovaní soft robotov je veľmi časté využívanie metód soft computingu, ktoré poskytujú značnú flexibilitu pri vytváraní aj vysoko presných modelov [13].

4.1 Soft computing pre identifikáciu systémov so soft pohonní

Na FVT TUKE je realizovaný výskum v oblasti systémov so soft pohonní od roku 2005, pričom nosným typom soft pohonu sú pneumatické umelé svaly, pričom hlavnou doménou v tejto oblasti je modelovanie a riadenie mechanizmov využívajúcich soft pohony. Pôvodný typ McKibbenových svalov bol nahradený fluidnými svalmi s opletením integrovaným v membráne pohonu, vyznačujúcim sa viacerými priaznivejšími charakteristikami. Ako súčasť riešenia predošlých výskumných úloh boli skúmané mechanizmy s jedným aj dvoma stupňami voľnosti. Pre oba typy mechanizmov boli aplikované metódy soft computingu v rámci identifikácie dynamiky. Výsledky výskumu vlastností fluidných svalov, ako aj mechanizmov a identifikácie pomocou metód soft computingu boli uverejnené v prácach [14],[15],[16],[17],[18]. V práci [19] bola využitá Elmanova rekurentná neurónová sieť pre identifikáciu nemodelovanej dynamiky s cieľom zlepšenia presnosti simulačného modelu [14], s princípom vyznačeným na Obr. 4-1.



Obr. 4-1 Identifikácia nemodelovanej dynamiky pomocou RNN

Všeobecne možno dynamiku sériového manipulátor s n stupňami voľnosti uviesť v nasledujúcom tvare:

$$\sum_{j=1}^n D_{ij}(q)\ddot{q}_j + \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n H_{ikm}\dot{q}_k\dot{q}_m + G_i = Q_i \quad (4.1)$$

$$H_{ijk} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial D_{ij}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial D_{jk}}{\partial q_i} \right) \quad (4.2)$$

kde q – zovšeobecnená premenná, D_{ij} – členy matice zotrvačností, H_{ikm} – vektor väzobných členov rýchlosti, G_i – vektor gravitačných síl, τ_i – vektor zovšeobecnených síl. Kompaktný zápis v rozšírenej forme sa dá zapísať:

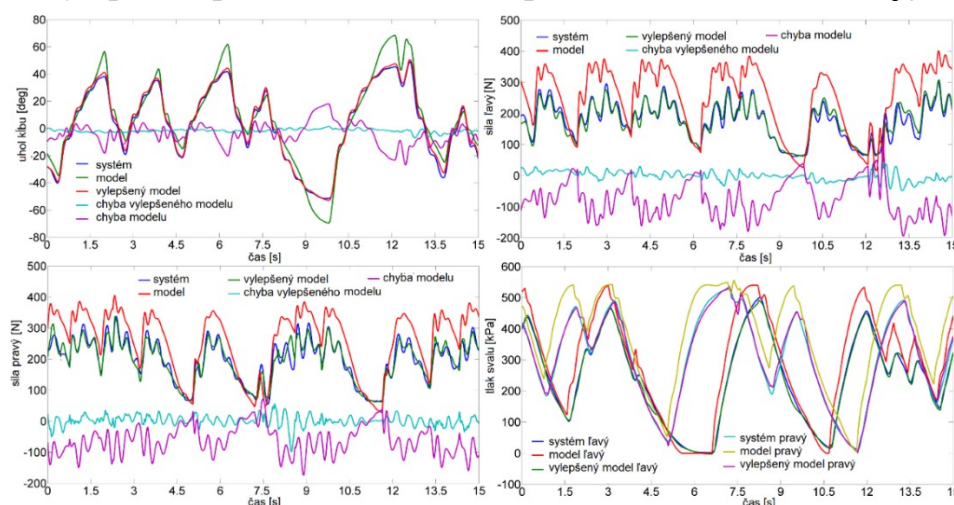
$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau}_p = \boldsymbol{\tau} \quad (4.3)$$

kde τ_p - poruchový člen a $F(\dot{q})$ - člen trenia. Pri modelovaní pomocou RNN máme:

$$\tau_p = \mathbf{LW}f(\mathbf{CW}\mathbf{x}(k) + \mathbf{IW}\mathbf{u}(k) + \mathbf{b}^{(1)}) + b^{(2)} + e_\tau \quad (4.4)$$

kde e_τ je chyba aproximácie neurónovej siete, \mathbf{CW} je matica váh v kontextovej vrstve, \mathbf{LW} je matica váh v skrytej vrstve, \mathbf{IW} je matica váh vo vstupnej vrstve, $\mathbf{x}(k)$ je q -rozmerný stavový vektor, $\mathbf{u}(k)$ je m -rozmerný vstupný vektor, $b^{(1)}$ je prahový vektor v skrytej vrstve, $b^{(2)}$ je prah pre výstupnú vrstvu (predpokladá sa iba jeden neurón vo výstupnej vrstve), f je vektor nelineárnych aktivačných funkcií v skrytej vrstve a k je k -tá vzorka.

Porovnanie priebehov pre analytický model pre uhol kĺbu, sily oboch svalov a ich tlaky, a jeho vylepšenie pomocou RNN siete pre identifikáciu člena τ_p je na Obr. 4-2.



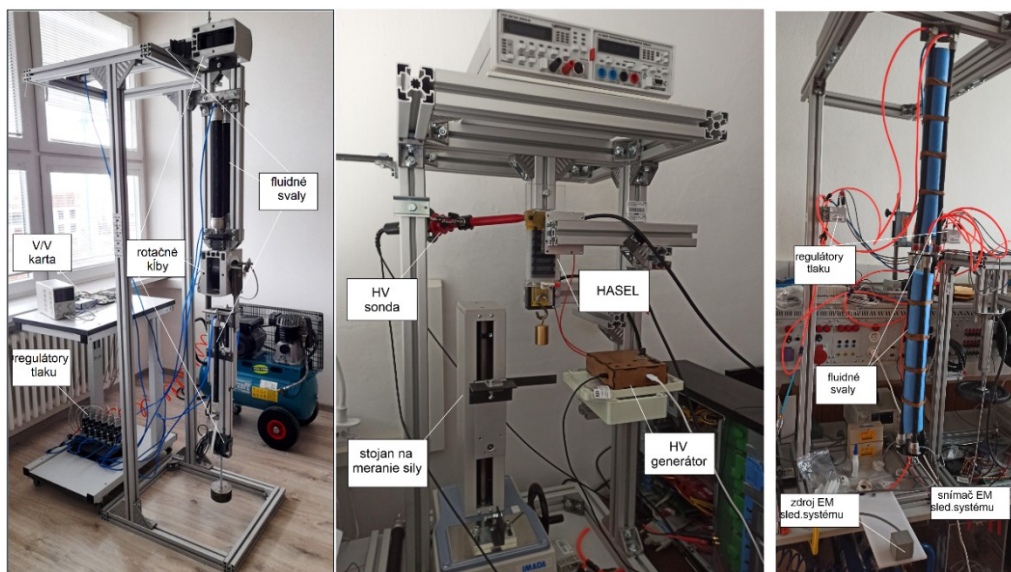
Obr. 4-2 Porovnanie priebehov analytického modelu a vylepšeného modelu s identifikáciou pomocou RNN

V prebiehajúcom výskume v oblasti soft pohonov, kde sú aplikované metódy soft computingu pri identifikácii sú niektorými zo skúmaných systémov manipulátor s 3 stupňami voľnosti s pohonom fluidných svalov, pohon typu Peano-HASEL a 2-segmentové rameno so spojitou kinematikou tvorené 6 fluidnými svalmi. Všetky 3 predmetné systémy sú zobrazené na Obr. 4-3, vrátane vyznačenia najdôležitejších komponentov potrebných umožňujúcich zber dát pre realizáciu identifikácie ako aj riadenie v reálnom čase.

4.2 Manipulátor s 3 stupňami voľnosti poháňaný fluidnými svalmi

Manipulátor s 3 stupňami voľnosti bol na pracovisku uchádzača realizovaný pri riešení predošlých úloh (primárne VEGA 1/0822/16) a predstavoval implementačnú nadstavbu predošlých mechanizmov s jedným a dvoma stupňami voľnosti. Pre tvorbu simulačného modelu bola realizovaná grey box identifikácia dynamiky manipulátora s využitím metód soft computingu. Vytváraný simulačný model vychádzal z výsledkov analytického modelu fluidných svalov ako aj modelovania dynamiky ramena na základe Lagrangovho formalizmu. Analytický model svalu zahŕňal modelovanie dynamiky prietoku vzduchu ventilmi a model samotného svalu

vychádzajúceho z aproximácie vzťahov vychádzajúcich z jeho geometrie. Tento prístup bol pre iný typ mechanizmu (2 stupne voľnosti) podrobne popísaný v publikácii [20].



Obr. 4-3 Predmetné systémy (manipulátor s 3 stupňami voľnosti s fluidnými svalmi – vľavo, Peano-HASEL – stred, spojité rameno s fluidnými svalmi – vpravo)

Pri manipulátore s 3 stupňami voľnosti bola využitá light grey box identifikácia dynamiky, kde štruktúra modelu vychádzala z pohybových rovníc sériových manipulátorov, ako je uvedené v rovnici (4.1). Počiatočné parametre (dĺžky, hmotnosti, momenty zotrvačnosti, polohy ťažísk) boli inicializované na základe údajov z CAD softvéru pre návrh ramena. Podľa rovnice (4.1) sú pre predmetný manipulátor rovnice v tvare:

$$\begin{bmatrix} D_{11}(\theta) & D_{12}(\theta) & D_{13}(\theta) \\ D_{21}(\theta) & D_{22}(\theta) & D_{23}(\theta) \\ D_{31}(\theta) & D_{32}(\theta) & D_{33}(\theta) \end{bmatrix} \ddot{\theta} + \begin{bmatrix} H_{11}(\theta, \dot{\theta}) & H_{12}(\theta, \dot{\theta}) & H_{13}(\theta, \dot{\theta}) \\ H_{21}(\theta, \dot{\theta}) & H_{22}(\theta, \dot{\theta}) & H_{23}(\theta, \dot{\theta}) \\ H_{31}(\theta, \dot{\theta}) & H_{32}(\theta, \dot{\theta}) & H_{33}(\theta, \dot{\theta}) \end{bmatrix} \dot{\theta} + \begin{bmatrix} G_1(\theta) \\ G_2(\theta) \\ G_3(\theta) \end{bmatrix} = \tau. \quad (4.5)$$

kde označenie členov odpovedá rovnici (4.1). Kĺby sú poháňané antagonistickým pôsobením párov fluidných svalov, ktorých pôsobenie sa dá vyjadriť dvojicou nelineárnych diferenciálnych rovníc v tvare [20]:

$$m\ddot{y}_1 + F_{D1}(\dot{\zeta}, P_m) + F_{S1}(\zeta, P_m) = F_{D2}(\dot{\zeta}, P_m) + F_{S2}(\zeta, P_m) + F_g, \quad (4.6)$$

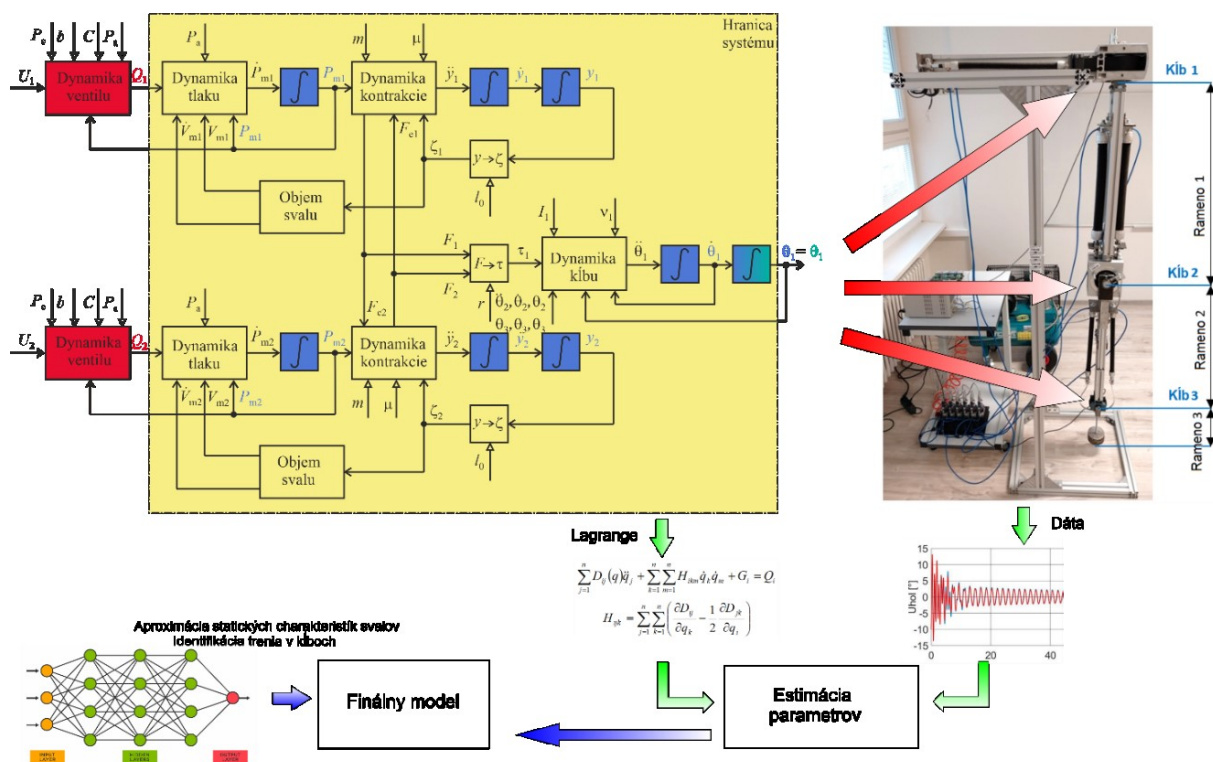
$$m\ddot{y}_2 + F_{D2}(\dot{\zeta}, P_m) + F_{S2}(\zeta, P_m) = F_{D1}(\dot{\zeta}, P_m) + F_{S1}(\zeta, P_m) - F_g. \quad (4.7)$$

kde m – pohybovaná hmotnosť, y – posun svalov, $F_S(\zeta, P_m)$ – nelineárna sila pružiny, $F_D(\dot{\zeta}, P_m)$ – nelineárna sila tlmiča [N], P_m – tlak vo svale [kPa], ζ – svalová kontrakcia [%], F_e – protit'ahlá svalová sila [N], F_g – gravitačná sila [N].

Členy $F_S(\zeta, P_m)$ odpovedajú statickým charakteristikám fluidných svalov. V publikácii [18] boli publikované výsledky analýzy využitia AI/ML modelov (MLP, ANFIS, SVM) pre aproximáciu týchto charakteristík s hodnotením ich úspornosti na

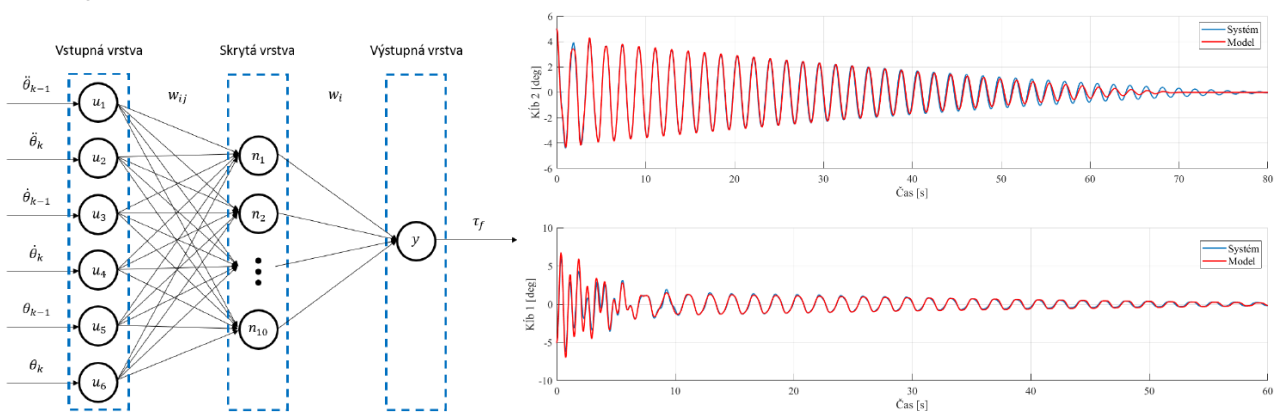
základe informačných kritérií, ktoré umožnili posúdiť výsledné modely nielen z hľadiska ich presnosti ale aj rovnováhy medzi daným chybovým kritériom a ich komplexnosťou. Výsledný najúspornejší model pre ten ktorý typ fluidného svalu bol použitý vo finálnom modeli celého systému. V predošlých experimentoch sa používali rôzne typy aproximácií týchto charakteristík [21], avšak až v práci [18] boli spracované výsledky systematicky a vnímané aj z pohľadu úspornosti vytváraných modelov. Tieto boli potom porovnané aj s typmi modelov využitých v iných prácach, pričom pre dané typy fluidných svalov použitých na reálnom zariadení (DMSP-20 a -40) mal najlepší pomer presnosť/komplexnosť model MLP10.

Ako súčasť výskumu bol vytvorený simulinkový model zahrňajúci model antagonistického páru fluidných svalov zabezpečujúceho pohon jednotlivých kĺbov, ktorý bol na rozdiel od predošlých konštrukcií zabezpečovaný nie reťazovým prevodom s reťazovým kolesom ale ozubeným remeňom a remenicou. Problematickým aspektom sa ukázala presnosť mechanických parametrov systému, ktoré pochádzali z CAD softvéru. Časť komponentov konštrukcie bola realizovaná zo štandardizovaných komponentov, kde bolo možné uvažovať dostatočnú presnosť určenia daných hodnôt, zvyšná časť však bola špeciálne vyrobená pre daný systém a pre tieto komponenty hodnoty neboli známe. Z tohto dôvodu bol pre tvorbu simulačného modelu využitý prístup light grey box identifikácie, kde estimácia parametrov (resp. ich spresnenie) prebehla na základe experimentov. Uvedený prístup je schematicky znázornený na Obr. 4-4, kde časť analytického modelu dynamiky antagonistických párov odpovedá žltohnedému bloku. Tri tieto submodely predstavovali vstup pre submodel dynamiky 3-stupňového manipulátora zostaveného podľa Lagrangeovho formalizmu.

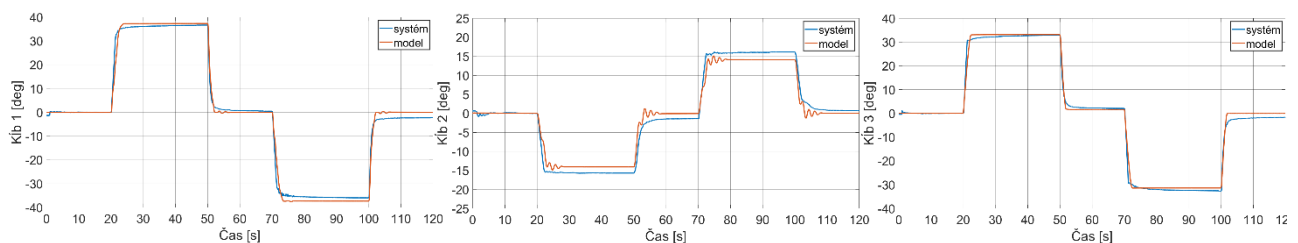


Obr. 4-4 Light grey box identifikácii dynamiky 3DOF ramena s fluidnými svalmi

Ďalším problematickým aspektom bol model trenia, ktorý všeobecne figuruje v maticovom zápise dynamiky manipulátorov v rovnici (4.3). Základný model trenia obsahuje člen Coulombovho a viskózneho trenia, v rozšírenej forme doplnený o Stribeckov efekt. Aplikáciou uvedeného modelu s konštantnými koeficientami nebolo možné získať uspokojivé priebehy trecieho momentu pri rôznych rýchlostiach. Preto bol pre generovanie trecieho momentu pre jednotlivé kĺby aplikovaný NARX model s využitím NN, ktorého vstupy tvorili zrýchlenie, rýchlosť a uhol generovaný dynamickým modelom ako aj jednotkové oneskorenia týchto veličín (Obr. 4-5). Validácia modelu s pôvodným trením pri gravitačných testoch a 2 stupňoch voľnosti bola porovnaná v [22]. Na Obr. 4-5 vpravo je uvedený výsledok validácie modelu dynamiky samotného ramena s priebehom priemerovaným z 10 meraní (počiatočný uhol 40°) pre kĺby ovplyvňované gravitáciou (kĺb 2 a kĺb 3). Validácia modelu pre budenie pomocou svalov všetkých 3 kĺbov v odozve na skokové zmeny diferenciálneho tlaku je na Obr. 4-6.



Obr. 4-5 NARX model pre identifikáciu trenia v kĺboch (vľavo) a validácia modelu dynamiky ramena (vpravo)



Obr. 4-6 Validácia kompletného simulačného modelu 3DOF manipulátora s fluidnými svalmi

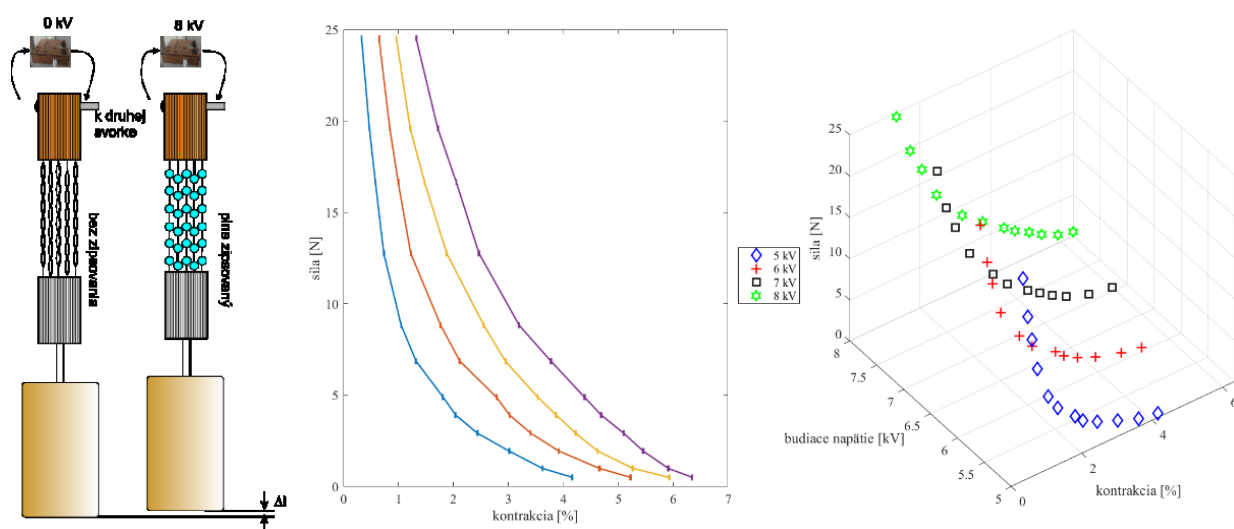
4.3 Identifikácia dynamiky pohonu Peano-HASEL

Elektroaktívne polymérové pohony patria k skupine veľmi perspektívnych pohonov, ktoré sa delia obvykle na skupinu elektronických (napr. dielektrické elastomérové pohony - DEA) a iónové (pohony na báze kompozitov iónový polymérov - IPMC). K najnovším komerčne dostupným pohonom zo skupiny EAP patria pohony typu Peano-HASEL spájajúce princípy DEA a hydraulických pohonov. Peano-HASEL je tvorený sériou vreciek z materiálov ako je BOPP (biaxiálne

orientovaný polypropylén) naplnených tekutým dielektrikom (napr. transformátorový olej) s hydrogélovými alebo hliníkovými elektródami [23].

Na FVT TUKE prebieha výskum tohto typu pohonu od r. 2020 kedy bol získaný prvý exemplár ako súčasť projektu VEGA 1/0393/18. Aktuálne je výskum zameraný na vlastnosti tohto typu pohonov a možnosti ich riadenia s plánovaným rozšírením na pohon bio-inšpirovaných kĺbov poháňaných týmito pohonmi. V rámci nadviazanej spolupráce s pracoviskom UTSA (University of Texas at San Antonio) v USA počas riešenia projektu v oblasti soft pohonov vyšla publikácia v jednom zo špičkových svetových časopisov v oblasti materiálov *Advanced Functional Materials* [24].

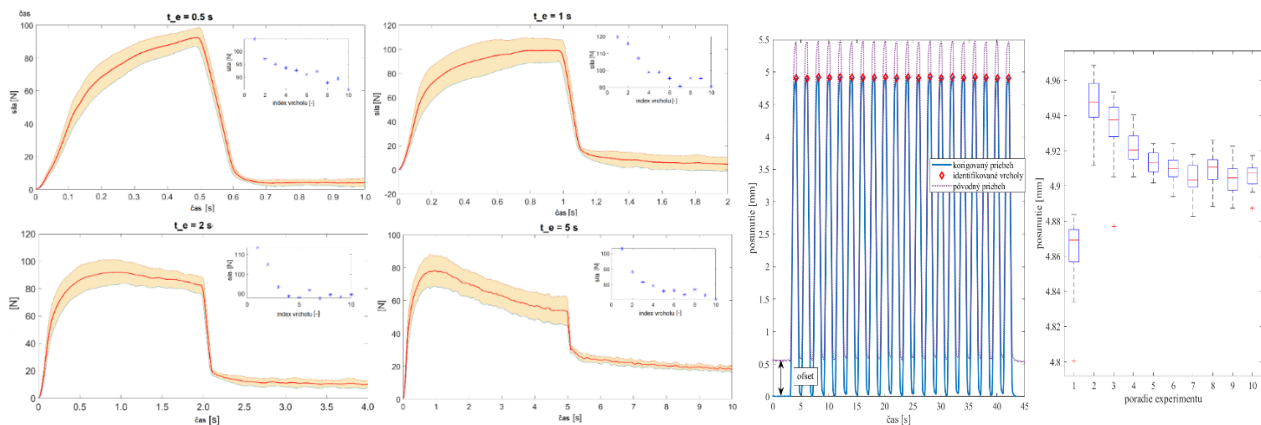
Hlavným cieľom pri identifikácii bolo odvodenie presného simulačného modelu použiteľného primárne pre optimalizáciu a verifikáciu riadenia pohonu v reálnom čase. Tento aspekt bol dôležitý aj z hľadiska obmedzení aktuálnej implementácie budiaceho zdroja, ktorý umožňoval len relatívne malú variabilitu budiacich signálov. Špecifiká budenia tohto typu pohonu sťažujú využitie ľubovoľných typov zdrojov tretích strán. Spôsob realizácie experimentov pre pohon typu Peano-HASEL pri izometrických podmienkach bol podaný ako ÚV [25], a je v stave pred zverejnením (po kladnom výsledku prieskumu). Peano-HASEL je, podobne ako fluidné svaly skúmané na pracovisku dlhodobo, kontraktílnym pohonom, a preto jeho využitie pre pohon kĺbov vo forme umelých svalov sa bude realizovať antagonisticky. Skúmanie charakteristík umelých svalov typicky zahŕňa experimenty pri izometrických a izotonických podmienkach.



Obr. 4-7 Pohon typu Peano-HASEL pri aktivácii (vľavo) a experimentálne zistené charakteristiky pri izotonických podmienkach

Charakteristiky pohonu Peano-HASEL pre verziu s 5 vrstvami (každá so 6 vreckami a šírkou 5 cm), ktorá je k dispozícii na pracovisku uchádzača, je možné vidieť na Obr. 4-7. Tieto charakteristiky boli merané pri izotonických podmienkach s rôznymi závažiami až do hmotnosti 2500 g. Statické charakteristiky vykazujú podobnosť s charakteristikami biologických svalov, a rovnako aj s inými typmi pohonov, ktoré sa ako umelé svaly využívajú (napr. práve fluidné svaly používané vo

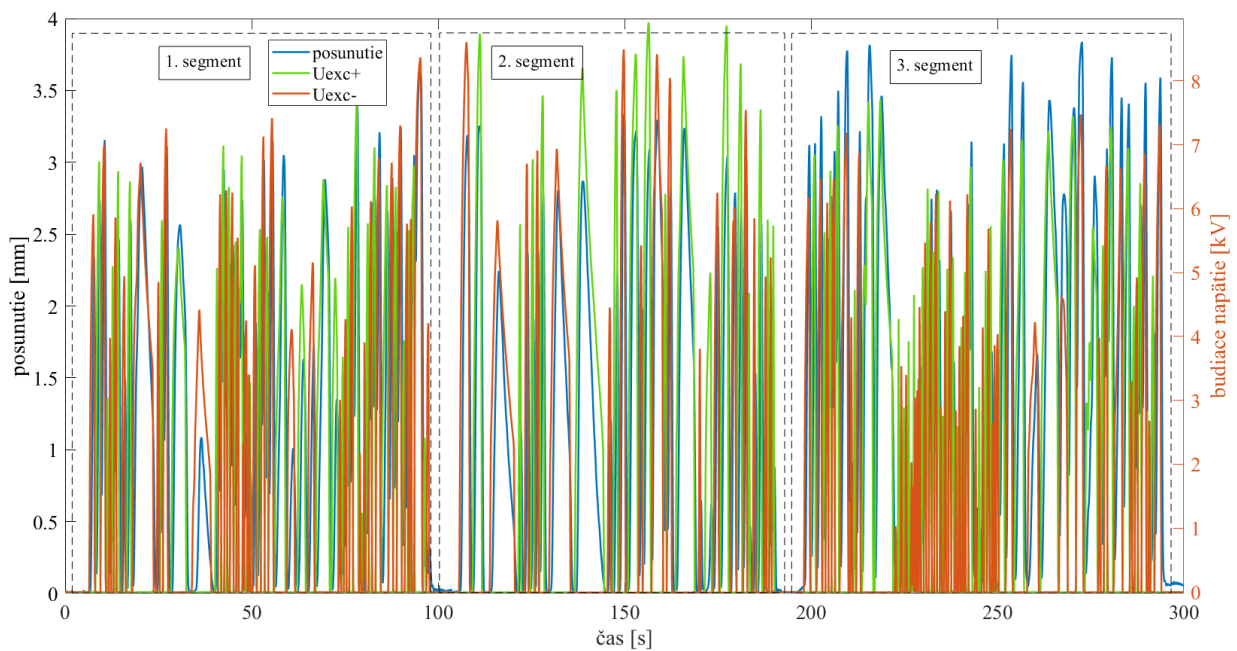
výskume na pracovisku uchádzača) – ich nelinearita vykazuje súvislosť s kvadratickou závislosťou sily na intenzite elektrického poľa (a teda aj budiacom napätí). Pohony typu Peano-HASEL majú však ďalšie vlastnosti, ktoré sťažujú odvodenie analytických modelov. Príkladom je akumulácia náboja súvisiaca s fyzikálnou podstatou princípu činnosti pohonu, a ktorú je možné pozorovať napríklad na meraných charakteristikách pri izometrických podmienkach s impulzným budením s rôznou dobou trvania impulzu (Obr. 4-8). Vplyv tohto javu je viditeľný pri jednotlivých dobách počas samotnej aktivácie pohonu (pri napätí 8 kV), ako aj deaktivácie pohonu v reziduálnej hodnote generovanej sily.



Obr. 4-8 Odozva pohonu Peano-HASEL na impulzné budenie s rôznym trvaním v izometrických podmienkach (vľavo) a variabilita odozvy na periodické budenie v 10-násobnom opakovaní (vpravo)

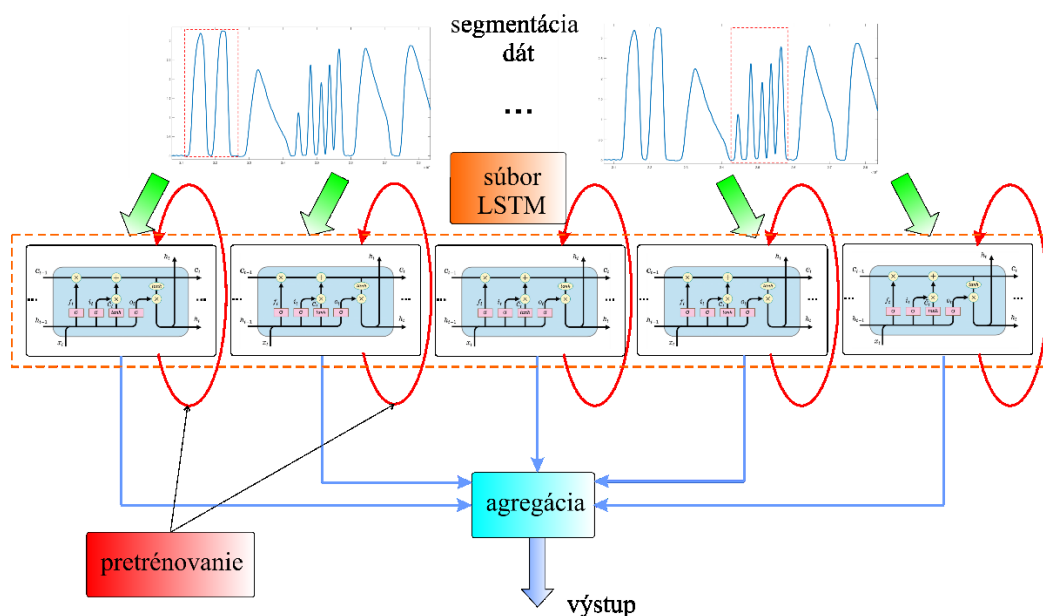
Na Obr. 4-8 vpravo je možné pozorovať ďalšiu z charakteristík pohonu súvisiacu potenciálne s vlastnosťami materiálu a jeho odozvou na budiaci signál. Pri periodickom budení (v tomto prípade) pri izotonických podmienkach, je viditeľný výrazný rozdiel v amplitúde posunu pričom tento efekt postupne odznieva. Dlhodobá deaktivácia pohonu a jeho opätovné vybudenie prispieva k obnoveniu jeho prejavu.

Podľa povahy vlastností pohonu Peano-HASEL vyplývajúcich z vykonaných experimentov bol pri snahe získať presné simulačné modely volený prístup black box identifikácie s využitím architektúr soft computingu umožňujúcich modelovanie systémov so zložitou dynamikou. Do úvahy bolo potrebné tiež vziať určité obmedzenia v budení systému vyplývajúce z hardvérovej implementácie HV zdroja používaného pre napájanie pohonu. Pre zabezpečenie garantovanej životnosti a správnej funkcie je totiž potrebné budiť Peano-HASEL so striedavou polaritou napätia voči zemi spolu s príslušným tvarom budiacich signálov. Pohon nebolo možné budiť ľubovoľným spôsobom v pracovnom rozsahu napr. analógovým signálom meracej karty – preto bol pre získavanie tréningových a testovacích dát využitý spôsob budenia pomocou tlačidla s tlakovým senzom (Obr. 4-9).



Obr. 4-9 Dáta budenia pohonu Peano-HASEL s oboma polaritami a údaje posunutia využité pri identifikácii

Pre zlepšenie výslednej kvality modelu bol navrhnutý prístup zobrazený na Obr. 4-10, ktorý je založený na súbore piatich LSTM modelov s následnou agregáciou ich výstupov s variabilnou inicializáciou (variant „snapshot ensemble“ prístupu).

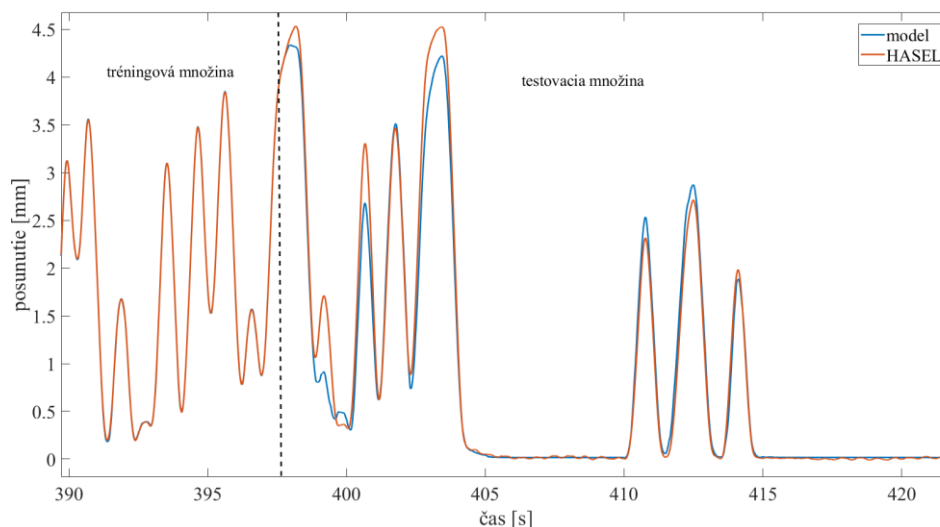


Obr. 4-10 Principiálna schéma navrhovaného prístupu k tvorbe presného simulačného modelu pohonu typu Peano-HASEL s využitím ansámblu LSTM modelov

Dáta získané pri meraní boli rozdelené do segmentov, ktoré boli využité pre tréning sietí postupne. Uvedený spôsob umožnil získať lepšie výsledky v porovnaní s priamym použitím celej tréningovej sady. Navyše súbor samotných modelov, ktoré boli týmto spôsobom pretrénované prispel k zlepšeniu generalizačných schopností výsledného modelu. Využitie modelu aj pre simuláciu budenia periodickým signálom

si vyžadoval voľbu komplexnejšej štruktúry samotných LSTM sietí (vyšší počet vrstiev), vzhľadom k výraznejšiemu vplyvu efektu akumulácie náboja pri nižších frekvenciách. V tomto prípade bola segmentácia identifikačných dát veľmi dôležitá, pričom pre zabránenie efektu katastrofického zabúdania bolo pri pretrénovaní potrebné ponechať niektoré segmenty už naučených dát.

Na Obr. 4-11 je možné vidieť porovnanie výstupu ansámblového LSTM modelu, kde na konci tréningovej množiny bol segment testovacích dát nepoužitých pri tréningu. V tomto prípade predchádzajúce dáta zahŕňajú segmenty z dát získaných pri buzení systému náhodne s rôznymi hmotnosťami.



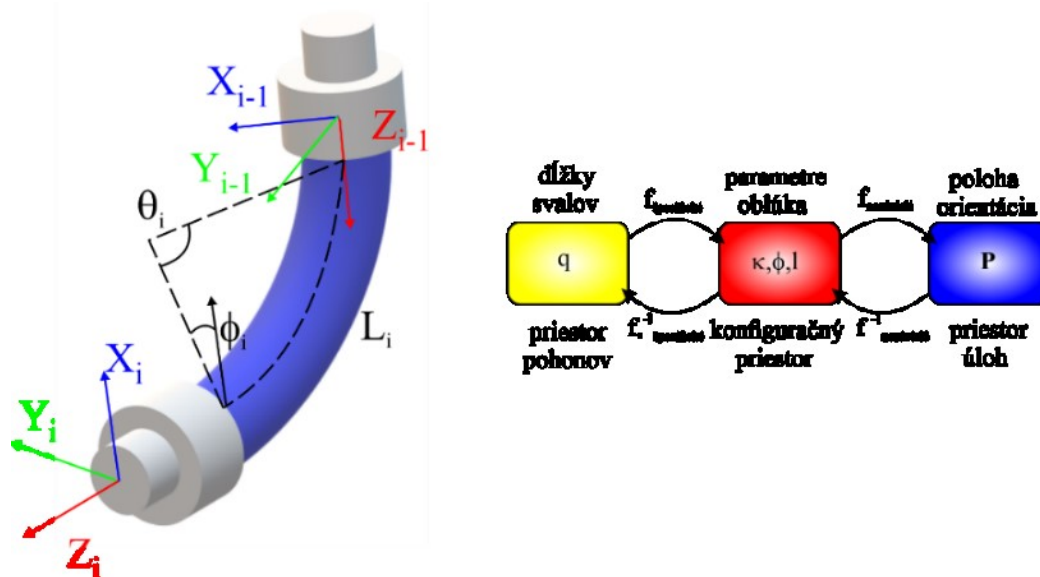
Obr. 4-11 Porovnanie výstupu ansámblového LSTM modelu pre testovacie dáta

4.4 Identifikácia kinematiky spojitého fluidného ramena s 2 segmentami

Roboty so spojitou kinematikou („continuum robots“) sú charakterizované ramenami so spojitým ohybom a elastickou štruktúrou, ktorých počet stupňov voľnosti je nekonečne veľký [27]. Takéto ramená môžu mať tuhú ale aj mäkkú štruktúru, kedy je možné ich nazývať soft roboty so spojitou kinematikou („soft continuum arms“). V prípade, že samotné pohony tvoria štruktúru takéhoto ramena, ide o tzv. intrinzné typy ramien so spojitou kinematikou. Pohony soft ramien so spojitou kinematikou môžu byť rôznej povahy, pričom môže ísť o pohony zo skupiny elektroaktívnych polymérov alebo o pneumatické pohony (napr. fluidné svaly).

Na FVT TUKE prebieha výskum ramien so spojitou kinematikou od r.2022 kedy začali prípravy na realizáciu experimentálneho stendu s pokračovaním do roku 2023 ako súčasť riešenia projektu VEGA 1/0061/23. Výsledkom návrhu a konštrukcie bolo rameno s intrinznou štruktúrou a šesticou svalov v 2 segmentoch umiestnených v odstupoch po 120° a dĺžkou segmentov 500 mm. Aktuálne je výskum zameraný na modelovanie resp. identifikáciu kinematiky ako aj dynamiky tohto systému. Počas trvania projektu už bola uverejnená publikácia v Q2 časopise s názvom „Design, Modelling, and Control of Continuum Arms with Pneumatic Artificial Muscles: A Review“ [26].

Pri modelovaní kinematiky systému sú na pracovisku uchádzača skúmané 2 prístupy, ktoré vychádzajú z predošlých skúseností získaných v procese výskumu rigidných štruktúr s poddajnými kĺbmi. Prvý prístup je založený na využití známeho spôsobu modelovania kinematiky ramien so spojitou kinematikou, a to pomocou PCC modelov (modelov s po častiach konštantným ohybom) [27] aplikovaného na rameno na pracovisku (Obr. 4-12).



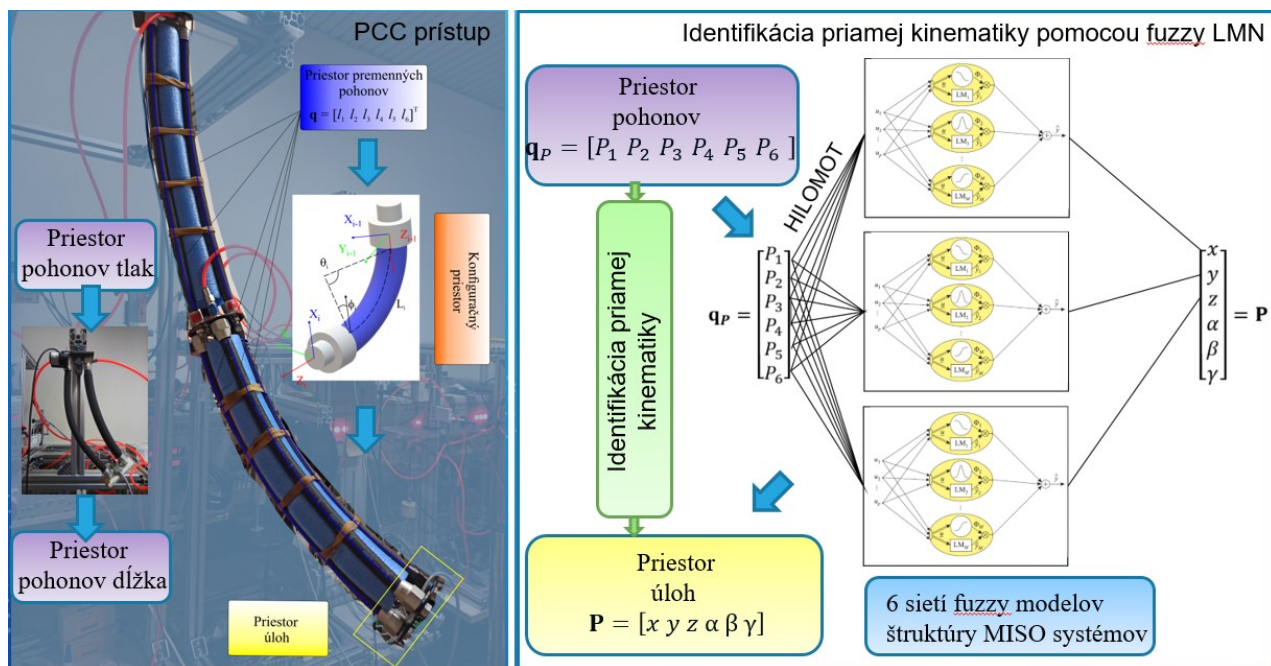
Obr. 4-12 Princíp PCC modelovania (po častiach konštantný ohyb) pre rameno so spojitou kinematikou s fluidnými svalmi

V tomto prípade však boli navrhnuté 2 vlastné modifikácie, kde v prvej sa využije snímanie dĺžok svalov pomocou textilných soft senzorov a v druhej vlastný model dĺžok fluidných svalov pri ohybe v závislosti od tlaku. Využitie PCC modelovania pre experimentálnu zostavu na pracovisku predpokladá prechod z priestoru pohonov (dĺžky svalov) cez konfiguračný priestor určený parametrami oblúkov k priestoru úloh (poloha a orientácia v priestore) (Obr. 4-12). V prvom prípade ide o vzťah závislý od typu robota, líšiaci sa podľa konštrukčných charakteristík. V druhom prípade ide o vzťah nezávislý od charakteristík robota, určený len vzťahom medzi geometriou oblúkov a priestorom úloh.

V doterajšom priebehu bol navrhnutý prístup modelovania kinematiky s využitím previazania priamo priestoru pohonov s priestorom úloh vo forme šiestich MISO systémov, každý so 6 vstupmi a jedným výstupom (6 tlakov v jednotlivých svaloch oboch segmentov) a trojica súradníc pre polohu v 3D priestore a 3 uhly zodpovedajúce uhlom sklonu, klopenia a zatačania.

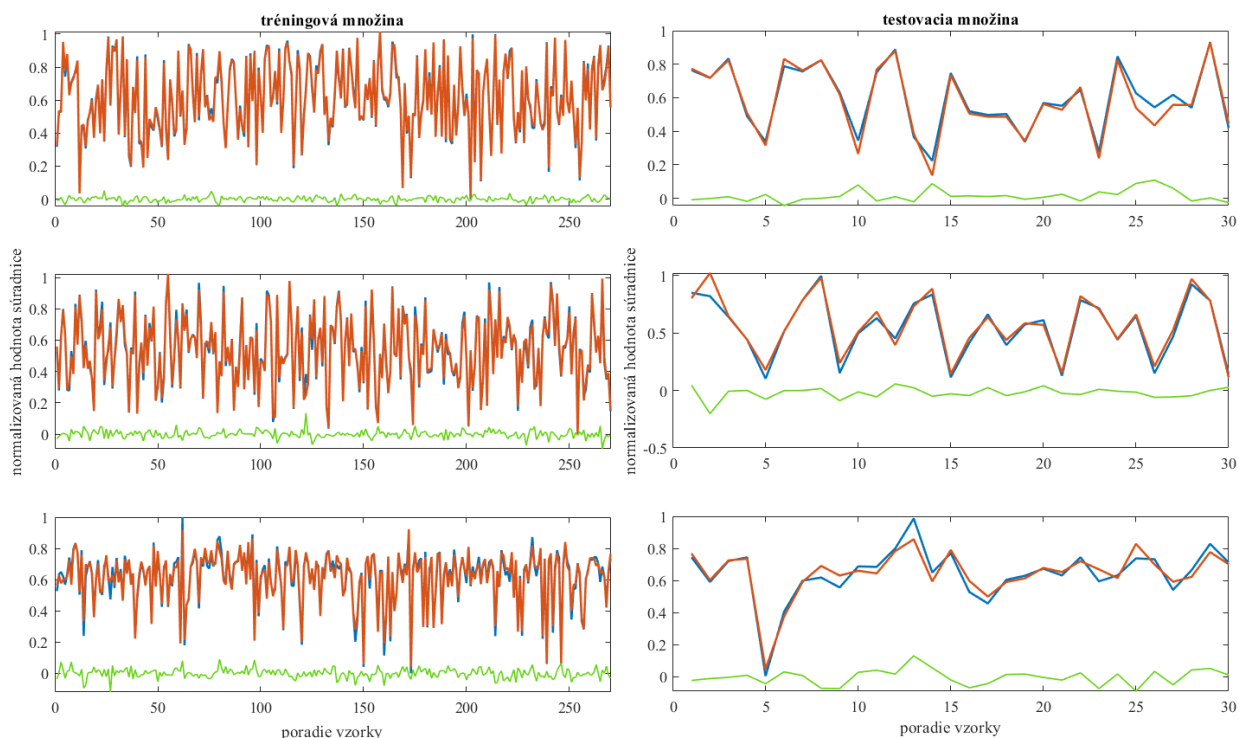
Hodnoty veličín priestoru úloh boli počas experimentov získavané z elektromagnetického sledovacieho systému. Principiálna schéma modelovania kinematiky navrhnutým spôsobom je zobrazená na Obr. 4-13. Jednotlivé MISO systémy, ktorých výstupy odpovedali jednotlivým veličinám priestoru úloh, aproximovali vzťah medzi tlakmi a týmito veličinami a boli vytvorené s využitím HILOMOT algoritmu vo forme hierarchických fuzzy LMN modelov. Hierarchické

LMN modely majú veľkú výhodu v ich interpretovateľnosti (v porovnaní napr. s MLP) a ich jednoduchom a výpočtovo nenáročnom tréningu [28].

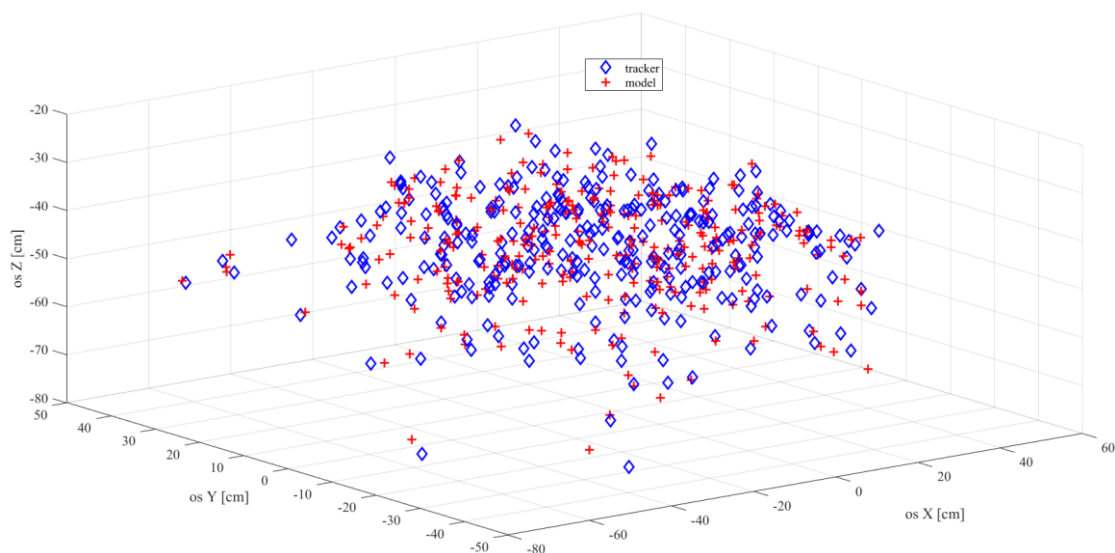


Obr. 4-13 Principiálna schéma navrhovaného prístupu k tvorbe kinematického modelu 2-segmentového ramena pomocou siete hierarchických fuzzy LMN modelov

Výsledok identifikácie troch zo šiestich premenných priestoru úloh (priestorové koordináty) je zobrazený na Obr. 4-14 a v priestore na Obr. 4-15.



Obr. 4-14 Porovnanie tréningových dát a testovacích dát pre hierarchické fuzzy LMN modely priestorových súradnic koncového bodu ramena



Obr. 4-15 Zobrazenie pokrytia bodov priestoru úloh ako výsledok identifikácie priamej kinematiky ramena

V procese identifikácie bolo realizované 10-hodinové meranie po hodinách s 10 permutáciami náhodných hodnôt budenia jednotlivých pohonov. Z uvedených priebehov boli extrahované ustálené hodnoty premenných, z ktorých boli vyňaté stredné hodnoty pri opakovaných hodnotách tlakov. 270 z týchto hodnôt bolo použitých pre tréning LMN modelov a 30 pre ich test. Ako je vidieť, LMN modely dosahujú veľmi dobrú presnosť (rádovo 1%) s relatívne nízkou komplexnosťou.

5 PRÍNOSY PRE VEDU, PRAX A PEDAGOGICKÚ ČINNOSŤ

Oblasť predikcie spotreby energií je významnou sférou v oblasti energetiky všeobecne, s dôležitými dôsledkami aj špecificky pre oblasť energetiky budov. Dynamický spôsob nákupu plynu môže poskytovať väčšiu flexibilitu pre zákazníkov. V súvislosti s tým dynamické zmeny maxima (alebo minima) nakúpeného plynu pre daný deň môžu mať pre malých a stredných odberateľov veľký význam. Za týchto podmienok je možné považovať čo najpresnejšie predpovede spotreby plynu za kľúčový faktor pri úspešnosti implementácie tohto spôsobu. Mimo toho je možné predpovede spotreby využívať aj pre účely verifikácie korektnej prevádzky tepelného zdroja na základe porovnávania jeho predpovedanej a predpokladanej účinnosti.

Odvođený regWANN model využíva prirodzenú silnú koreláciu dennej spotreby plynu s priemernou vonkajšou teplotou a následné paralelné spojenie viacerých NAR-NN modelov aplikovaných pre zložky WT rozkladu rezíduí. Doteraz boli v praktických aplikáciách konkrétnych budov využívané len lineárne regresné modely, ktorých presnosť pri predikcii spotreby plynu nie je veľmi vysoká. Výsledky výskumu preukázali, že modelovanie rezíduí po teplotnej regresii je pre zvýšenie presnosti predpovedí nevyhnutná. Vzhľadom k prítomnosti cyklov rôznej periodicity v rezíduách je aj použiteľnosť SARMA modelov s možnosťou jednonásobnej

sezónnosti do istej miery obmedzená. regWANN model rieši tento problém dekompozíciou časových radov rezíduí na zložky, ktoré izolujú jednotlivé cykly a umožňujú NAR-NN modelom zohľadniť ich vplyv na predpoveď budúcej hodnoty spotreby plynu. Návrh modelu navyše rieši problém identifikácie predmetných regresorov v regresnom vektore NAR-NN modelov prostredníctvom bGA, čím bolo možné zostaviť (kvázi)optimálne submodely umožňujúce ďalšie zvýšenie presnosti predpovedí.

Oblasť soft robotiky, ktorej progres je prirodzene závislý na rozvoji soft pohonov, je v súčasnosti veľmi perspektívnou sférou robotiky s veľkým potenciálom pre niektoré súčasné a viaceré budúcich aplikácií. Soft robotika môže poskytovať riešenia v oblastiach pre ktoré je okrem flexibility v riadení (sofistikovaná senzorika a pokročilé algoritmy riadenia) potrebná aj flexibilita v štruktúre, ktorou priemyselné roboty nedisponujú. Využitelné sú ako samotné soft pohony využité pre pohon rigidných štruktúr (poddajné kĺby), tak aj ramená so spojitou kinematikou (continuum arms), ktorých celá štruktúra je deformovateľná. V súčasných aplikáciách je možné nájsť využitie v oblasti medicíny, avšak v podobe soft chápadiel aj vo výrobe. S pokrokom vo vývoji soft robotických systémov je možné očakávať rozširovanie spektra možných aplikácií v praxi.

Uvedená „light grey box model“ identifikácia pre 3DOF manipulátor s fluidnými svalmi bola založená na využití štruktúry modelu odvodeného analyticky na základe Lagrangeovho formalizmu ako aj predošle odvodených analytických modelov antagonistických párov fluidných svalov pre pohon kĺbov. Metódy soft computingu sa v tomto prípade s výhodou použili pre časti modelu, ktorých analytické (alebo iné) modely nebolo možné použiť alebo neposkytovali dostatočnú presnosť – aproximácia statických charakteristík fluidných svalov a identifikácia trenia v kĺboch manipulátora. Model MLP10 sa ukázal byť najúspornejším v porovnaní s inými modelmi v zmysle kritérií AIC a BIC. NARX model pre identifikáciu trenia zasa umožnil získať presnejšie priebehy simulačného modelu manipulátora pri rôznych podmienkach. V prípade jednoduchšieho mechanizmu s jedným stupňom voľnosti bol volený prístup s identifikáciou nemodelovanej dynamiky pomocou rekurentnej neurónovej siete. V tomto prípade bolo výhodou zachovanie analytického charakteru hlavného modelu a jeho následné spresnenie využitím RNN, čo umožnilo získať presný simulačný model vhodný napr. pre verifikáciu navrhnutého riadenia.

Pohon typu Peano-HASEL a soft rameno so spojitou kinematikou, ktoré sú skúmané na pracovisku uchádzača patria k oblastiam, ktoré sú predmetom veľmi intenzívneho výskumu v oblasti soft robotiky. Vzhľadom k náročnosti popisu dynamických charakteristík týchto systémov majú metódy soft computingu veľký potenciál pre získavanie presných simulačných modelov, čo je veľmi dôležité pre verifikáciu alebo optimalizáciu riadenia. Navrhnuté spôsoby (ansámblový LSTM model a hierarchické fuzzy LMN modely) preukazujú využiteľnosť týchto prístupov v daných oblastiach a predstavujú vytvorenie dobrej východiskovej pozície pre ďalší výskum v tejto oblasti.

Uchádzač sa aktívne podieľal na zrode nových študijných programov, ktorých nosným prvkom je práve umelá inteligencia s názvom „Smart technológie v priemysle“ a „Inteligentné technológie v priemysle“. Je snahou výsledky výskumu, či už v oblasti predikcie spotrieb energií alebo v oblasti soft pohonov, v čo najväčšej miere prenášať aj do výučby. Tento prenos má rozmer ako teoretický, tak aj praktický a študenti môžu využívať buď doterajšie výsledky výskumu napr. v podobe experimentálnych stendov vytvorených v rámci riešenia výskumných úloh alebo priamou participáciou na riešení čiastkových problémov. To je využívané predovšetkým v predmetoch „Technicky umelej inteligencie“, „Inteligentné systémy v priemysle“, „Mechatronika“ alebo „SMART pohony strojov a zariadení“, ktoré uchádzač garantuje. Oblasť identifikácie systémov/procesov pomocou metód soft computingu je tiež využívaná pri návrhu záverečných prác, ktoré sa realizujú primárne v Laboratóriu inteligentných pohonov alebo Laboratóriu elektrotechniky, mechatroniky a kybernetiky, za ktorých rozvoj a prevádzku je uchádzač zodpovedný.

6 ZÁVER

Uvedené tézy s názvom „Metódy soft computingu v identifikácii smart systémov“ predstavujú výsledky výskumu uchádzača počas jeho pôsobenia na Fakulte výrobných technológií so sídlom v Prešove, Technickej univerzity v Košiciach ako akademického pracovníka. Počas svojho pôsobenia na univerzite sa uchádzač profiloval predovšetkým v oblasti identifikácie a riadenia systémov s využitím soft computingu s dvoma hlavnými aplikačnými oblasťami, ktorými sú soft pohony a soft robotika a oblasť predikcie časových radov. V oboch uvedených oblastiach rozširujú metódy soft computingu možnosti zlepšovania kvality dosahovaných výsledkov primárne z dôvodu zložitosti chovania predmetných systémov/procesov. V špecializácii na tieto aplikačné oblasti sa uchádzač venoval základnému výskumu v laboratórnych podmienkach pre veľmi perspektívnu oblasť soft robotiky a zároveň aplikovanému výskumu orientovanému na zariadenia a procesy z reálnej prevádzky (predikcia spotreby energií v budovách). Doba pôsobenia v uvedenej sfére umožnila vytvorenie kontaktov s viacerými zahraničnými inštitúciami, ktoré prispeli k ďalšiemu rozvoju výskumu na pracovisku, predovšetkým v oblasti soft pohonov (fluidných alebo polymérových). Zároveň, výskum súvisiaci s niektorými aspektami prevádzky budov umožnil aj mimoakademickú spoluprácu s firmami, čo viedlo k riešeniu výskumných úloh súvisiacich s požiadavkami praxe.

7 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] AKHRAS, Georges. Smart Materials and Smart Systems for the Future. *Canadian Military Journal* [online]. Kanada: National Defence, 2000, 1(3), 25-32 [cit. 2024-01-18]. ISSN 1492-465X. Dostupné z: <http://www.journal.forces.gc.ca/vol1/no3/doc/25-32-eng.pdf>

- [2] HOŠOVSKÝ, Alexander et al. Comparative study of week-ahead forecasting of daily gas consumption in buildings using regression ARMA/SARMA and genetic-algorithm-optimized regression wavelet neural network models. *Journal of Building Engineering* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2021, **34**, 1-20 [cit. 2024-01-18]. ISSN 2352-7102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101955>
- [3] ZHOU, Hai-xiang a Frédéric MAGOULES. A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2012, **16**(6), 3586-3592 [cit. 2024-01-18]. ISSN 1879-0690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049>
- [4] TANVEER, Ahmad et al. A comprehensive overview on the data driven and large scale based approaches for forecasting of building energy demand: A review. *Energy and Buildings* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2018, **165**, 301-320 [cit. 2024-01-18]. ISSN 1872-6178. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.017>
- [5] SUGANTHI, L. a A.A. SAMUEL. Energy models for demand forecasting – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2012, **16**(2), 1223-1240 [cit. 2024-01-18]. ISSN 1879-0690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.014>
- [6] BOX, George, E.P. et al. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 5th Edition. New Jersey: John Wiley&Sons, 2015. ISBN 978-1-118-67491-8.
- [7] HOŠOVSKÝ, Alexander et al. Introductory analysis of gas consumption time series in non-residential buildings for prediction purposes using wavelet decomposition. *MM Science Journal* [online]. Prague: MM Publishing, 2018, December, 2648-2655 [cit. 2024-01-18]. ISSN 1803-1269. Dostupné z: doi: 10.17973/MMSJ.2018_12_201858
- [8] TANGIRALA, Arun K. *Principles of System Identification: Theory and Practice*. 1st Edition. Boca Raton: CRC Press, 2015. ISBN 978-1-3152-2250-9.
- [9] TAIEB, Souhaib Ben a Rob J HYNDMAN. Recursive and direct multi-step forecasting: the best of both worlds. *Working paper* [online]. Clayton: Monash University, 2012, **19**(12), 1-36 [cit. 2024-01-18]. ISSN 1440-771X. Dostupné z: <https://www.monash.edu/business/ebs/research/publications/ebs/wp19-12.pdf>
- [10] SCHOUKENS, Johan a Lennart LJUNG. Nonlinear System Identification: A User-Oriented Road Map. *IEEE Control Systems Magazine* [online]. Piscataway: IEEE, 2019, **39**(6), 28-99 [cit. 2024-01-18]. ISSN 1066-033X. Dostupné z: doi: 10.1109/MCS.2019.2938121
- [11] MIŽÁKOVÁ, Jana et al. Design of the One Week-ahead Forecasting of Daily Gas Consumption using ARMA/ARIMA Models. In: *Proceedings of the 24th International Conference on Process Control 2023* [online]. IEEE, 2023, 215-220 [cit. 2024-01-18]. ISBN 979-8-3503-4763-0. Dostupné z: doi: 10.1109/PC58330.2023.10217611

- [12] CAASENBROOD, Brandon Jonathan. *Design, Modeling and Control Strategies for Soft Robots* [online]. Eindhoven, 2024 [cit. 2024-01-18]. Disertační práce. Eindhoven University of Technology. Školitel prof.dr. H. Nijmeijer. Dostupné z: doi: 10.6100/3fmj-dg12
- [13] ARMANINI, Constanza et al. Soft Robots Modeling – A Literature Unwinding. *arXiv* [online]. Ithaca: Cornell University, 2021, arXiv:2112.03645v1, Dostupné z: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.03645>
- [14] TROJANOVÁ, Monika a Alexander HOŠOVSKÝ. Design of Test Rigs for Measuring Dynamic Properties of Soft Actuators. *MM Science Journal* [online]. Praha: MM Publishing, 2020, March, 3759-3763 [cit. 2024-01-18]. ISSN 1803-1269. Dostupné z: doi: 10.17973/MMSJ.2020_03_2020005
- [15] HOŠOVSKÝ, Alexander et al. Identification of DMSP-5 Fluidic Muscle Dynamics Using Hammerstein Model. In: *SACI 2018* [online]. IEEE, 2018, 319-324 [cit. 2024-01-18]. ISBN 978-1-5386-4640-3. Dostupné z: doi: 10.1109/SACI.2018.8440976
- [16] TROJANOVÁ, Monika et al. Design of apparatus for evaluation of temperature dependence of creep effect in PAM. *MM Science Journal* [online]. Praha: MM Publishing, 2021, December, 5460-5466 [cit. 2024-01-18]. ISSN 1803-1269. Dostupné z: doi: 10.17973/MMSJ.2021_12_2021179
- [17] TROJANOVÁ, Monika a Alexander HOŠOVSKÝ. Comparison of Different Neural Networks Models for Identification of Manipulator Arm Driven by Fluidic Muscles. *Acta Polytechnica Hungarica* [online]. Budapešť: Budapest Óbuda University, 2018, **15**(7), 7-28 [cit. 2024-01-18]. ISSN 1785-8860. Dostupné z: doi: 10.12700/APH.15.7.2018.7.1
- [18] TROJANOVÁ, Monika et al. Evaluation of Machine Learning-Based Parsimonious Models for Static Modeling of Fluidic Muscles in Compliant Mechanisms. *Mathematics* [online]. Bazilej: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023, **11**(1), 1-33 [cit. 2024-01-18]. ISSN 2227-7390. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/math11010149>
- [19] HOŠOVSKÝ, Alexander et al. Enhanced Dynamic Model of Pneumatic Muscle Actuator with Elman Neural Network. *Abstract and Applied Analysis* [online]. London: Hindawi, 2015, 1-16 [cit. 2024-01-18]. ISSN 1085-3375. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2015/906126>
- [20] HOŠOVSKÝ, Alexander et al. Dynamic characterization and simulation of two-link soft robot arm with pneumatic muscles. *Mechanism and Machine Theory* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2016, **103**, 98-116 [cit. 2024-01-18]. ISSN 0094-114X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.04.013>
- [21] SÁROSI, József et al. Comparative Survey of Various Static and Dynamic Models of Pneumatic Artificial Muscles. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering* [online]. Montreal: Canada, 2017, **41**(5), 825-844

- [cit. 2024-01-18]. ISSN 0315-8977. Dostupné z: <https://doi.org/10.1139/tcsme-2017-514>
- [22] TROJANOVÁ, Monika et al. Estimation of Grey-Box Dynamic Model of 2-DOF Pneumatic Actuator Robotic Arm Using Gravity Tests. *Applied sciences* [online]. Bazilej: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021, **11**(10), 1-28 [cit. 2024-01-18]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app11104490>
- [23] KELLARIS, Nicholas et al. Peano-HASEL actuators: Muscle-mimetic, electrohydraulic transducers that linearly contract on activation. *Science Robotics* [online]. Washington, DC: Canadian Science Publishing, 2018, **14**(3), 825-844 [cit. 2024-01-18]. ISSN 2470-9476. Dostupné z: doi: 10.1126/scirobotics.aar3276
- [24] EBRAHIMI, Nafiseh et al. Magnetic Actuation Methods in Bio/Soft Robotics. *Advanced Functional Materials* [online]. Weinheim: Wiley-VCH, 2021, **31**(11), 1-40 [cit. 2024-01-18]. ISSN 1616-301X. Dostupné z: doi: 10.1002/adfm.202005137
- [25] HOŠOVSKÝ, Alexander et al. Zariadenie na meranie dynamiky sily pohonu typu Peano-HASEL pri izometrických podmienkach [úžitkový vzor]. PÚV 50079-2023. Slovenská republika. Prihláška pred zverejnením (zverejnenie v najbližšom vestníku).
- [26] SOKOLOV, Oleksandr et al. Design, Modelling, and Control of Continuum Arms with Pneumatic Artificial Muscles: A Review. *Machines* [online]. Bazilej: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023, **11**(10), 1-23 [cit. 2024-01-18]. ISSN 2075-1702. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/machines11100936>
- [27] WEBSTER, Robert J. a Bryan A. JONES. Design and Kinematic Modeling of Constant Curvature Continuum Robots: A Review. *The International Journal of Robotics Research* [online]. Thousand Oaks: Sage, 2010, **29**(13), 1661-1683 [cit. 2024-01-18]. ISSN 0278-3649. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1177/0278364910368147>
- [28] BELZ, Julian et al. Automatic Modeling with Local Model Networks for Benchmark Processes. *IFAC-PapersOnLine* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2017, **50**(1), 470-475 [cit. 2024-01-18]. ISSN 2405-8963. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.089>

8 ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol	Význam	Jednotka
β_k	k-ty regresný koeficient	[-]

ε_t	rad inovácií	[-]
ζ	kontrakcia	[-]
$\dot{\zeta}$	rýchlosť kontrakcie	[-]
θ	vektor parametrov modelu	[-]
$\hat{\theta}$	estimovaný vektor parametrov modelu	[-]
κ	ohyb svalu	[-]
τ_p	poruchový člen	[-]
τ_i	vektor zovšeobecnených síl	[-]
τ	translácia	[-]
φ	škálovacia funkcia	[-]
$\psi_{\tau,s}$	vlnka generovaná na danej škále a s daným posunutím	[-]
a_k, b_k, c_k	parametre k-teho neurónu	[-]
$a(L)$	nesezónny autoregresný polynóm p -teho stupňa	[-]
$b(L)$	nesezónny polynóm klzavého priemeru q -teho stupňa	[-]
$b^{(1)}, b^{(2)}$	prahy v skrytej, výstupnej vrstve	[-]
CW	matica váh v kontextovej vrstve	[-]
D_{ij}	členy matice zotrvačností	[-]
e_τ	chyba aproximácie analytického modelu	[-]
F	fitness funkcia	[-]
F($\dot{\mathbf{q}}$)	trecí člen	[-]
$F_S(\cdot)$	člen sily pružiny	[N]
$F_D(\cdot)$	člen sily tlmiča	[N]
F_e	protiľahlá sila	[N]
F_g	gravitačná sila	[N]
\mathbf{G}_i	vektor gravitačných síl	[-]
H_{ikm}	vektor väzobných členov rýchlostí	[-]
h	predikčný horizont	[-]
IW	matica váh vo vstupnej vrstve	[-]
K	normalizačná konštanta	[-]
K_e	váha chybového kritéria	[-]
K_r	váha veľkosti regresného vektora	[-]
$L^j y_t$	diferenčný operátor	[-]
LW	matica váh v skrytej vrstve	[-]
m	hmotnosť	[kg]
P_m	tlak vo svale	[Pa]
\mathbf{q}	zovšeobecnená premenná	[-]
s	škála	[-]
\mathbf{u}	vektor vstupu	[-]
\mathbf{x}	stavový vektor	[-]
x_t	prediktor	[-]
y	posunutie svalu	[m]
y_t	časový rad odozvy	[-]

NAR	Nelineárny autoregresný model
NARX	Nelineárny autoregresný model s vonkajším vstupom
bGA	Binárny genetický algoritmus
WANN	Model využívajúci neurónové siete a rozklad pomocou vlnkovej transformácie
RNN	Rekurentná neurónová sieť
LSTM	Siete s dlhou krátkodobou pamäťou
MAE	Stredná absolútna odchýlka
MSE	Stredná kvadratická odchýlka
NRMSE	Normalizovaná odmocnená stredná kvadratická odchýlka
ARMA	Autoregresný model s kľzavým priemerom
SARMA	Sezónny autoregresný model s kľzavým priemerom
FFNN	Dopredná neurónová sieť
WT	Vlnková transformácia
ANFIS	Adaptívny neuro-fuzzy inferenčný systém
HASEL	Hydraulicky zosilnený samoliečiaci sa elastomérový
EAP	pohon
DEA	Elektroaktívne polyméry
IPMC	Pohony na báze dielektrických elastomérov
LMN	Pohony na báze kompozitov iónový polymér-kov Sieť lokálnych modelov

Zoznam obrázkov

Obr. 2-1 Metódy soft computingu a typy modelov	8
Obr. 3-1 Historické dáta celkovej dennej spotreby plynu a priemerných denných teplôt v troch rôznych typoch budov	10
Obr. 3-2 Dekompozícia rezíduí spotrieb energií pomocou vlniek typu db5 a úrovňou dekompozície 5 na aproximáciu a detaily	11
Obr. 3-3 Schéma vylepšeného regWANN modelu s optimalizáciou pomocou bGA	12
Obr. 3-4 7-dňová predpoveď pomocou identifikovaného regWANN modelu.....	13
Obr. 3-5 Postup identifikácie a predpovede spotrieb plynu pomocou regWANN modelu	13
Obr. 3-6 Grafy fitness funkcie s chybovými úsečkami pre komponenty WT dekompozície	14
Obr. 3-7 Regresný model dennej spotreby plynu a vonkajšej teploty pre 3 skúmané objekty	15
Obr. 3-8 7-dňové predpovede pre rezíduá po teplotnej regresii a vplyv jednotlivých zložiek na výslednú presnosť.....	16
Obr. 3-9 Výsledky použitia regWANN modelu pre ex post predpovede počas 50 dní.....	16

Obr. 3-10 Porovnanie výsledkov reg(S)ARMA modelov s regWANN modelom pre ex ante a ex post predpovede	17
Obr. 4-1 Identifikácia nemodelovanej dynamiky pomocou RNN	18
Obr. 4-2 Porovnanie priebehov analytického modelu a vylepšeného modelu s identifikáciou pomocou RNN.....	19
Obr. 4-3 Predmetné systémy (Peano-HASEL –vľavo, spojité rameno s fluidnými svalmi – stred, manipulátor s 3 stupňami voľnosti s fluidnými svalmi)	20
Obr. 4-4 Light grey box identifikácii dynamiky 3DOF ramena s fluidnými svalmi	21
Obr. 4-5 NARX model pre identifikáciu trenia v kĺboch (vľavo) a validácia modelu dynamiky ramena (vpravo).....	22
Obr. 4-6 Validácia kompletného simulačného modelu 3DOF manipulátora s fluidnými svalmi	22
Obr. 4-7 Pohon typu Peano-HASEL pri aktivácii (vľavo) a experimentálne zistené charakteristiky pri izotonických podmienkach.....	23
Obr. 4-8 Odozva pohonu Peano-HASEL na impulzné budenie s rôznym trvaním v izometrických podmienkach (vľavo) a variabilita odozvy na periodické budenie v 10-násobnom opakovaní (vpravo)	24
Obr. 4-9 Dáta budenia pohonu Peano-HASEL s oboma polaritami a údaje posunutia využité pri identifikácii	25
Obr. 4-10 Principiálna schéma navrhovaného prístupu k tvorbe presného simulačného modelu pohonu typu Peano-HASEL s využitím ansámbľu LSTM modelov	25
Obr. 4-11 Porovnanie výstupu ansámbľového LSTM modelu pre testovacie dáta...	26
Obr. 4-12 Princíp PCC modelovania (po častiach konštantný ohyb) pre rameno so spojitou kinematikou s fluidnými svalmi	27
Obr. 4-13 Principiálna schéma navrhovaného prístupu k tvorbe kinematického modelu 2-segmentového ramena pomocou siete hierarchických fuzzy LMN modelov	28
Obr. 4-14 Porovnanie tréningových dát a testovacích dát pre hierarchické fuzzy LMN modely priestorových súradníc koncového bodu ramena.....	28
Obr. 4-15 Zobrazenie pokrytia bodov priestoru úloh v rámci identifikácie priamej kinematiky ramena	29

9 KONCEPCIA VEDECKEJ ČINNOSTI A VÝUČBY

Vo výskumnej oblasti:

- pokračovať vo výskume predikcií spotreby energií s využitím metód soft computingu v rámci bežiaceho projektu VEGA 1/0704/22 „Výskum hybridných predikčných modelov spotreby energií s využitím výpočtovej inteligencie“,

- pokračovať vo výskume modelovania/identifikácie kinematiky a dynamiky fluidných ramien so spojitou kinematikou v rámci projektu s využitím metód soft computingu v rámci projektu VEGA 1/0061/23 s názvom „Výskum modelovania a riadenia soft robotických ramien so spojitou kinematikou na báze fluidných svalov s využitím bio-inšpirovaných výpočtových metód“,
- pokračovať vo výskume soft pohonov so špecializáciou na polymérové pohony ako Peano-HASEL a inými s využitím metód deep learningu,
- prehĺbovať spoluprácu v aplikačnej oblasti predikcie spotrieb energií s využitím predikčných modelov v reálnych objektoch rôzneho charakteru online monitoringu prevádzky budov v spolupráci s praxou ako aj na výskumnej úrovni s inými inštitúciami,
- zabezpečiť prípravu na predpokladanú realizáciu podaného projektu z Plánu obnovy v doméne inteligentnej špecializácie „Inovatívny priemysel pre 21.storočie“ s názvom „Large-Scale Multisegment Fluidic Continuum Arms with Extended Stiffness Modulation and Methods of Optimized AI/ML Models in their Identification“,
- v súlade s pokračujúcim výskumom v oblasti soft pohonov a umelej inteligencie vytvoriť sieť pracovísk pre koncept inteligentnej soft robotiky s cieľom položiť základ systematickej spolupráce umožňujúcej jeho intenzívnejší rozvoj.

V pedagogickej oblasti:

- priebežne inovovať výučbu v garantovaných predmetoch s dôrazom zahrnutie najnovších poznatkov z oblasti umelej inteligencie ako aj usmerňovanie ich zmysluplného využívania (napr. LLM a ich miesto vo výučbe),
- zabezpečovať dostatočný podiel laboratórnych cvičení v garantovaných predmetoch s využívaním relevantných softvérových prostriedkov pre návrh alebo využívanie algoritmov soft computingu v spracovaní dát, identifikácii resp. riadení,
- inovovať existujúce laboratória pre výskum v oblasti identifikácie smart systémov s aplikáciou metód soft computingu využívané aj pre výučbu predmetov v oblasti mechatroniky, umelej inteligencie a elektroniky (Laboratórium inteligentných pohonov a Laboratórium elektrotechniky, mechatroniky a kybernetiky),
- podporovať študentov v aplikácii metód výpočtovej inteligencie v oblasti spracovania dát, modelovania/identifikácie systémov predovšetkým prípravou záverečných prác v danej oblasti (BP, DP aj DzP),
- prehĺbovať integráciu využívania výsledkov výskumu vo výučbe relevantných predmetov ako aj participáciu študentov nižších stupňov na jeho realizácii napr. v rámci záverečných prác,
- viesť doktorandov k snahe vytvárať si kontakty na iných inštitúciách pracujúcich v danej oblasti cez podporu mobilít (napr. Erasmus+) na partnerské organizácie,
- zapojiť sa do prípravy a následne participovať na spoločných študijných programoch konzorcia európskych univerzít Ulysseus, ktorého Technická Univerzita v Košiciach je zakladajúcim členom.

10 PRÍLOHY

10.1 Tvorivá a publikačná činnosť

Vedecké monografie vydané v domácich vydavateľstvách:	1
Kapitoly vo vedeckých monografiách vydaných v zahraničných vydavateľstvách:	1
Vysokoškolské učebnice vydané v domácich vydavateľstvách:	1
Skriptá a učebné texty:	3
Vedecké práce v zahraničných karentovaných a impaktovaných časopisoch:	20
Patenty:	18
Úžitkové vzory:	14
Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch:	16
Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch:	12
Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach SCOPUS:	14
Vedecké práce v zborníkoch zo zahraničných konferencií:	35
Vedecké práce v zborníkoch z domácich konferencií:	28

Vybrané publikácie:

Kniha

- [1] Piteľ, J., Balara, M., **Hošovský, A.** [25], Tóthová, M. *Pneumatické umelé svaly: modelovanie, simulácia, riadenie*. Košice: TU v Košiciach, 2015. 275 s. ISBN 978-80-553-2164-6.

Vedecká štúdia v monografii vydanej v zahraničnom vydavateľstve

- [1] **Hošovský, A.** [25], Piteľ, J., Trojanová, M., Židek, K. Computational Intelligence in the context of Industry 4.0. In: *Implementing Industry 4.0 in SMEs: Concepts, Examples and Applications*. Cham: Springer Nature, 2021. pp. 27-94. ISBN 978-3-030-70515-2.

Pôvodné vedecké články v impaktovaných časopisoch

- [1] **Hošovský, A.** [40], Novák-Marcinčin, J., Piteľ, J., Boržíková, J., Židek, K. Model-based Evolution of a Fast Hybrid Fuzzy Adaptive Controller for a Pneumatic Muscle Actuator. In: *International Journal of Advanced Robotic Systems*. Vol. 9 (56), 2012, pp. 1-11. ISSN 1729-8806. Impakt faktor: 0,821 (Q3).
- [2] **Hošovský, A.** [95], Havran, M. Dynamic Modeling of One Degree of Freedom Pneumatic Muscle-based Actuator for Industrial Applications. In: *Tehnički vjesnik - Technical Gazette*. Vol. 19 (3), 2012, pp. 673-681. ISSN 1330-3651. Impakt faktor: 0,601 (Q3).

- [3] Pitel', J., Mižáková, J., **Hošovský, A.** [20] Biomass Combustion Control and Stabilization Using Low-Cost Sensors. In: *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 2013, pp. 7. ISSN 1687-8132. Impakt faktor: 0,500 (Q4).
- [4] **Hošovský, A.** [100] Biomass-fired Boiler Control Using Simulated Annealing Optimized Improved Varela Immune Controller. In: *Acta Polytechnica Hungarica: An international peer-reviewed scientific journal of Óbuda University, Hungarian Academy of Engineering and IEEE Hungary Section: journal of applied sciences*. Vol. 12 (1), 2015, pp. 23-39. ISSN 1785-8860. Impakt faktor: 0,544 (Q3).
- [5] **Hošovský, A.** [55], Pitel', J., Židek, K., Tóthová, M., Sárosi, J., Cveticanin, L. Dynamic characterization and simulation of two-link soft robot arm with pneumatic muscles. In: *Mechanism and Machine Theory*. Vol. 103, 2016, pp. 106-116. ISSN 0094-114X. Impakt faktor: 2,577 (Q1).
- [6] Gánovská, B., Molitoris, M., **Hošovský, A.** [15], Pitel', J., Krolczyk, G., Ruggiero, A., Krolczyk, J., Hloch, S. Design of the model for the on-line control of the AWJ technology based on neural networks. In: *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. Vol. 23 (4), 2016, pp. 279-287. ISSN 0971-4588. Impakt faktor: 0,485 (Q4).
- [7] Židek, K., Maxim, V., Pitel', J., **Hošovský, A.** [20] Embedded vision equipment of industrial robot for inline detection of product errors by clustering-classification algorithms. In: *International Journal of Advanced Robotics Systems*. Vol. 13 (5), 2017, pp. 1-10. ISSN 1729-8814. Impakt faktor: 0,952 (Q4).
- [8] Trojanová, M., **Hošovský, A.** [50] Comparison of Different Neural Networks Models for Identification of Manipulator Arm Driven by Fluidic Muscles. In: *Acta Polytechnica Hungarica: An international peer-reviewed scientific journal of Óbuda University, Hungarian Academy of Engineering and IEEE Hungary Section: journal of applied sciences*. Vol. 15 (7), 2018, pp. 7-28. ISSN 1785-8860. Impakt faktor: 1,286 (Q3).
- [9] Mižáková, J., Pitel', J., **Hošovský, A.** [10], Kolarčík, M., Ratnayake, M. Using Special Filter with Membership Function in Biomass Combustion Process Control. In: *Applied Sciences*. Vol. 8, 2018, pp. 1279-1279. ISSN 2076-3417. Impakt faktor: 2,217 (Q2).
- [10] Sárosi, J., Pitel', J., Tóthová, M., **Hošovský, A.** [20], Biró, I. Comparative Survey of Various Static and Dynamic Models of Pneumatic Artificial Muscles. In: *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. Vol. 41 (5), 2018, pp. 825-844. ISSN 0315-8977. Impakt faktor: 0,243 (Q4).
- [11] Židek, K., Lazorík, P., Pitel', J., **Hošovský, A.** [10] An Automated Training of Deep Learning Networks by 3D Virtual Models for Object Recognition. In:

Symmetry:

Open Access Journal. Vol. 11 (4), 2019. pp. 1-16. ISSN 2073-8994. Impakt faktor: 2,645 (Q2).

- [12] Židek, K., Pitel', J., Adámek, M., Lazorík, P., **Hošovský, A.** [5] Digital Twin of Experimental Smart Manufacturing Assembly System for Industry 4.0 Concept. In: *Sustainability*. Vol. 12 (9), 2020, pp. 1-16. ISSN 2071-1050. Impakt faktor: 3,251 (Q2).
- [13] **Hošovský, A.** [45], Pitel', J., Adámek, M., Mižáková, J., Židek, K. Comparative study of week-ahead forecasting of daily gas consumption in buildings using regression ARMA/SARMA and genetic-algorithm-optimized regression wavelet neural network models. In: *Journal of Building Engineering*. Vol. 34, 2021, pp. 1-20. ISSN 2352-7102. Impakt faktor: 7,144 (D1).
- [14] Ebrahimi, N., Bi, C., Cappelleri, D. J., Ciuti, G., Conn, A. T., Faivre, D., Habibi, N., **Hošovský, A.** [10], Iacovacii, V., Khalil, I.S.M., Magdanz, V., Misra, S., Pawashe, CH., Rishidifar, R., Soto-Rodriguez, P. E. D., Fekete, Z., Jafari, A. Magnetic Actuation Methods in Bio/Soft Robotics. In: *Advanced Functional Materials*. Vol. 31 (11), 2021, pp. 1-40. ISSN 1616-301X. Impakt faktor: 19,924 (D1).
- [15] Židek, K., Pitel', J., Balog, M., **Hošovský, A.** [10], Hladký, V., Lazorík, P., Iakovets, A., Demčák, J. CNN Training Using 3D Virtual Models for Assisted Assembly with Mixed Reality and Collaborative Robots. In: *Applied sciences*. Vol. 11 (9), 2021, pp. 1-16. ISSN 2076-3417. Impakt faktor: 2,838 (Q2).
- [16] Trojanová, M., Čakurda, T., **Hošovský, A.** [20], Krenický, T. Estimation of Grey-Box Dynamic Model of 2-DOF Pneumatic Actuator Robotic Arm Using Gravity Tests. In: *Applied Sciences*. Vol. 11 (10), 2021, pp. 1-28. ISSN 2076-3417. Impakt faktor: 2,838 (Q2).
- [17] Mižáková, J., Pitel', J., **Hošovský, A.** [40], Pavlenko, I., Ochowiak, M., Khovanskyi, S. Biomass combustion control in small and medium-scale boilers based on low cost sensing the trend of carbon monoxide emissions. In: *Processes*. Vol. 9 (11), 2021, pp. 1-15. ISSN 2227-9717. Impakt faktor: 3,335 (Q2).
- [18] Simon, J., Trojanová, M., **Hošovský, A.** [25], - Sárosi, J. Neural network driven automated guided vehicle platform development for industry 4.0 environment. In: *Tehnički Vjesnik - Technical Gazette*. Vol. 28 (6), 2021, pp. 1936-1942. ISSN 1330-3651. Impakt faktor: 0,864 (Q4).
- [19] Trojanová, M., **Hošovský, A.** [30], Čakurda, T. Evaluation of Machine Learning-Based Parsimonious Models for Static Modeling of Fluidic Muscles in Compliant Mechanisms. In: *Mathematics*. Vol. 11 (1), 2023, pp. 1-33. ISSN 2227-7390. Impakt faktor: 2,4 (D1).

- [20] Sokolov, O. **Hošovský, A.** [30], Trojanová, M. Design, Modelling, and Control of Continuum Arms with Pneumatic Artificial Muscles: A Review. In: *Machines*. Vol. 11 (10), 2023, pp. 1-23. ISSN 2075-1702. Impakt faktor: 2,6 (Q2).

Pôvodné vedecké články v recenzovaných časopisoch uvedených v databáze SCOPUS

- [1] Židek, K., **Hošovský, A.** [5] Image Thresholding and Contour Detection with Dynamic Background Selection for Inspection Tasks in Machine Vision. In: *International journal of circuits, systems and signal processing*. Vol. 8, 2014, pp. 545-554. ISSN 1998-4464. SJR 0,245 (Q3).
- [2] **Hošovský, A.** [60], Piteľ, J., Židek, K. Enhanced Dynamic Model of Pneumatic Muscle Actuator with Elman Neural Network. In: *Abstract and Applied Analysis*. Vol. 2015, 2015, pp. 1-16. ISSN 1687-0410. SJR 0,55 (Q3).
- [3] Tóthová, M., Piteľ, J., **Hošovský, A.** [20], Sárosi, J., Numerical Approximation of Static Characteristics of McKibben Pneumatic Artificial Muscle. In: *International Journal of Mathematics And Computers In Simulation*. Vol. 9, 2015, pp. 228-233. ISSN 1998-0159. SJR 0,179 (Q4).
- [4] **Hošovský, A.** [80], Piteľ, J., Židek, K. Analysis of hysteretic behavior of two-DOF soft robotic arm. In: *MM Science Journal*. Vol. 2016 (September), 2016, pp. 935-941. ISSN 1803-1269. SJR 0,177 (Q3).
- [5] Židek, K., Piteľ, J., **Hošovský, A.** [10] Design of adjustable smart vision system based on artificial muscle actuators. In: *MM Science Journal*. Vol. 2016 (September), 2016, pp. 947-951. ISSN 1803-1269. SJR 0,177 (Q3).
- [6] **Hošovský, A.** [50], Hloch, S., Jurko, J., Panda, A., Trojanová, M. Preliminary investigation of static and dynamic hysteresis of DMSP-5 fluidic muscle. In: *MM Science Journal*. Vol. 2018 (March), 2018, pp. 2172-2178. ISSN 1803-1269. SJR 0,22 (Q3).
- [7] Židek, K., Vašek, V., Piteľ, J., **Hošovský, A.** [15] Auxiliary device for accurate measurement by the smartvision system. In: *MM Science Journal*. Vol. 2018 (March), 2018, pp. 2136-2139. ISSN 1803-1269. SJR 0,22 (Q3).
- [8] **Hošovský, A.** [55], Piteľ, J., Mižáková, J., Židek, K. Introductory analysis of gas consumption time series in non-residential buildings for prediction purposes using wavelet decomposition. In: *MM Science Journal*. Vol. 2018 (December), 2018, pp. 2648-2655. ISSN 1803-1269. SJR 0,22 (Q3).
- [9] Trojanová, M., **Hošovský, A.** [50] NARX-NN Model of 2-DOF Robot Arm Dynamics Driven by Fluidic Muscles. In: *MM Science Journal*. Vol. 2019 (December), 2019, pp. 3458-3462. ISSN 1803-1269. SJR 0,217 (Q3).
- [10] Trojanová, M., **Hošovský, A.** [40] Design of Test Rigs for Measuring Dynamic Properties of Soft Actuators. In: *MM Science Journal*. Vol. 2020 (March), 2020, pp. 3759-3763. ISSN 1803-1269. SJR 0,195 (Q3).

- [11] Židek, K., Pitel', J., **Hošovský, A.** [10], Lishchenko, N., Miškiv-Pavlík, M., Lazorík, P., Zbihlej, J. An automatic error surface diagnostics during turning machining operation using laser sensor. In: *MM Science Journal*. Vol. 2020 (October), 2020, pp. 3995-3999. ISSN 1803-1269. SJR 0,195 (Q3).
- [12] Trojanová, M., **Hošovský, A.** [25], Čakurda, T. Design of apparatus for evaluation of temp-dependence of creep effect in pam. In: *MM Science Journal*. Vol. 2021 (December), 2021, pp. 5460-5466. ISSN 1803-1269. SJR 0,235 (Q3).
- [13] Čakurda, T., Trojanová, M., **Hošovský, A.** [33] Complete dynamic model validation of 3- dof compliant manipulator with fluidic muscles. In: *MM Science Journal*. Vol. 2022 (December), 2022, pp. 6139-6146. ISSN 1803-1269. SJR 0,239 (Q3).
- [14] Trojanová, M., **Hošovský, A.** [40], Čakurda, T. Modeling of creep effect in dmsp-5 fluidic muscle. In: *TEM Journal: Technology, Education, Management, Informatics*. Vol. 11 (1), 2022, pp. 24-29. ISSN 2217-8309. SJR 0,231 (Q3).

Články v zborníkoch evidovaných v databáze Web of Science

- [1] Tóthová, M., **Hošovský, A.** [40] Dynamic simulation model of pneumatic actuator with artificial muscle. In: *SAMI 2013: 11th IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics: proceedings*. Danvers: IEEE, 2013. pp. 47-51. ISBN 978-1-4673-5929-0.
- [2] Biroš, O., Karchňák, J., Šimšík, D., **Hošovský, A.** [5] Implementation of wearable sensors for fall detection into smart household. In: *SAMI 2014: IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics : proceedings*. Danvers: IEEE, 2014. pp. 19-22. ISBN 978-1-4799-3441-6.
- [3] Michal, P., Vagaská, A., Gombár, M., **Hošovský, A.** [10], Kmec, J. Monitoring of influence of significant parameters during anodizing of aluminium. In: *SAMI 2014: IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics: proceedings*. Danvers: IEEE, 2014. pp. 49-54. ISBN 978-1-4799-3441-6.
- [4] **Hošovský, A.**[50], Michal, P., Tóthová, M., Biroš, O. Fuzzy Adaptive Control for Pneumatic Muscle Actuator with Simulated Annealing Tuning. In: *SAMI 2014: IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics: proceedings*. Danvers: IEEE, 2014. pp. 205-209. ISBN 978-1-4799-3441-6.
- [5] Hošovský, A., Mižáková, J., Pitel', J. Improved Modeling of Pneumatic Muscle Actuator Using Recurrent Neural Network. In: *2014 IEEE World Congress on Computational Intelligence: 2014 International Joint Conference on Neural*

- Networks (IJCNN 2014)*. Danvers: IEEE, 2014. pp. 4019-4024. ISBN 978-1-4799-1484-5.
- [6] Piteľ, J., **Hošovský, A.** [30], Tóthová, M. Dynamic Simulation Model of PMA Fuzzy Adaptive Control. In: *IMCIC 2015: Proceedings of the 6th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics*. Florida: International Institute of Informatics and Systemics, 2015. pp. 1-2. ISBN 978-1-941763-19-3.
- [7] Židek, K., Piteľ, J., **Hošovský, A.** [10] Machine learning algorithms implementation into embedded systems with web application user interface. In: *INES 2017*. Danvers: IEEE, 2017. pp. 77-81. ISBN 978-1-4799-7677-5.
- [8] **Hošovský, A.** [40], Trojanová, M., Piteľ, J., Svetlík, J. Identification of DMSP-5 Fluidic Muscle Dynamics Using Hammerstein Model. In: *SACI 2018*. Danvers: IEEE, 2018. pp. 319-324. ISBN 978-1-5386-4640-3.
- [9] Svetlík, J., **Hošovský, A.** [20], Trojanová, M., Demeč, P., Stejskal, T., Štofa, M. Optimizing workspace for homogeneous assemblies of rotational motion modules. In: *SACI 2018*. Timisoara: Politehnica University, 2018. pp. 573-579. ISBN 978-1-5386-4639-7.
- [10] Židek, K., Lazorík, P., Piteľ, J., Pavlenko, I., **Hošovský, A.** [5] Automated Training of Convolutional Networks by Virtual 3D Models for Parts Recognition in Assembly Process. In: *Advances in Manufacturing 2. Volume 2 - Production Engineering and Management*. Cham: Springer Nature, 2019. pp. 287-297. ISBN 978-3-030-18788-0.
- [11] Židek, K., **Hošovský, A.** [10], Piteľ, J., Bednár, S. Recognition of Assembly Parts by Convolutional Neural Networks. In: *Advances in Manufacturing Engineering and Materials*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2019. pp. 281-289. ISBN 978-3-319-99352-2.
- [12] Trojanová, M., **Hošovský, A.** [40] Dynamics Identification of Fluidic Muscle-actuated Planar Manipulator Using Two Nonlinear Models. In: *IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics : proceedings*. Danvers: IEEE, 2020. pp. 35-40. ISBN 978-1-7281-3149-8.

Národné patenty

- [1] Piteľ, J., Balara, M., Balara, A., Boržíková, J., **Hošovský, A.** [10] Aktuátor s umelými svalmi – 1. Patent č. 288195. ÚPV SR Banská Bystrica, 2014.
- [2] Balara, M., Piteľ, J., Boržíková, J., **Hošovský, A.** [10], Havran, M. Aktuátor s umelými svalmi – 2. Patent č. 288194. ÚPV SR Banská Bystrica, 2014.

- [3] Balara, M., Piteľ, J., Boržíková, J., **Hošovský, A.** [10] Aktuátor s umelými svalmi – 3. Patent č. 288197. ÚPV SR Banská Bystrica, 2014.
- [4] Balara, M., Piteľ, J., Mižáková, J., **Hošovský, A.** [10] Aktuátor s paralelné zapojenými umelými svalmi - 1. Patent č. 288298. ÚPV SR Banská Bystrica, 2015.
- [5] **Hošovský, A.** [60], Piteľ, J., Balara, M., Mižáková, J., Židek, K., Hybridný adaptívny systém riadenia aktuátora s umelými svalmi. Patent č. 288374. ÚPV SR Banská Bystrica, 2016.
- [6] Balara, M., **Hošovský, A.**, [10], Mižáková, J., Piteľ, J. Ľahký aktuátor s umelými svalmi. Patent č. 288428. ÚPV SR Banská Bystrica, 2016.
- [7] **Hošovský, A.** [65], Piteľ, J., Balara, M. Systém regulácie teploty vody kotlov na báze imunitného regulátora. Patent č. 288590. ÚPV SR Banská Bystrica, 2018.
- [8] **Hošovský, A.** [65], Piteľ, J., Mižáková, J., Adaptívny systém riadenia aktuátora s umelými svalmi s optimalizovaným fuzzy regulátorom. Patent č. 288588. ÚPV SR Banská Bystrica, 2018.
- [9] **Hošovský, A.** [65], Piteľ, J., Mižáková, J., Dynamický model aktuátora na báze pneumatických umelých svalov. Patent č. 288729. ÚPV SR Banská Bystrica, 2019.
- [10] **Hošovský, A.** [65], Piteľ, J., Židek, K. Systém na spresnenie dynamického modelu aktuátora na báze pneumatických umelých svalov. Patent č. 288703. ÚPV SR Banská Bystrica, 2019.
- [11] Piteľ, J., Tóthová, M., **Hošovský, A.** [30], BALARA, M. Riadený antagonistický aktuátor s pneumatickými umelými svalmi. Patent č. 288728. ÚPV SR Banská Bystrica, 2019.
- [12] **Hošovský, A.** [65], Piteľ, J., Židek, K. Fuzzy adaptívny systém riadenia aktuátora s pneumatickými umelými svalmi s bakteriálnou optimalizáciou. Patent č. 288787. ÚPV SR Banská Bystrica, 2020.
- [13] Tóthová, M., Piteľ, J., **Hošovský, A.** [30], BALARA, M. Spôsob riadenia antagonistického aktuátora s pneumatickými umelými svalmi. Patent č. 288793. ÚPV SR Banská Bystrica, 2020.
- [14] Židek, K., **Hošovský, A.** [20], Piteľ, J. Zariadenie na meranie nadrozmerných súčiastok pomocou kamerového systému. Patent č. 288809. ÚPV SR Banská Bystrica, 2020.
- [15] **Hošovský, A.** [65], Piteľ, J., Židek, K. Systém regulácie teploty vody kotlov na báze hybridného PID-imunitného regulátora s nelineárnou rozdeľovacou funkciou. Patent č. 288839. ÚPV SR Banská Bystrica, 2021.
- [16] **Hošovský, A.** [65], Piteľ, J., Židek, K. Systém kompenzácie hysterézy pneumatického umelého svalu s využitím metódy rozšíreného vstupného priestoru. Patent č. 288858. ÚPV SR Banská Bystrica, 2021.

- [17] **Hošovský, A.** [65], Piteľ, J., Trojanová, M. Systém presného polohovania pneumatického umelého svalu s kompenzáciou hysterézy pomocou modelu. Patent č. 288848. ÚPV SR Banská Bystrica, 2021.
- [18] **Hošovský, A.** [65], Piteľ, J., Židek, K. Integrovaný rotačný pohon na báze pneumatických umelých svalov. Patent č.288940. ÚPV SR Banská Bystrica, 2022.

Úžitkové vzory

- [1] Mižáková, J., Piteľ, J., **Hošovský, A.** [5], Mižák, J. Spôsob filtrovania signálov využitím funkcií príslušnosti. Úžitkový vzor č. 6838. ÚPV SR Banská Bystrica, 2014.
- [2] Balara, M., **Hošovský, A.** [10], Mižáková, J., Piteľ, J. Ľahký aktuátor s umelými svalmi - 2. Úžitkový vzor č. 6906. ÚPV SR Banská Bystrica, 2014.
- [3] Balara, M., Vagaská, A., **Hošovský, A.** [10] Výkonová riadiaca jednotka padáka ovladaného pneumatickými umelými svalmi. Úžitkový vzor č. 7267. ÚPV SR Banská Bystrica, 2015.
- [4] **Hošovský, A.** [65], Piteľ, J., Tóthová, M. Systém identifikácie dynamiky planárneho manipulátora na báze pneumatických umelých svalov. Úžitkový vzor č. 7893. ÚPV SR Banská Bystrica, 2017.
- [5] Židek, K., Majerník, J., **Hošovský, A.** [40] Spôsob rozpoznávania obrysov rôznofarebných súčiastok pomocou spodného podsvietenia na strojové videnie. Úžitkový vzor č. 7902. ÚPV SR Banská Bystrica, 2017.
- [6] **Hošovský, A.**[60], Piteľ, J., Židek, K. Zariadenie na reguláciu natočenia integrovaného pohonu s fluidnými svalmi regulátorom s inverznou nelinearitou. Úžitkový vzor č. 8681. ÚPV SR Banská Bystrica, 2020.
- [7] **Hošovský, A.** [60], Piteľ, J., Židek, K. Zariadenie na riadenie integrovaného pohonu na báze fluidných svalov. Úžitkový vzor č. 8682. ÚPV SR Banská Bystrica, 2020.
- [8] **Hošovský, A.** [60], Piteľ, J., Židek, K., Trojanová, M. Zariadenie na meranie hysterézy mechanizmu poháňaného fluidnými svalmi v multiparalelnom zapojení. Úžitkový vzor č. 8920. ÚPV SR Banská Bystrica, 2020.
- [9] Židek, K., Piteľ, J., **Hošovský, A.** [10] Spôsob automatizovaného učenia hĺbkových neurónových sietí pomocou virtuálnych 3D modelov. Úžitkový vzor č. 9406. ÚPV SR Banská Bystrica, 2021.
- [10] **Hošovský, A.** [60], Piteľ, J., Židek, K., Trojanová, M. Zariadenie na meranie teplotnej závislosti creep efektu fluidných svalov. Úžitkový vzor č. 9001. ÚPV SR Banská Bystrica, 2021.
- [11] **Hošovský, A.** [60], Piteľ, J., Trojanová, M. Zariadenie na meranie hysterézy posunutia pohonov na báze kompozitov iónový polymér/kov (IPMC). Úžitkový vzor č. 9142. ÚPV SR Banská Bystrica, 2021.

- [12] **Hošovský, A.** [60], Piteľ, J., Trojanová, M. Zariadenie na meranie teplotnej závislosti creep efektu fluidných svalov s rozšíreným rozsahom teplôt. Úžitkový vzor č. 9355. ÚPV SR Banská Bystrica, 2021.
- [13] Židek, K., Piteľ, J., **Hošovský, A.** [10] Spôsob automatizovaného učenia hĺbkových neurónových sietí pomocou virtuálnych 3D modelov. Úžitkový vzor č. 9406. ÚPV SR Banská Bystrica, 2021.
- [14] **Hošovský, A.** [60], Piteľ, J., Trojanová, M. Zariadenie na meranie statických charakteristík snímača na báze kompozitov iónový polymér/kov (IPMC). Úžitkový vzor č. 9682. ÚPV SR Banská Bystrica, 2023.

Riešiteľ národného projektu

- [1] VEGA 1/0822/16 Výskum inteligentného manipulačného zariadenia na báze pneumatických umelých svalov s troma stupňami voľnosti. 2016-2019 (zástupca vedúceho projektu)
- [2] VEGA 1/0393/18 Výskum metód modelovania a kompenzácie hysterézy v pneumatických umelých svaloch a mechanizmoch nimi poháňaných pre zvýšenie presnosti regulácie s podporou výpočtovej inteligencie. 2018-2021 (vedúci projektu)
- [3] VEGA 1/0061/23 Výskum modelovania a riadenia soft robotických ramien so spojenou kinematikou na báze fluidných svalov s využitím bio-inšpirovaných výpočtových metód. 2023-súč. (vedúci projektu)
- [4] KEGA 022TUKE-4/2023 Obsahová integrácia študijných programov Smart technológie a Inteligentné technológie v priemysle podľa trendových požiadaviek praxe. 2023-súč. (zástupca vedúceho projektu)

Spoluriešiteľ národného projektu

- [1] VEGA 1/2212/05 Výskum a vývoj mechatronických komponentov a sústav bioservosystémov na báze pneumatických umelých svalov. 2005-2007 (spoluriešiteľ)
- [2] VEGA 1/4077/07 Výskum algoritmov pre optimalizáciu riadenia nelineárnych dynamických sústav s dopravným oneskorením technikami umelej inteligencie. 2007-2009 (spoluriešiteľ)
- [3] VEGA 1/0345/08 Modelovanie a simulácia mechatronických systémov pre strojárstvo. 2008-2010 (spoluriešiteľ)
- [4] VEGA 1/0881/13 Výskum algoritmov a metód prediktívneho riadenia spaľovacích procesov biomasy. 2013-2016 (spoluriešiteľ)
- [5] APVV-0207-12 Monitorovanie interakcie hydroabrazívneho prúdu pomocou vibrácií a akustickej emisie. 2013-2017 (spoluriešiteľ)

- [6] APVV-15-0602 Prediktívny systém monitorovania a vyhodnocovania účinnosti výroby a dodávky tepla s využitím techník výpočtovej inteligencie. 2015-2019 (spoluriešiteľ)
- [7] HORIZON 2020 ID:734713 Smart Manufacturing and Logistics for SMEs in an X-to-order and Mass Customization Environment. 2017-2022 (spoluriešiteľ)
- [8] APVV-19-0590 Modulárne multifunkčné kontrolné pracovisko s využitím techník výpočtovej inteligencie. 2019-2023 (spoluriešiteľ)
- [9] VEGA 1/0700/20 Identifikácia nezhôd strojárskeho výrobného procesu pokročilými technikami rozpoznávania objektov s využitím konvolučných neurónových sietí. 2020-2023 (spoluriešiteľ)
- [10] KEGA 055TUKE-4/2020 Transfer poznatkov z výskumu digitalizácie výrobných procesov do študijných programov Fakulty výrobných technológií. 2020-2023 (spoluriešiteľ)
- [11] KEGA 025TUKE-4/2020 Vývoj laboratória modulárnej výroby v podmienkach masovej kustomizácie za účelom inovácie výučby v študijnom programe Riadenie výroby. 2020-2023 (spoluriešiteľ)
- [12] VEGA 1/0704/22 Výskum hybridných predikčných modelov spotreby energií s využitím výpočtovej inteligencie. 2022-súč. (spoluriešiteľ)
- [13] KEGA 014TUKE-4/2023 Implementácia digitálneho dvojčaťa SMART laboratórií FVT TUKE do online kolaboratívneho výučbového procesu s využitím zmiešanej reality. 2023-súč. (spoluriešiteľ)
- [14] HORIZON Europe ID: 101086487 A Strategic Roadmap Towards the Next Level of Intelligent, Sustainable and Human-Centred SMEs. 2023-súč. (spoluriešiteľ)
- [15] APVV-22-0391 Modifikácia povrchov ultrazvukom budeným vodným prúdom. 2023-súč. (spoluriešiteľ)

10.2 Pedagogická činnosť a výchova doktorandov

Počas 18 ročnej pedagogickej praxe prednášanie 7 a vedenie cvičení 9 predmetov riadneho vysokoškolského štúdia, zavedenie 6 nových predmetov, vybudovanie 3 laboratórií. Autor resp. spoluautor 4 vysokoškolských učebných textov. Školiteľ 4 doktorandov, pričom 2 úspešne obhájili dizertačné práce a 1 je po absolvovaní štátnej dizertačnej skúšky.

10.3 Odborný životopis

Meno a priezvisko, titul: **Alexander Hošovský, doc., Ing., PhD.**

Dátum a miesto narodenia: **31. 08. 1981 v Prešove**

Postavenie v zamestnaní: **docent**

Vzdelanie

1995 – 1999 Gymnázium Konštantínová 2, Prešov

1999 – 2004 **Ing.**, Vojenská letecká akadémia gen. M.R. Štefánika, odbor letecká elektrotechnika, obhajoba diplomovej práce na tému „Protizrážkové palubné systémy“

2005 – 2008 **PhD.**, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, obhajoba dizertačnej práce na tému „Riadenie polohového servosystému na báze pneumatických umelých svalov s aplikáciou akceleračnej slučky“

2014 **doc.**, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, obhajoba habilitačnej práce na tému „Metódy výpočtovej inteligencie v modelovaní a riadení manipulačných zariadení poháňaných umelými svalmi“

Doterajší priebeh zamestnania, odborná prax

2008 – 2015 odborný asistent, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove

2015 – súč. docent v odbore „Priemyselné inžinierstvo“, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove

Vedecká orientácia:

soft robotika, soft pohony, soft computing, umelá inteligencia a strojové učenie, predikcie časových radov, identifikácia systémov, modelovanie a simulácia dynamických systémov, automatické riadenie, mechatronika

	POROZUMENIE		HOVORENIE		PÍSANIE
	Počúvanie	Čítanie	Ústna interakcia	Samostatný ústny prejav	
angličtina	C1	C1	C1	C1	C1

Úroveň: A1 a A2: Používateľ základov jazyka - B1 a B2: Samostatný používateľ - C1 a C2: Skúsený používateľ

doc. Ing. Alexander Hošovský, PhD.

Metódy soft computingu v identifikácii smart systémov

Soft computing methods in identification of smart systems

Teze inaugurační přednášky ke jmenování profesorem

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: 90 ks

Sazba: Alexander Hošovský

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Pořadí vydání: První

Rok vydání 2024

ISBN 978-80-7678-237-2