



Sborník odborného semináře

**Nové metody a postupy v oblasti přístrojové techniky,
automatického řízení a informatiky 2017**

29. 5. – 30. 5. 2017, Svatý Jan pod Skalou

ISBN 978-80-01-06300-2

OBSAH

Ivan Uhlíř, Milan Daneček, Adam Kouba

**Nyquist – Shannon – Kotělnikovův teorém trochu jinak, neboli
Měřit analogově nebo digitálně?** 1

Martin Veselý

Studie adaptivního regulátoru pro systém s dopravním zpožděním..... 4

Vladimír Hlaváč

Vyčíslování konstant pro genetické programování..... 10

Lukáš Blaško, Petr Barón, Dušan Paulišin

Analýza vybraných konstrukčních částí aktuátora DSM..... 17

Monika Trojanová, Alexander Hošovský, Ivo Bukovský

**Identifikácia dynamiky ramena manipulátora s pneumatickými umelými svalmi
s využitím neuronových sietí a učiacich algoritmov v programe Python.....** 25

Petr Homolka, Jaroslav Bušek

Autonomní samorozkládací koptera 35

Editor: Ing. Vladimír Hlaváč, Ph.D.

Název díla: Nové metody a postupy v oblasti přístrojové techniky,
automatického řízení a informatiky 2017

Vydalo: České vysoké učení technické v Praze

Zpracoval: Ústav přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze

Kontaktní adresa: Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6

Tel.: 420 2 2435 2563

Počet stran: 38 Pořadí vydání: 1.

Vydáno dne 31. srpna 2017 jako pdf soubor na CD.

Dostupné na webových stránkách Ústavu přístrojové a řídicí techniky:

<http://control.fs.cvut.cz/cz/nmp>

ISBN: 978-80-01-06300-2

NYQUIST – SHANNON – KOTĚLNIKOVŮV VZORKOVACÍ TEORÉM TROCHU JINAK, NEBOLI MĚŘIT ANALOGOVĚ NEBO DIGITÁLNĚ? (NYQUIST – SHANNON – KOTELNIK THEOREM, DIGITAL OR ANALOGUE MEASUREMENT?)

Ivan Uhlíř¹, Milan Daneček², Adam Kouba³

¹ Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT v Praze

² Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT v Praze

³ Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT v Praze

Abstrakt: Článek se problémy digitálních elektroměrů s odkazem na zjištěními studie zveřejněná autory University of Twente ve spolupráci s Amsterdam University of Applied Science. Studie se popisuje rozdíly v měření při použití elektromechanického a digitálního domovního elektroměru. Měření provedená autory ukazují, že digitální elektroměr je ovlivněn elektromagnetickou interferencí, která může vést k chybnému odečtu měřené elektrické energie.

Klíčová slova: Elektromechanický elektroměr, Digitální elektroměr, Elektromagnetické kompatibilita, Interference

Abstract: This paper is focused on problems of digital energy meters with link to findings in a study carried out by the University of Twente., in collaboration with the Amsterdam University of Applied Science. Study describes differences in measurement between electromechanical energy meters and electronic energy meters. Measurements taken by authors show, that electronic energy meters are affected by electromagnetic interference, which can lead to false readings.

Keywords: Electromechanical energy meter, Electronic energy meter, Electromagnetic compatibility, Interference

1 Úvod

V Holandsku se rozrůstá aféra, ve které drobní spotřebitelé elektrické energie protestují u některých elektrorozvodných společností proti namontování digitálních elektroměrů. K výměně analogových „kotoučkových“ elektroměrů pracujících s indukčním měřicím systémem (Ferraris) za digitální elektroměry s dálkovým odečtem došlo zejména v souvislosti s instalací solárních panelů s měniči. Po této modernizaci, která měla vést ke snížení odebírané energie o energii ze solárních panelů, došlo naopak k výraznému nárůstu naměřených a fakturovaných hodnot odběru. Vyjasnění a řešení rozporu se ujala také publikace [1] tří autorů z renomovaných holandských universit a dalších navazujících článků [3-5].

2 Rozbor problematiky

Autoři v [1] provedli současná měření několika elektroměry obou různých systémů a došli k šokujícímu, ale objektivnímu zjištění, naměřené údaje se liší až o 250%. Autoři vysvětlují vznik chyby u digitálního elektroměru porušením komparace úrovně analogových veličin napětí a proudů vlivem obsahu vyšších harmonických jejich průběhů v síti. Nárůst vyšších harmonických v sítích je způsoben stále častějším používáním nekonvenčních

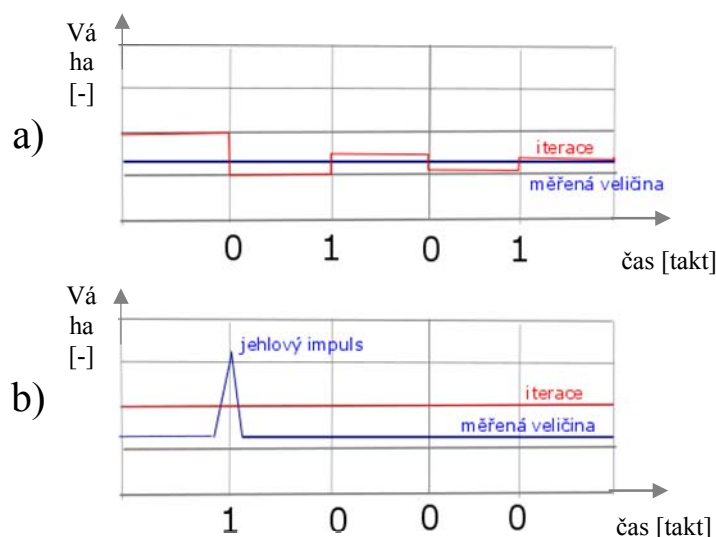
spotřebičů pracujících na síti: již zmíněných DC/AC měničů solárního systému, ale také úsporných fluorescenčních a LED svítidel s měniči. Vysvětlení je v podstatě správné, ale autoři nevysvětlují proč je digitálně naměřená hodnota vždy vyšší než hodnota správné, tedy nevysvětlují proč je okrádán spotřebitel, proč se chyby nahoru a dolů nevyrovnávají.

Používané jednoduché měniče v patičích tzv. úsporných a LED svítidel jsou často mimo normu elektromagnetické kompatibility tím, že působí velmi úzké jehlové impulsy. Obzvláště úzké jsou impulsy, které působí jiskřením komutátorové motory ve vysavačích, pračkách, atd. Jehlové impulsy jsou sice energeticky ve spektru zcela nevýznamné, ale mohou významně narušit vzorkovací proces A/D převodníku, obzvláště je-li použit převodník zpětnovazební s iteračním programem.

3 Původ kladné chyby měření

K vysvětlení vnitřní funkce běžného zpětnovazebního A/D převodníku s iteračním programem, který je nejčastěji používaným slouží Obr. 1. Na Obr. 1 je znázorněn příklad jeho funkce, když je měřená hodnota proudu ve spodní části rozsahu. To je nejčastější případ při měření elektroměrem v domácnosti, průměrné využití proudového rozsahu elektroměru v domácnosti je ve skutečnosti jen několik procent.

Předpokládejme, že přijde úzký, jehlový impuls na vstup A/D převodníku v rozhodném okamžiku, ve kterém komparátor vyhodnocuje relaci měřeného vstupního napětí a napětí kompenzačního z A/D bloku ovládaného iteračním programem, dojde vždy k přečtení hodnoty 1, tak jako by napětí měřeného vstupu bylo větší než napětí kompenzační. Takto vzniklá „falešná“ jednička v nejvyšším, nebo některém z vysokých binárních řádů nemůže být v již započatém měření – vzorkování opravena. Proto je chyba měření ve spodní části rozsahu digitálního elektroměru vždy kladná.



Obr. 1: a) Příklad správné funkce A/D převodníku; b) Příklad funkce převodníku při jehlovém impulsu

Jak lze takové chybě zabránit:

- Je třeba zabránit proniknutí ostrých rušivých impulsů do A/D převodníku. Tedy plně vyřešená elektromagnetická kompatibilita. To v silových rozvodech není levné a často to ani není možné.
- Analogovým filtrem na vstupu převodníku, který bude mít na frekvenci taktů A/D převodu útlum větší než je poměr amplitudového inkrementu měření k rozsahu měření.
- Použití jiného iteračního programu, který by pracoval „od shora“ nebo některého z integračních převodníků.

4 Vzorkovací teorém ve výuce fakulty strojní

V naší výuce reprezentuje vztah pro vzorkovací frekvenci Shannon – Kotělnikovův vzorkovací teorém:

$$f_{\text{vzorkovací}} \geq 2 \cdot f_{\text{max}} \quad (1)$$

Pro sinusový pozorovaný průběh f_{max} se pro rovnost ve vzorci umístí vzorkovací bod střídavě na maximum a minimum sinusového průběhu. Pomlčíme o případu, kdy vzorkovací body jsou umístěny v průchodech nulou, $0, \pi, 2\pi, 3\pi$, atd. K tomu dodáme, že toto je krajní případ, že ve skutečnosti je třeba volit vzorkovací frekvenci $5x, 10x, 20x \dots$ atd. vyšší, než je nejvyšší harmonická obsažená v signálu. Ale co je nejvyšší harmonická obsažená v signálu? Jak je definován její útlum proti základní harmonické? Náš odhad je opřen o to, že amplitudy harmonických musí jen ubývat s jejich násobkem základní frekvence, to však není vždy pravda. Přesnější rozbor zájemce najde např. i na Wikipedii [2]. Přesný rozbor je sice pro náš rozsah základní výuky příliš obsáhlý, ale aby uživatel nepadl do omylu, je třeba jej varovat, že výklad f_{max} není radno zjednodušovat na jednoduchý odhad. Dále je potřeba zdůraznit, že po dobu převodu se nesmí vzorkování signálu měnit více, než o uvažovaný inkrement měření a to ani sebe kratší dobu.

5 Závěr

Na základě výše uvedených úvah, se autorská skupina již delší dobu pro měření elektrických výkonů úspěšně používá raději analogového násobení veličin fázových napětí a fázových proudů a jejich dalšího analogového zpracování z fázových výkonů až pro celkový činný a jalový výkon v energetických soustavách.

Poděkování

Publikace byla vytvořena za podpory interního grantu SGS17/071/OHK2/1T/12: Měření dynamických vlastností fázorů v okrsku elektrovodné sítě a grantu SGS15/062/OHK2/1T/12: Analogový měřicí převodník elektrických výkonů

Literatura

- [1] LEFERINK F., KEYER C., MELENTJEV A.: Static Energy Meter Errors Caused by Conducted Electromagnetic Interference. In: IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine – 2016, Volume 5 – Quarter 4
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%93Shannon_sampling_theorem
- [3] http://m.nzherald.co.nz/business/news/article.cfm?c_id=3&objectid=11816828
- [4] <https://www.utwente.nl/en/news/1/2017/3/313543/electronic-energy-meters-false-readings-almost-six-times-higher-than-actual-energy-consumption>
- [5] <http://automatizace.hw.cz/nektere-elektromery-meri-az-6x-vetsi-spotrebu-nez-je-skutecnost.html>

STUDIE ADAPTIVNÍHO REGULÁTORU PRO SYSTÉM S DOPRAVNÍM ZPOŽDĚNÍM

A study of adaptive controller for system with time delay

Veselý Martin

Abstrakt Článek se zabývá aplikací optimalizační metody Gradient Descent pro optimalizaci lineární polynomiální neuronové jednotky LNU jako regulátor pro řízení systému s dopravním zpožděním akčního zásahu. V článku je řešen problém nezávislosti optimalizační funkce a vah neuronu jako regulátor v téměř diskrétním čase. Jako řešení tohoto problému byl sestaven korekční člen v optimalizačním algoritmu který tuto skutečnost zohledňuje.

Klíčová slova HONU; LNU; řízení s referenčním modelem; řízení s dopravním zpožděním

Abstrakt The article deals with application of the Gradient Descent optimization method for the optimization of the linear polynomial neural unit LNU as a controller for controlling the system with a transport delay of the control variable. The article deals with the problem of the independence of the optimization function and the weight of the neuron as a controller in the same discrete time. As a solution to this problem, a correction member has been compiled in an optimization algorithm that takes this into account.

Key words HONU; LNU; Model Reference Control; Control With Time Delay

1. Úvod

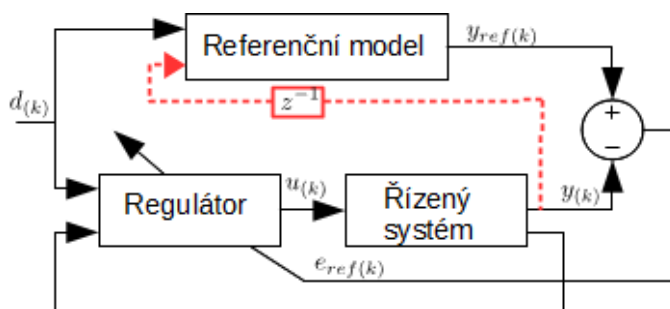
Práce ukazuje aplikaci lineární neuronové jednotky LNU [1] jako diskrétní adaptivní regulátor pro řízení spojitého systému v reálném čase. Adaptivní znamená schopnost regulátoru přizpůsobovat své parametry v reálném čase, během procesu. Pro adaptaci vah neuronu, představující parametry regulátoru, je použita metoda Gradient Descent [2]. Je to optimalizační metoda hledající lokální minima optimalizační funkce. Tato metoda byla vybrána jednak z důvodu, že neuronová jednotka LNU má pouze jeden lokální extrém [3] [4], není tedy třeba aplikovat optimalizační metody hledající globální extrémy. Druhým důvodem je její výpočetní nenáročnost. Není zde třeba počítat inverzní matice, aproximace či provádění více iteračních výpočtů během jednoho časového kroku. Optimalizační metoda GD je tedy vhodná při aplikaci v jednoduchých programovatelných řídicích jednotkách a při řízení rychlých systémů.

V první části je ukázán matematický popis LNU jako regulátor a jako model řízené soustavy. Druhá část se věnuje adaptaci neuronové jednotky jako regulátor. Pro toto učení vah neuronu je jako učitel použit sériově-paralelní referenční model. Je zde interpretována optimalizační metoda Gradient Descent a dále je ukázáno její použití pro řízení systému s dopravním zpožděním akčního zásahu, tedy v případě kdy odchylka mezi výstupem z

referenčního modelu a regulované veličiny nezávisí na akčním zásahu a váhách neuronu v tomtéž diskretním čase. Ve třetí části je pak simulačně ukázáno řízení systému s dopravním zpožděním bez přeučení vah neuronu jako regulátor.

2. HONU jako regulátor a model řízené soustavy

Základní myšlenkou řízení s referenčním modelem je vnutit chování referenčního modelu uzavřenému regulačnímu obvodu [5]. Základy řízení se sériově-paralelním referenčním modelem byli ukázány v [6] a podrobnější popis pro diskretní řízení je v [7]. Základní schéma je zobrazeno na obr.1.



5Obr. 1: Základní schém řízení se sériově-paralelním referenčním modelem

Regulátorem je pak soubor pravidel a funkcí, které toto referenční chování uzavřenému regulačnímu obvodu zaručí. Řízení s LNU jako regulátor vychází z předpokladu, že takovýto soubor pravidel a funkcí lze s dostatečnou přesností aproximovat neuronovou jednotkou LNU. Tentýž předpoklad pak platí i pro regulovaný systém. V této práci je ukázáno použití LNU jako regulátor a model řízeného systému.

Lineární neuronová jednotka má lineární agregační funkci a v této práci není uvažována přenosová funkce. Výpočet výstupu z LNU jako regulátor (akční zásah $u(k)$) je (1).

$$u(k) = \mathbf{v}(k) \cdot \xi(k) \quad (1)$$

Kde $\xi(k)$ je vstupním vektorem do LNU jako regulátor v diskretním čase k . Může se skládat z měřených hodnot řízené veličiny y a žádaných hodnot d (5). \mathbf{v} je vektorem vah neuronu.

Za účelem znalosti relace mezi akčními zásahy v příslušných diskretních časech a aktuální hodnotou regulované veličiny byl sestaven model ve tvaru (2). Kde $\mathbf{x}_y(k)$ a $\mathbf{x}_u(k)$ představují vstupní vektory do modelu (3) a (4). w_1 , \mathbf{w}_y a \mathbf{w}_u jsou váhy LNU jako model řízení soustavy.

$$y_n(k) = w_1 + \mathbf{w}_y \cdot \mathbf{x}_y(k) + \mathbf{w}_u \cdot \mathbf{x}_u(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_y(k) = [y(k-1), \dots, y(k-n_y)]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_u(k) = [u(k-\tau), \dots, u(k-\tau-n_d+1)]^T \quad (4)$$

je dopravní zpoždění řízeného systému. τ

$$\xi(k) = [1, y(k-1), \dots, y(k-m_y), d(k), \dots, d(k-m_d+1)]^T \quad (5)$$

3. Učení regulátoru metodou Gradient descent

Optimalizační metoda Gradient Descent nebo též známá pod názvem Steepest Descent hledá lokální minima. Pro LNU jako regulátor ji lze zapsat následovně:

$$v_{i(k+1)} = v_{i(k)} - \mu^{(k)} \cdot \frac{\partial Q^{(k)}}{\partial v_{i(k)}} \quad (6)$$

Kde μ je součinitel rychlosti učení. Rovnici (6) lze interpretovat následovně: Váhy $\mathbf{v}_{(k+1)}$ jsou počítány z hodnot $\mathbf{v}_{(k)}$ v předchozím čase proti směru gradientu optimalizační funkce $Q^{(k)}$. $Q^{(k)}$ je sestavena tak, aby nabývala svého minima, právě když je referenční odchylka $e_{ref(k)}$ mezi referenčním signálem $y_{ref(k)}$ a regulovanou veličinou $y(k)$ (7) nulová.

$$Q^{(k)} = \frac{1}{2} (y_{ref(k)} - y(k))^2 \quad (7)$$

Aby bylo možné vypočítat gradient optimalizační funkce (7) v (6), je předpokládáno, že chování modelu (2) se dostatečně blíží chování reálného systému a tedy platí (8).

$$y_{n(k)} \approx y(k), \forall k \quad (8)$$

Dosazením LNU jako regulátor (1) v příslušných časech do vstupního vektoru akčních zásahů (4) dostáváme:

$$\mathbf{x}_{u(k)} = \begin{bmatrix} u_{(k-\tau)} = \mathbf{v}_{(k-\tau)} \cdot \xi_{(k-\tau)} \\ \vdots \\ u_{(k-\tau-n_u+1)} = \mathbf{v}_{(k-\tau-n_u+1)} \cdot \xi_{(k-\tau-n_u+1)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Dosazením (9) do (2) je zřejmé, že nelze provést gradient v (6) neboť zde nejsou obsaženy váhy $\mathbf{v}_{(k)}$. Gradient by tak vyšel vždy nulový. Optimalizační funkce (7) není tedy závislá na vahách \mathbf{v} v čase k . Vzniklý problém je řešen pomocí tzv. fiktivního výstupu z modelu $\tilde{y}_{n(k)}$, který by nastal kdyby všechny opožděné akční zásahy v (4) byly počítány z aktuálních vah $\mathbf{v}_{(k)}$. Fiktivní vstupní vektor do modelu $\tilde{\mathbf{x}}_{u(k)}$ lze potom napsat dosazením aktuálních vah do (9) následovně:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{u(k)} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{(k-\tau)} = \mathbf{v}_{(k)} \cdot \xi_{(k-\tau)} \\ \vdots \\ \tilde{u}_{(k-\tau-n_u+1)} = \mathbf{v}_{(k)} \cdot \xi_{(k-\tau-n_u+1)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Fiktivní výstup z modulu $\tilde{y}_{n(k)}$ je počítán podle (2) dosazením (10):

$$\tilde{y}_{n(k)} = w_1 + \mathbf{w}_y \cdot \tilde{\mathbf{x}}_{y(k)} + \mathbf{w}_u \cdot \tilde{\mathbf{x}}_{u(k)} \quad (11)$$

Nyní lze pomocí (11) sestavit optimalizační funkci závislejší pouze na aktuálních vah $\mathbf{v}_{(k)}$:

$$Q^{(k)} = \frac{1}{2} (y_{ref(k)} - \tilde{y}_{n(k)})^2 \quad (12)$$

Požítím (12) můžeme gradient v (6) vypočítat následovně:

$$\frac{\partial Q^{(k)}}{\partial \mathbf{v}_{(k)}} = -\mu^{(k)} \cdot (y_{ref(k)} - w_1 - \mathbf{w}_y \cdot \tilde{\mathbf{x}}_{y(k)} - \mathbf{w}_u \cdot \tilde{\mathbf{x}}_{u(k)}) \cdot \mathbf{w}_u \cdot J^{(k)} \quad (13)$$

Kde J je Jacobiho matice:

$$J_{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tilde{\mathbf{x}}_{u(k-\tau)}}{\partial v_{1(k)}} & \dots & \frac{\partial \tilde{\mathbf{x}}_{u(k-\tau-n_u+1)}}{\partial v_{1(k)}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{\mathbf{x}}_{u(k-\tau)}}{\partial v_{m(k)}} & \dots & \frac{\partial \tilde{\mathbf{x}}_{u(k-\tau-n_u+1)}}{\partial v_{m(k)}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Schopnost učení (1) bude ovlivněna dodržěním předpokladu (8). Což znamená, že učení LNU jako regulátor bude závislé na kvalitě naučení vah modelu w_1 , \mathbf{w}_y a \mathbf{w}_u . Pro zvýšení schopnosti učení je dále sestaven tzv. korekční člen $\delta y_{(k)}$, umožňující použít naměřenou regulační veličinu namísto členů obsahující \mathbf{w}_y a w_1 v (13). Korekční člen byl sestaven jako rozdíl mezi regulovanou veličinou a fiktivním výstupem z modelu:

$$\delta y_{(k)} = y_{(k)} - \tilde{y}_{n(k)} \quad (15)$$

Porovnáním členů v (9) a (10) lze sestavit obdobný vztah i pro vstupní vektory do modelů:

$$\delta \mathbf{x}_{u(k)} = \mathbf{x}_{u(k)} - \tilde{\mathbf{x}}_{u(k)} \quad (16)$$

Pro určení členu $\delta x_{(k)}$ je dále nezbytné znát vztah mezi vahami $\mathbf{v}_{(k)}$ a $\langle \mathbf{v}_{(k-\tau)}, \mathbf{v}_{(k-\tau-n_u+1)} \rangle$. Tyto závislosti lze získat z úpravy (6) do tvaru (17) a následným dosazováním rovnice sama do sebe v jednotlivých diskretních časech (18).

$$v_{i(k-1)} = v_{i(k)} + \mu_{(k-1)} \cdot \frac{\partial Q_{(k-1)}}{\partial v_{i(k-1)}} \quad (17)$$

$$v_{i(k-n)} = v_{i(k)} + \sum_{i=1}^n \mu_{(k-n)} \cdot \frac{\partial Q_{(k-n)}}{\partial v_{i(k-n)}} \quad (18)$$

Dosazením (18) do (9) v daných časech dostaneme:

$$\mathbf{x}_{u(k)} = \begin{bmatrix} \left(\mathbf{v}_{(k)} + \sum_{i=1}^{\tau} \mu_{(k-i)} \cdot \frac{\partial Q_{(k-i)}}{\partial \mathbf{v}_{(k-i)}} \right) \cdot \xi_{(k-\tau)} \\ \vdots \\ \left(\mathbf{v}_{(k)} + \sum_{i=1}^{\tau+n_u-1} \mu_{(k-i)} \cdot \frac{\partial Q_{(k-i)}}{\partial \mathbf{v}_{(k-i)}} \right) \cdot \xi_{(k-\tau-n_u+1)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Porovnáním členů v (10) a (18) pak lze $\delta x_{(k)}$ v (16) vypočítat následovně:

$$\delta x_{(k)} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{\tau} \mu_{(k-i)} \cdot \frac{\partial Q_{(k-i)}}{\partial \mathbf{v}_{(k-i)}} \cdot \xi_{(k-\tau)} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{\tau+n_u-1} \mu_{(k-i)} \cdot \frac{\partial Q_{(k-i)}}{\partial \mathbf{v}_{(k-i)}} \cdot \xi_{(k-\tau)} \end{bmatrix} \quad (20)$$

A následně korekční člen $\delta y_{(k)}$ lze vypočítat pomocí (20):

$$\delta y_{(k)} = \mathbf{w}_u \cdot \delta \mathbf{x}_{u(k)} \quad (21)$$

Dosazením korekčního členu (21) do (15) a posléze do (13) dostáváme výslednou rovnici pro adaptaci vah LNU jako regulátor (22) nezávislou na w_1 a \mathbf{w}_y .

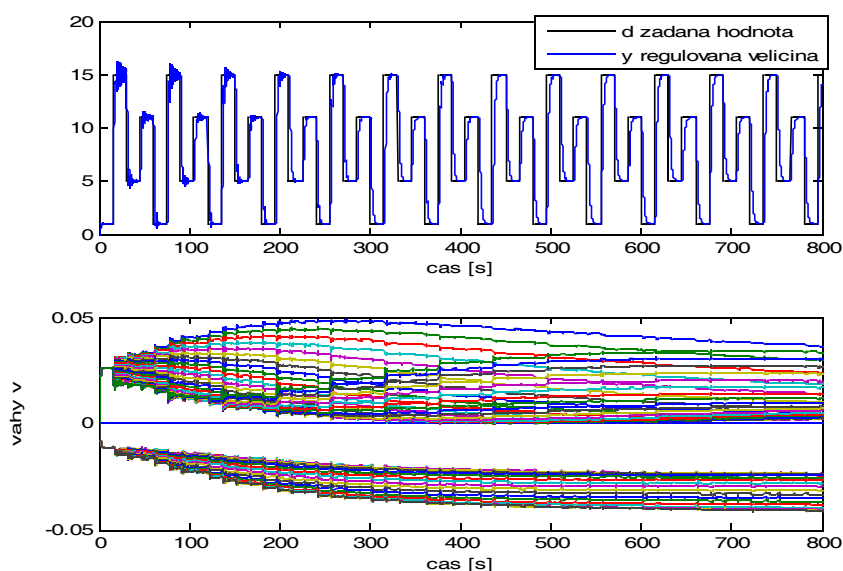
$$\mathbf{v}_{(k+1)} = \mathbf{v}_{(k)} + \mu_{(k)} (y_{ref(k)} - y_{(k)} + \mathbf{w}_u \cdot \delta \mathbf{x}_{u(k)}) \cdot \mathbf{w}_u \cdot J_{(k)} \quad (22)$$

4. Experimentální analýza

Vlastnosti navrženého algoritmu byly testovány simulačně při řízení lineárního systému s dopravním zpožděním. Parametry řízeného systému a referenčního modelu jsou uvedeny v tab.1.

Tabulka 1. Vlastnosti řízeného a referenčního modelu

	Řízený model	Referenční model
Statické zesílení	3.3	1
kořeny	$-0.4 \pm 2.7i$	$-2; -0.7$
dopravní zpoždění	0.3s	0.3s



Obr. 2: Simulace řízení s učením vah regulátoru

Vzorkovací perioda byla zvolena 0.05s. Simulace probíhala se přeúčeným modelem řízené soustavy použito ve tvaru (2) a nulovými nastavením vah LNU jako regulátor $v_{\forall i \forall j}(k) = 0$. Výsledky simulace jsou ukázány na obr.2.

5. Závěr

Článek ukazuje možnost aplikace optimalizační metody Gradient Descent pro adaptaci vah LNU jako regulátor. Aby bylo možné aplikovat metody pro regulovaný systém s dopravním zpožděním akčního zásahu, byl navržen korekční člen v optimalizační funkci. Druhá část pak byla věnována simulaci řízení systému s dopravním zpožděním.

Literatura

[1] I. Bukovsky, Z.-G. Hou, J. Bila, and M. M. Gupta, "Foundation of Notation and Classification of

- Nonconventional Static and Dynamic Neural Units,” 2007, pp. 401–407.
- [2] G. Arfken, “The Method of Steepest Descents,” *The method of steepest descents*, vol. 1985, no. 3.
 - [3] I. Bukovsky and N. Homma, “An Approach to Stable Gradient Descent Adaptation of Higher-Order Neural Units,” *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.*, vol. 2016, no. DOI:10.1109/TNNLS.2016.2572310.
 - [4] I. Bukovsky, N. Homma, L. Smetana, R. Rodriguez, M. Mironovova, and S. Vrana, “Quadratic neural unit is a good compromise between linear models and neural networks for industrial applications,” 2010, pp. 556–560.
 - [5] I. D. Landau, R. Lozano, M. M’Saad, and A. Karimi, *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications*. Springer Science & Business Media, 2011.
 - [6] V. Kasparian and C. Batur, “Model reference based neural network adaptive controller,” *ISA Trans.*, vol. 37, no. 1, pp. 21–39, Březen 1998.
 - [7] M. Veselý and I. Bukovský, “Adaptivní neuroregulátor se sériově-paralelním referenčním modelem,” *ARTEP*, vol. 2006.

VYČÍSLOVÁNÍ KONSTANT PRO GENETICKÉ PROGRAMOVÁNÍ (CONSTANT EVALUATION FOR GENETIC PROGRAMMING)

Vladimír Hlaváč¹

¹ ČVUT FS, hlavac@fs.cvut.cz

Abstrakt: Při použití genetického programování pro symbolickou regresi je důležitá role číselných hodnot konstant. Některé běžně používané metody byly ověřeny na testovacích datech a výsledky porovnány. Nejrychleji se přibližné hodnoty konstant podařilo získat gradientní metodou.

Klíčová slova: Genetické programování, Symbolická regrese, Vyčíslování konstant, Gradientní metody.

Abstract: To use the genetic programming for the symbolic regression, the role of constant evaluation is important. The article compares some of commonly used methods. Graphs are included. The Exponentiated gradient descent method showed to be the fastest.

Keywords: Genetic programming, Symbolic regression, Constant evaluation, Gradient descent.

1 Úvod

Jednou z metod, jak k datům nalézt zápis modelu vhodnou funkcí (symbolická regrese) je genetické programování. Genetické programování vychází z genetických algoritmů, které jsou typickým představitelem evolučních výpočetních technik. Aby byla řešitelná operace křížení, aplikoval zde prof. Koza [1] zápis funkce stromem. Potomek vznikne ze dvou rodičů tím, že převezme část stromu jednoho rodiče a doplní jej částí stromu druhého rodiče. Pokud se tvoří dva potomci tak, že se u rodičů vzájemně vymění dva podstromy (větve), mluví se o symetrickém křížení, i když na rozdíl od genetických algoritmů zde nemusí být měněné části stromů stejně velké. Výsledný algoritmus generuje přednostně jedince (navrhované funkce) podobné těm, které jsou nejuspěšnější v průběhu evoluce.

Funkce je programem sestavována z takzvaných primitivních funkcí, za které se zde ale považují i nezávisle proměnné a konstanty. Proměnné a konstanty tvoří listy stromu. Funkce mohou mít jeden parametr (\sin , \ln , x^2), dva parametry (sčítání, odčítání, násobení, dělení) a obecně i více.

Význam a nutnost vyčíslování konstant vychází až z praktického užití genetického programování ve funkci symbolické regrese. Zatímco školní úlohy jako uhadnutí kombinace funkcí nebo hledání goniometrických ekvivalencí vystačí v roli konstant s jedničkou, dvojkou a nejvýš Ludolfova čísla, v praxi je vyčíslování konstant nevyhnutelné. Například jedna ze složek hledané funkce je harmonický signál; kromě určení funkce sinus je třeba ještě vyčíslit amplitudu, frekvenci a fázový posun. Nejčastějším řešením tohoto problému je využití jiné evoluční výpočetní techniky, která je uzpůsobena přímo pro vyhledání optimálních hodnot koeficientů. Většinou však nejde o přímou integraci, ale pomocná metoda vytváří samostatný modul nebo je jinak od hlavní evoluce oddělena.

Tento článek porovnává některé z možných výpočetních metod pro určování hodnot konstant.

2 Data

Aby bylo možné porovnat výsledky jednotlivých metod, byla navržena funkce, pro kterou byly konstanty vyhledávány. Následující text pracuje s funkcí (1)

$$f(x, y) = k_1 \sin(k_2 x + k_3 y) \quad (1)$$

Konstanty byly nastaveny na hodnoty 3,71, 1,73 a poslední má hodnotu 1. Původní záměr byl vyhodnocování jen dvou konstant, ale zde jsou všechny porovnávány metody velice rychle a spolehlivě.

Data byla vyčíslena ve 350 bodech, pro hodnoty x a y náhodně generované v rozsahu (0; 5). Aby se řešení přiblížilo reálnému problému, byl připočten šum s náhodným rozdělením, daným směrodatnou odchylkou 0,02.

3 Účelová funkce

Účelová funkce je definována jako míra přiblížení navrhovaného průběhu zadaným datům. V tomto případě byl použit nejběžnější [2] součet čtverců odchylek

$$F_j = \sum_{i=1}^n (G(x_i, y_i) - f_j(x_i, y_i))^2 = \sum_{i=1}^n (z_i - f_j(x_i, y_i))^2 \quad (2)$$

Protože se jedná o chybu, má program její hodnotu minimalizovat. Dalšími běžnými funkcemi jsou například součet absolutních hodnot odchylek, nebo tvarové podobnosti. Protože funkce obsahuje šum, nelze dosáhnout nulové hodnoty účelové funkce. Dosazením výše uvedených hodnot, použitých při generování, bylo zjištěno minimum 0,28.

4 Porovnávání metody a výsledky

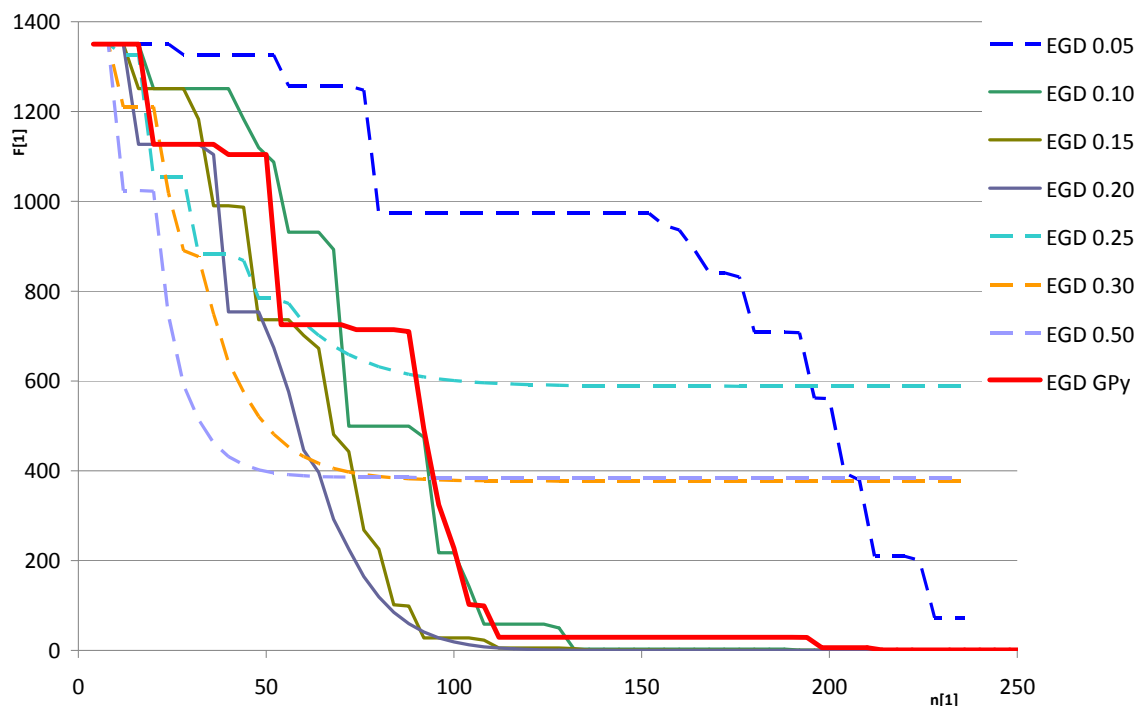
U jednotlivých metod jsou porovnávány současně přesnost a rychlost a výsledky jsou vynášeny do grafů. Jako míra přesnosti je vynášena hodnota účelové funkce. Bez vyčíslení koeficientů (program vygeneruje funkci se všemi koeficienty rovnými jedné) by hodnota účelové funkce při dosažení správné funkce (tj. bez šumu) byla přibližně 1349,8, takže dosažení hodnot blízkých jedné na grafu nelze rozlišit od nuly. Současně je takové řešení možné považovat za dostatečné, s ohledem na účel, pro který je symbolická regrese zpravidla použita.

Vodorovnou osu nemůže reprezentovat čas, protože konkrétní doba provádění záleží na kvalitě implementace a tedy i práci programátora. Vychází se proto z metodiky navržené [3], kdy se za měřítko rychlosti výpočtu považuje počet nutných vyčíslení účelové funkce. Vyčíslení účelové funkce je také zpravidla časově nejnáročnější částí všech algoritmů.

Protože většina metod při opakovaném startu dává rozdílné výsledky, byla každá metoda s každými koeficienty zopakována pětkrát a v grafu je zobrazen ten z průběhů, jehož dosažená výsledná hodnota účelové funkce je střední (medián).

4.1 Gradientní metody

Gradientní metody jsou velmi oblíbeným řešením. Typickou gradientní metodou je i Back Propagation, používaná u neuronových sítí. Gradientní metody pro předem navržené funkce (neuronové jednotky vyšších řádů) používá například [4]. Následující průběhy byly vygenerovány za použití exponenciované gradientní metody [5]. V programu je použit klesající krok algoritmu, což má umožnit nalézt přesnější řešení. Nevýhodou je, že pokud klesá příliš rychle, pak nemusí být celkový počet kroků dostatečný, aby bylo správné řešení opravdu dosaženo. Jednotlivá nastavení reprezentují různé hodnoty koeficientů učení, které jsou ovšem v daném případě přeneseny na klesající krok multiplikativní změny konstant ve směru gradientu pomocí funkce e^x . Program je nastaven tak, že v generované geometrické řadě má třetí krok právě hodnotu konstanty e . Podrobněji viz [6].

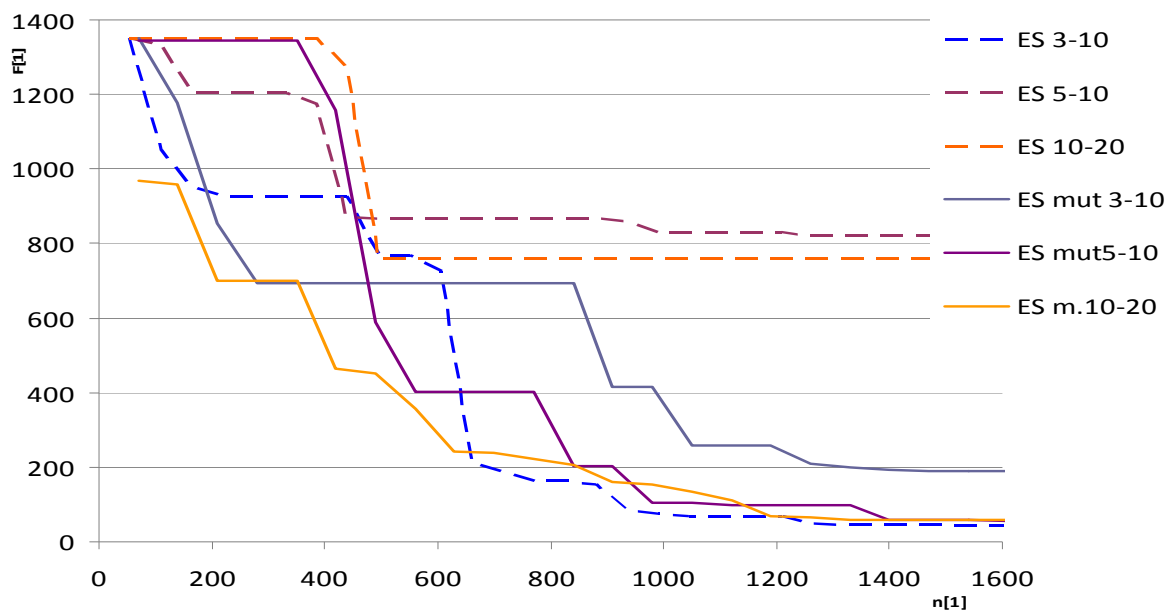


Obr. 1.: Exponencionovaná gradientní metoda. Hodnoty koeficientu učení od 0,10 do 0,20 dávají nejlepší výsledky. Speciální případ je označen GPY, kdy je koeficient učení 0,30, ale metoda je spouštěna vícekrát.

4.2 Evoluční strategie

Evoluční strategie lze podle [7] popsat pravidlem $ES(\mu/\rho, \lambda)$ nebo $ES(\mu/\rho+\lambda)$, kde μ znamená počet jedinců v základní populaci, ρ počet „rodičů“ pro jednotlivá křížení a λ počet generovaných potomků v cyklu. Evoluční strategie pracují s genomem tvořeným vektorem reálných čísel, který popisuje „polohu“ v n -rozměrném prostoru, jsou tedy zvláště vhodné pro řešení hledání kombinace reálných čísel. Pro každý cyklus se vždy λ -krát vybere náhodně ρ rodičů, z těch se vypočte aritmetický průměr, doplní se vhodný šum (realizace mutací) a výsledek se přidá do populace. Na konci cyklu se vybere μ nejlepších pro další cyklus. Ve variantě $ES(\mu/\rho, \lambda)$ se vybírá jen z nově vygenerovaných, ve variantě $ES(\mu/\rho+\lambda)$ i z předchozí generace. Druhá metoda nemůže ztratit již nalezená řešení, první by teoreticky mohla lépe hledat globální extrémy. V průběhu testování se ale nepodařilo metodu $ES(\mu/\rho, \lambda)$ uvést do stavu, kdy by se k řešení blížila, vždy divergovala. Následující grafy uvádějí jen $ES(\mu/\rho+\lambda)$, s různým počtem potomků i se zahrnutím mutací. Evoluční strategie pracují s populací. Počáteční populace je generována v zadaném rozsahu konstant náhodně. Pro všechny metody, kde se generují počáteční populace, byl zvolen interval hodnot $(-10; 10)$, a složky vektorů byly generovány náhodně. Gradientní metody pracují s jediným jedincem a zde použitá metoda vychází z přednastavených konstant, což je v tomto případě vektor jedniček.

U průběhů, kde je v označení mutace, byly výsledné nově generované vektory (jedinci, kombinace konstant) ihned náhodně násobením/podělením upraveny v rozsahu $\pm 20\%$. Tato úmyslná odchylka od průměrné hodnoty vypočtené z vybraných rodičů je základem algoritmu evolučních strategií. Existuje varianta algoritmu, kde dokonce $\mu=\rho$, tedy rodiči jsou všichni jedinci v populaci. Výhodou této varianty je, že v každém cyklu se spočítá průměr jen jednou a všichni jedinci následující generace jsou generováni za využitím mutací. Je zřejmé, že nemůže jít vždy o násobení, protože pokud se jednou průměrná hodnota rodičů v nějaké složce přiblíží nule, evoluce by se zastavila. Pro případ velkých čísel nemůže jít ani výhradně o sčítání. Spolehlivou aplikaci této varianty (konvergující alespoň občas k hledaným hodnotám) se nepodařilo pro danou funkci realizovat.



Obr. 2.: Evoluční strategie, první číslo udává počet rodičů při křížení, druhé velikost populace. Lepší výsledky jsou dosaženy, pokud je nově vygenerovaný jedinec ihned mutován náhodným zmenšením či zvětšením hodnot koeficientů v rozsahu $\pm 20\%$.

4.3 Genetické programování

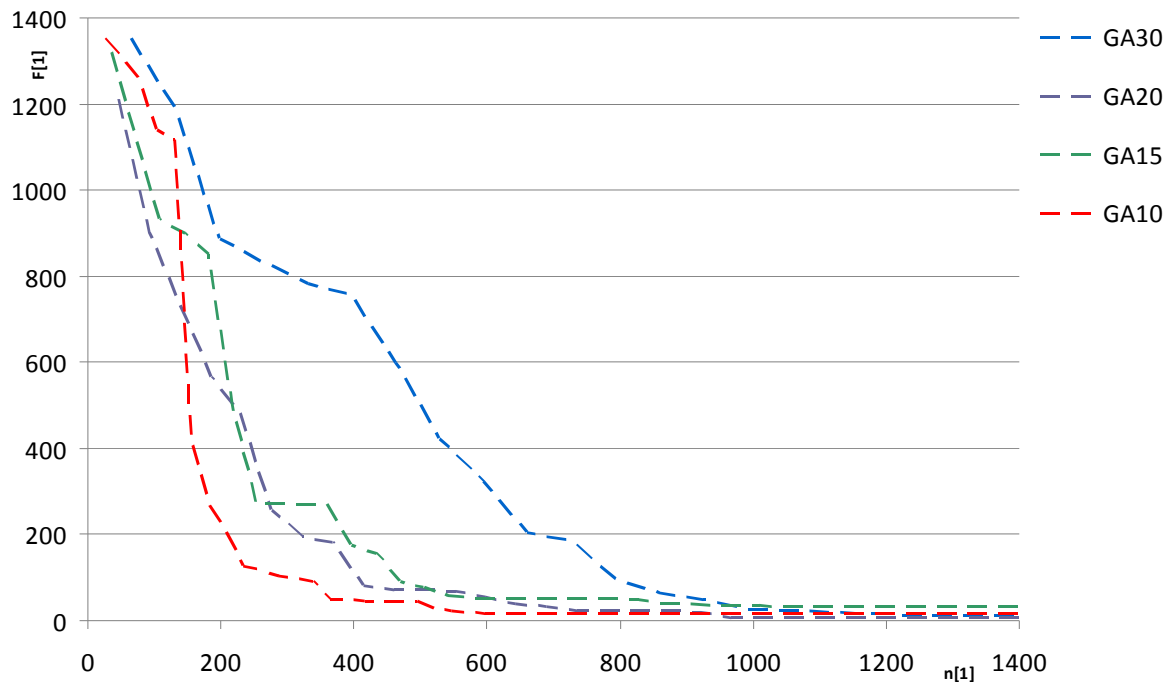
Genetické programování [8] může pracovat s genomem tvořeným přímo reálnými čísly. Pro vytváření potomků je pak používáno tzv. inteligentní křížení [9]. Postup je takový, že dva vybraní jedinci (rodiče) vyznačují v n -rozměrném prostoru úsečku, kde potomek se generuje na této úsečce. Jednotlivé souřadnice jsou dány vzorcem

$$c_i = ka_i + (k - 1)b_i \quad (3)$$

a , b jsou vektory rodičů a c získaný vektor potomka. Konstanta k je náhodně vygenerované číslo. Metoda konverguje k řešení za předpokladu, že k je generováno nejen okolo 0,5, ale na širším intervalu, nejlépe i mimo původní rodiče, například od $-0,3$ do $1,3$. To ale odpovídá představě křížení, kdy například při křížení dvou různě velkých psů budou štěňata velikostí nejspíše někde mezi, ale mohou být i větší nebo menší než rodiče.

Genetické programování podobně jako evoluční strategie má počáteční populaci a evoluční cykly. Navíc je zde uplatněna tzv. ruletová selekce, která navzdory svému jménu zajišťuje, že nejlepší jedinci jsou vybíráni s větší pravděpodobností, než ti horší. V každém cyklu (generaci) je vytvořen zvolený počet nových jedinců, pak jsou všichni jedinci seřazeni a velikost populace je smazáním nejhorších vrácena na původní velikost a cyklus se opakuje.

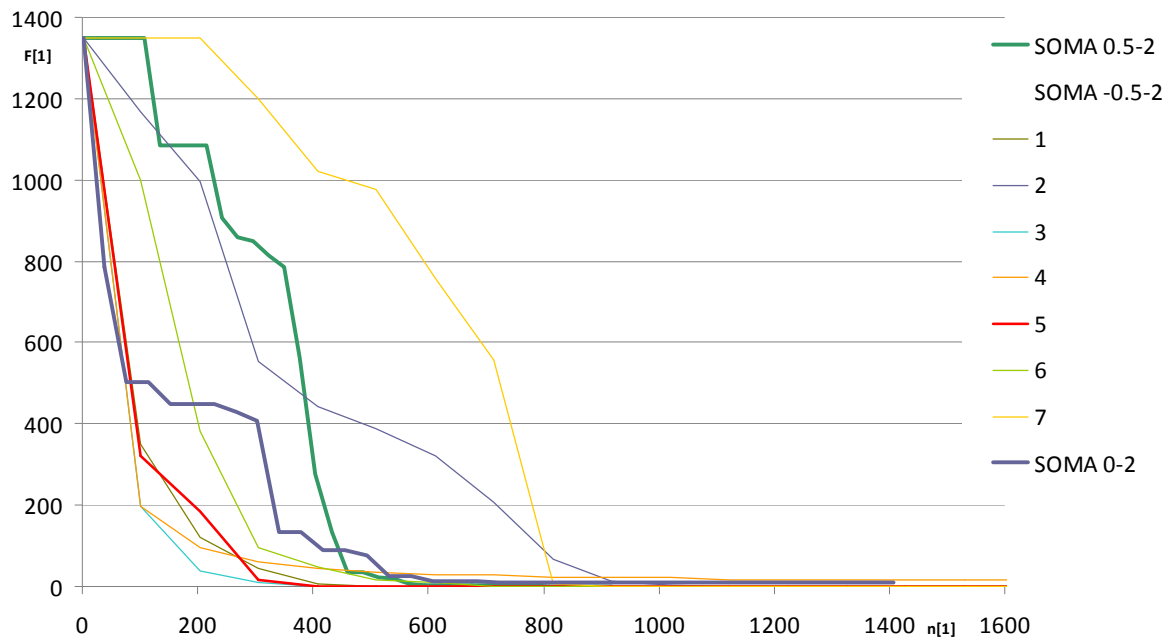
Mutace jsou v genetickém programování řešeny tak, že z populace je vybrán určený počet jedinců (nikdy není vybrán nejlepší jedinec) a u těchto jedinců je náhodně k jedné složce připočtena hodnota, vygenerovaná v rozsahu, v kterém se generovala počáteční populace, nebo je touto hodnotou složka vynásobena (pravděpodobnost obou variant je u vybraného jedince stejná). Jako další mutace může být aplikována náhodná záměna jedné složky vektoru mezi různými jedinci (vzhledem k použitému programu pro genetické programování není tato možnost v „malém“ evolučním cyklu genetických algoritmů aplikována, protože je považována za jednu z mutací ve „velkém“ cyklu genetického programování a aplikace umožňuje volání metody pro upřesňování konstant po každém cyklu genetického programování restartovat).



Obr. 3.: Výsledky získané genetickým programováním. 60 cyklů (nejsou zobrazeny celé), 5 mutací na cyklus, velikost populace je součástí názvu křivky, počet potomků je stejný, jako velikost populace. Je pravděpodobné, že pro malou populaci je třeba více cyklů než u větších populací, vodorovná osa vyznačuje počet vyčíslení účelové funkce a ten je menší. Teoreticky by u příliš malé populace mohlo docházet ke ztrátě diverzity a tím k nenalezení řešení; pokud je řešení nalezeno, je pro malé populace nalezeno rychleji.

4.4 Self-Organizing Migrating Algorithm (SOMA)

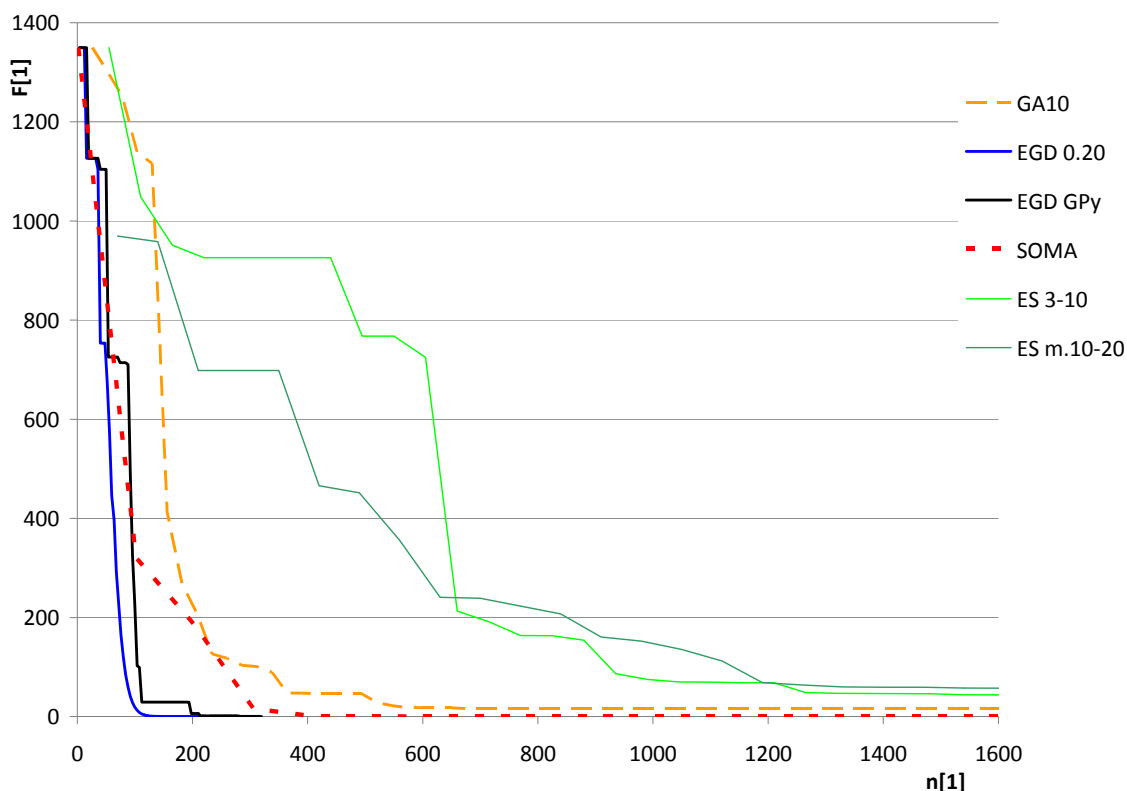
SOMA [10] je migrační algoritmus (patří mezi hejnové algoritmy). Používá počáteční populaci. Ve variantě, jak byl v tomto případě implementován, z ní vybere vždy čtyři jedince. Z nich podle účelové funkce vybere nejlepšího (toho ponechá) a ostatní posune ve směru k tomuto nejlepšímu (označen jako leader, vedoucí). Použije se vzorec pro inteligentní křížení, jen přesah ve směru „za“ nejlepšího je větší. Původní koncepce evokuje, že by se koeficient posunutí na této přímce vždy pohyboval nad délkou vzájemné vzdálenosti, tedy například od jedné do dvou. Následující grafy ukazují průběh evoluce (zde spíše migrace) pro různé hodnoty rozsahu k . Sedm průběhů a vyznačený medián (překrývá jeden z průběhů) označuje k generované pro každou čtveřici náhodně na intervalu $(-0,5; 2,2)$. Další dvě pak $(0; 2,2)$ a $(0,5; 2,2)$. Celková konvergence je lepší, jsou-li generovány i záporné hodnoty. Nutno podotknout, že v tomto případě nebyly aplikovány mutace.



Obr. 4.: SOMA. Čísla za názvem křivky označují rozsah generování konstanty k . Pro rozsah označený $(-0,5; 2)$ je tenkou čarou zobrazeno sedm jednotlivých spuštění a červeně (tlustší čára) je vyznačen medián, pro ostatní je zobrazen jen medián. Rozptyl hodnot je poměrně vysoký.

5 Závěr

V souhrnném grafu (obr. 5) jsou porovnány nejlepší reprezentanti jednotlivých metod. Gradientní metoda je podle předpokladů nejrychlejší. Překvapivě málo výpočtů účelové funkce potřebuje SOMA. Genetické algoritmy jsou podle předpokladů rychlejší, než evoluční strategie. Je to dáno zejména tím, že použitá ruletová selekce zvyhodňuje lepší řešení, aniž by horší zcela vyřazovala, zatímco u evolučních strategií je pravděpodobnost výběru každého z rodičů stejná, pokud zůstanou v dalším cyklu v populaci.



Obr. 5.: Souhrnné porovnání.

Literatura

- [1] Koza, J.R.: Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. Cambridge, MA, MIT Press, 1992. ISBN 978-0262111706.
- [2] Poli, R., Langdon, W.B., McPhee, N.F., Koza, J. R.: A Field Guide to Genetic Programming. Lulu.com, 2008.
- [3] Brandejsky, T.: Small populations in GPA-ES algorithm. In: Mendel 2013, pp. 31-36. ISBN: 978-802144755-4.
- [4] Gupta, M.M., I. Bukovsky, N. Homma, M. G. A. Solo, Z.-G. Hou: Fundamentals of Higher Order Neural Networks for Modeling and Simulation. Artificial Higher Order Neural Networks for Modeling and Simulation, pp. 103-133, ed. M. Zhang, IGI Global, 2012.
- [5] Kivinen, J., Warmuth, M. K.: Exponentiated gradient versus gradient descent for linear predictors. In: Information and Computation, 132(1):1-63, 1997. doi:10.1006/inco.1996.2612. Available on-line: Elsevier: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890540196926127>.
- [6] Hlaváč, V.: A program searching for a functional dependence using genetic programming with coefficient adjustment. In: SCSP Prague, 2016.
- [7] Hansen, N., D.V. Arnold and A. Auger: Evolution Strategies. In: Janusz Kacprzyk and Witold Pedrycz (Eds.): Handbook of Computational Intelligence, Springer, Chapter 44, pp.871-898 (2015) (pdf: <https://www.lri.fr/~hansen/es-overview-2015.pdf>).
- [8] Mitchell, Melanie: An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge, MA: MIT Press (1996). ISBN 9780585030944
- [9] T. Brandejsky: Evolutionary system to model structure and parameters regression. Neural Network World, 22 (2), pp. 181-194, 2012.
- [10] Zelinka I.: Analytic Programming by Means of Soma Algorithm. In: Proc. 8th International Conference on Soft Computing Mendel'02, Brno, Czech Republic, 2002, 93-101., ISBN 80-214-2135-5

ANALÝZA VYBRANÝCH KONŠTRUKČNÝCH ČASTI AKTUÁTORA DSM

Analysis of selected constructional points of actuator DSM

Lukáš Blaško, Petr Barón, Dušan Paulišin

Abstrakt: Cieľom tejto práce je poukázať na využitie vysokopresného aktuátora v praxi za konkrétne stanovených podmienok spoločnosťou SPINEA Technologies, s.r.o. Definovanie použiteľnosti je vykonané pri aplikácii metódy statickej analýzy a výpočtov v softvérovom programe. Prioritne je práca zameraná na namáhanie telesa pripojeného k ložiskovému reduktoru prostredníctvom skrutkového spoja za účinku radiálnych síl, axiálnych síl a krútiaceho momentu. Jednotlivé namáhania a ich výsledky sú popísané v závere práce, ktorý jednoznačne určuje konkrétne charakteristiky pre návrh a dimenzovanie aktuátora.

Key words: Aktuátor, reduktor, konštrukčné riešenie, analýza.

1. Úvod

Bezpodmienečným cieľom je neustále zlepšovanie a zvyšovanie kvality produktov vo svete. Súčasným trendom je vývoj aktuátorov s priechodzou dierou a aktuátorov na modulárnej báze, ktoré zabezpečujú všestrannejšie využitie bez prídavného zariadenia v praxi. Tento článok je zameraný na nový typ DSM aktuátora vzhľadom na požiadavky obchodného úseku spoločnosti SPINEA Technologies, s.r.o.

Účelom práce bolo oboznámenie sa s charakteristikou vysokopresných aktuátorov a možnosťami analýz, prostredníctvom ktorých boli vykonávané experimenty. Metódy použité v tomto článku boli zamerané na statickú analýzu napätia a deformácie v programe ANSYS. Jedná sa o namáhanie aktuátora vonkajšími radiálnymi a axiálnymi silami, ako aj krútiacim momentom. Teda analýzy sa zaoberali namáhaním na tlak, krut a ohyb. Vhodnosť DSM aktuátora pre realizáciu v praxi sa porovnávali dosiahnuté výsledky s danými hodnotami, ktoré boli poskytnuté spomínanou spoločnosťou.

2. Charakteristika aktuátora DriveSpin

Je to spojenie vysokopresného TwinSpin reduktora s vynikajúcimi mechanickými vlastnosťami a AC servomotorom v kompaktnom prevedení. Vynikajúce parametre sú garantované viac ako 20-ročnými skúsenosťami s výrobou reduktorov spoločnosťou SPINEA, s.r.o. Aktuátory sa vyznačujú vysokou presnosťou, vysokou klopňou a torznou tuhosťou, nízkymi vibráciami, malými zastavbovými rozmermi, nízkou hmotnosťou, vysokou životnosťou, jednoduchou inštaláciou. [3][4]

2.1. DriveSpin Modular

Stavebnicové rotačné polohovacie moduly DSM zabezpečujú riadený otočný pohyb a prenos krútiaceho momentu s vysokou presnosťou polohovania. Výstupná prírubka modulu umožňuje zachytávať radiálne aj axiálne sily. Moduly sa vyznačujú špeciálnou konštrukciou telesa, ktorá umožňuje univerzálne pripojenia aj bez prídavných zariadení. Dobrá zabudovateľnosť do konštrukcie a malé rozmery umožňujú z modulov DSM vytvárať kinematické zostavy pre technologické hlavice, ale aj prídavné zariadenia a polohovadlá. Výber veľkosti modulu závisí od požadovanej nosnosti a počtu stupňov voľnosti pohybovej osi. [4]

3. Analýza napätia a deformácie v telese DSM 070

Vzhľadom na požiadavky spoločnosti SPINEA Technologies s.r.o., boli experimenty zamerané na statickú analýzu napätia a deformácie v programe ANSYS. Pre vstup do analýz boli poskytnuté dáta zo strany spomínanej spoločnosti. Analýza sa zameriava na DSM modul vo veľkostnej rade 070. Pod DSM (stavebnicový rotačný polohovací modul) sa rozumie autonómny, funkčne a konštrukčne samostatný modul pre rotačné polohovacie osi pohybových mechanizmov s určenou integráciou funkcií, určenou inteligenciou, so schopnosťou mechanického a riadiaceho spájania sa s inými mechanickými modulmi do funkčne vyšších strojových systémov. [8]

Vzhľadom na minimálnu hrúbku steny telesa, ktorá sa rovná hodnote 4,5 mm bol zvolený dutý profil hliníkovej zliatiny EN AW-6082 [Al Si1MgMn] v tepelnom spracovaní T6, ktorého minimálna medza klzu $R_{p0,2}$ sa rovná 250 MPa (pozri Tab. 1). Táto hodnota bola východným parametrom pre porovnávanie výsledkov z analýz. Pre analýzu napätia a deformácie na teleso aktuátora bol použitý extrudovaný profil z vyššie uvedeného materiálu s ohľadom na svoje chemické a fyzikálne vlastnosti a s výhodami oproti iným materiálom (ako napríklad oceľ). Je ľahký, pevný, nekorodujúci, má možnosť vyrobiteľnosti zlúčením s lepšími vlastnosťami a využíva sa v širokom spektre priemyselných odvetví. Zároveň je pomerne stály, tvárny, kujný, má dobrú pevnosť v ťahu a dobrú elektrickú aj tepelnú vodivosť. [2]

Tab. 1. Technické údaje zliatiny EN AW-6082 [Al Si1MgMn] [6]

Extrudovaný profil								
Tepelné spracovanie	Hrúbka steny	R_m MPa		$R_{p0,2}$ MPa		A %	A_{50} %	Tvrdosť Typická hodnota HBW
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Min.	
Dutý profil T6	<5	290	-	250	-	8	6	95

V programe ANSYS sa vykonala analýza na namáhanie vonkajšími silami – radiálna sila, axiálna sila a krútiaci moment. Výsledky analýz boli vyhodnotené a určil sa vhodnosť telesa vzhľadom na jeho vysokú presnosť polohovania. Počas namáhania vonkajšími silami mohlo dôjsť k vysokým tlakom a následnej čiastočnej alebo totálnej deformácii telesa, ktorá by viedla k odchýleniu v stotínach milimetrov. V prípade nevyhovujúcich výsledkov bolo potrebné upraviť konštrukciu telesa v rámci rozmerov a to buď zosilnením slabých plôch zmenou návrhu telesa a zväčšením hrúbky materiálu na slabé plochy, alebo zmenou rozloženia dier a otvorov aktuátora, čo by zabezpečilo namáhanie na tenkých plochách.

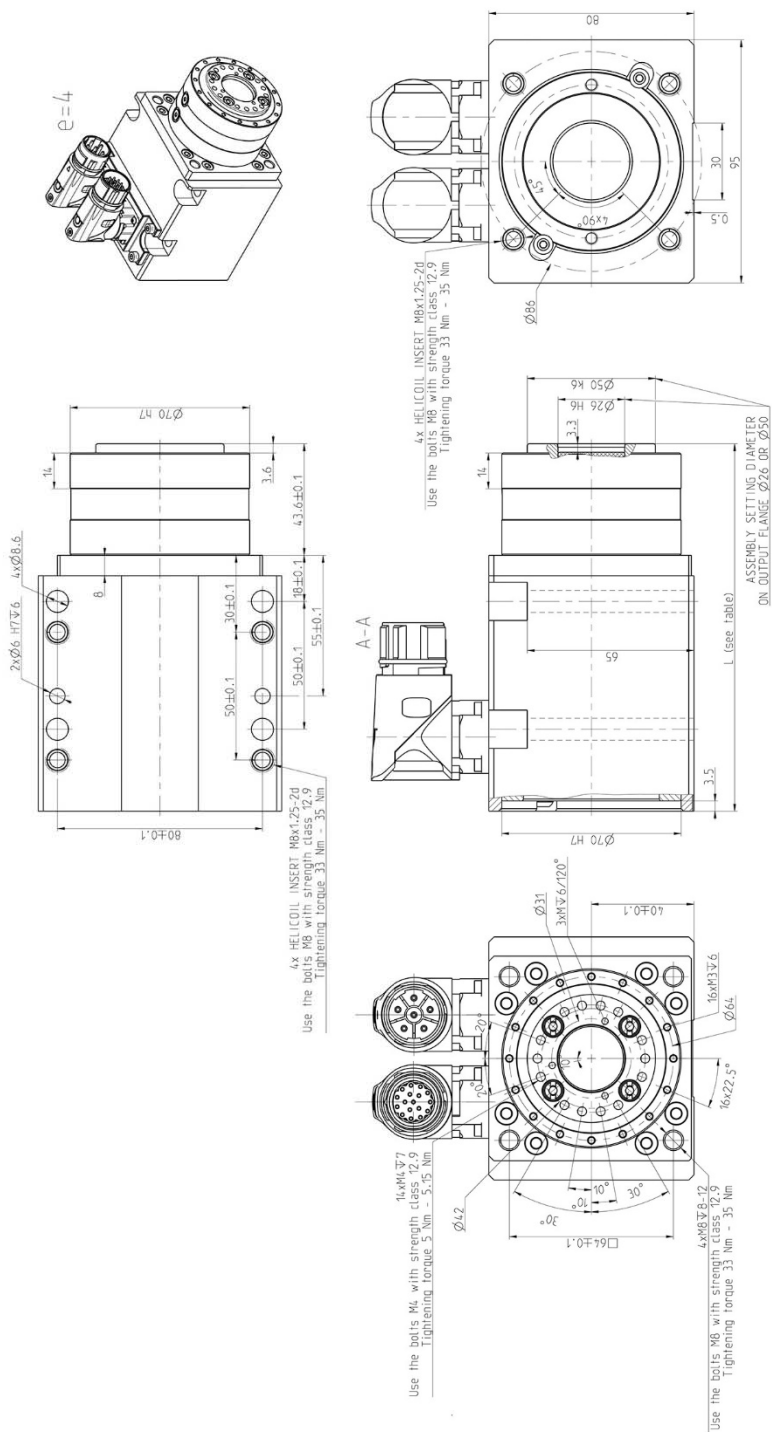
Výsledky boli porovnávané s medzou klzu vybraného materiálu. Vo fáze meraní pôsobili všetky sily na aktuátor naraz. Týmto experimentom sa ukázalo, či pôsobením všetkých síl môžu nastať vysoké deformácie spôsobené tlakom, prekročenie medze klzu, alebo totálna deformácia s výchylkou.

3.1. Analýza vstupných údajov

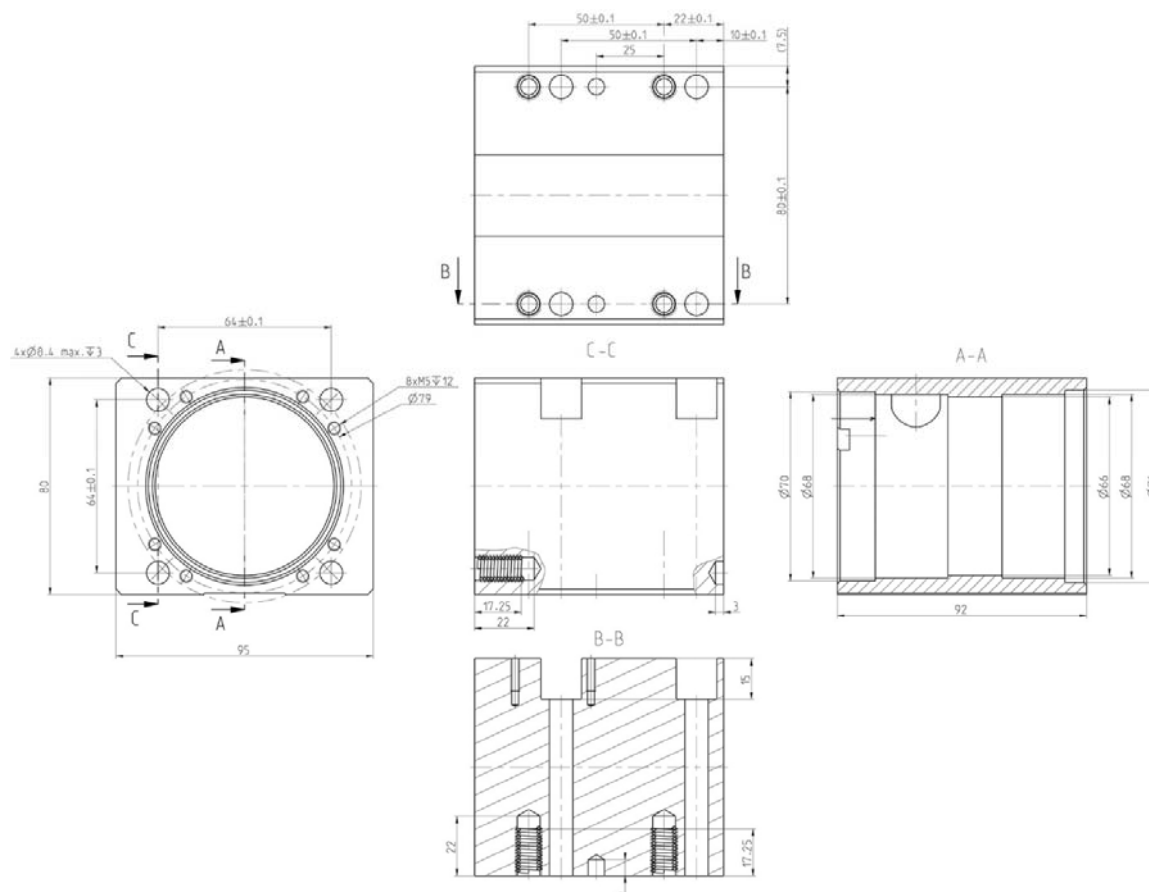
Koncepcia a vývoj novej rady DSM sa výkonovo a parametricky viaže na typovú radu DSM modulu z produkcie SPINEA Technologies, s.r.o.

Tab. 2. Technické údaje aktuátora DriveSpin DSM 070 [6]

	Označenie	Jednotky	DSM 070
Max. rozmer príruby telesa DSM modulu	$b \times b$	[mm]	80x95
Max. rozmer telesa prevodovky	A (a x a)	[mm]	70
Dĺžka modulu	L	[mm]	153,6
Maximálny výstupný krútiaci moment	T_R	[Nm]	100
Maximálny klopný moment ($\alpha=0$)	$M_{c \max}$	[Nm]	142
Dovolená axiálna sila	$F_{a \max}$	[kN]	3,7
Dovolená radiálna sila	$F_{R \max}$	[kN]	2,6



Obr. 1 Výkres zostavy modulu DSM 070 s uvedenými základnými rozmermi pre výpočet [7]



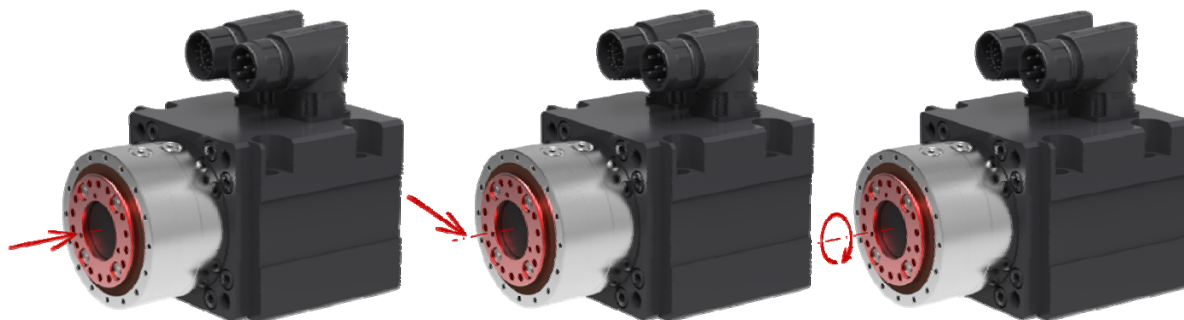
Obr. 2 Výkres základných rozmerov telesa pre modulu DSM 070 [7]

3.2. Analýza napätia a deformácie v telese DSM 070

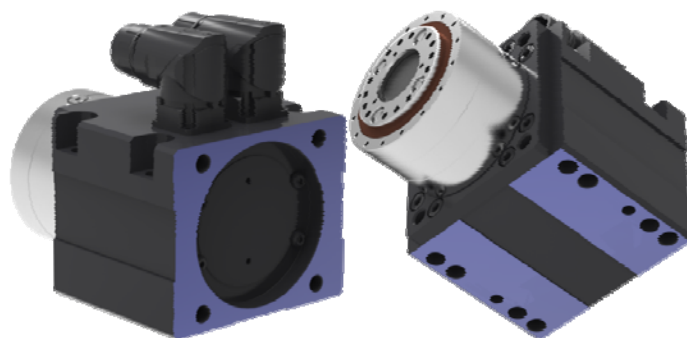
Analýza napätia a deformácie bola realizovaná v programe ANSYS. Jednalo sa o analýzu maximálneho napätia (von Mises), ktorá je založená na teórii von Mises-Hencky, známej ako teória šmykovej energie alebo teória maximálneho skreslenia [1][5]. Z vypočítaného maximálneho napätia a dovoleného napätia materiálu sa vypočítal koeficient bezpečnosti, ktorý sa musel rovnať minimálnej hodnote 3.

$$k = \frac{\sigma_{medzklzu}}{\sigma_{vonMises}} \quad (1)[5]$$

Analýza deformácie sa vykonávala na základe simulácie totálnej deformácie, kde výsledná maximálna hodnota v mm musela byť menšia ako stanovená hodnota 20 μm (0,02 mm), ktorá bola zadaná ako požiadavka od obchodného úseku, vzhľadom na nasadenie modulu DSM do výrobných CNC strojov a zariadení. Analýza bola vykonaná s rôznymi uchyteniami telesa a s rôznym pôsobením vonkajších síl na teleso. Na teleso pôsobili tri sily a to axiálna sila $F = 3,7\text{kN}$ na prednú časť telesa, radiálna sila $F = 2,6\text{kN}$ a krútiaci moment $M_k = 100\text{ Nm}$. (Obr. 3) Všetky tieto pôsobenia síl boli simulované s rôznymi uchyteniami telesa. Prvá bola uchytená zadná časť telesa a bola vykonaná analýza a následne bolo upevnené teleso za jeho spodnú časť (Obr. 4).



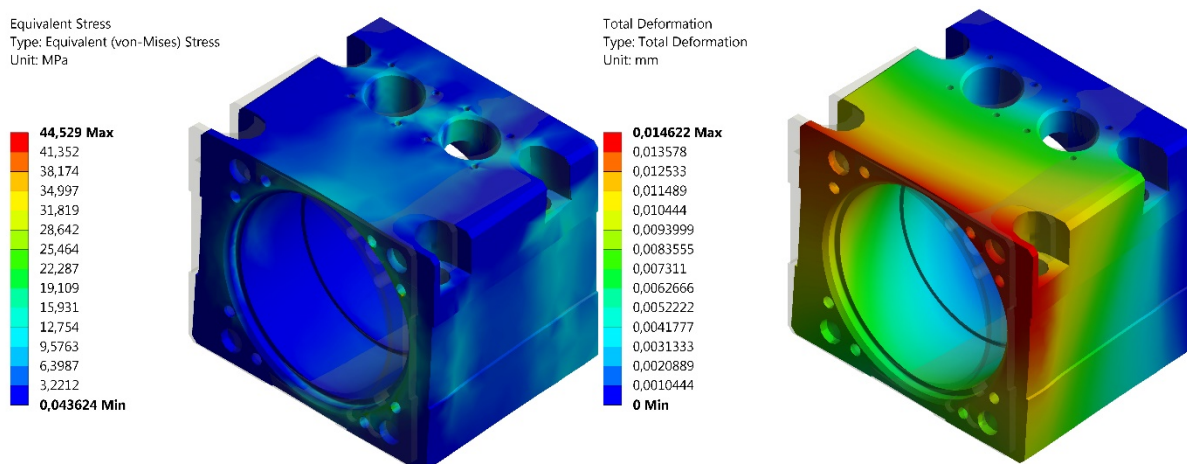
Obr. 3 Pôsobenie axiálnej sily (vľavo), radiálnej sily (v strede) a krútiaceho momentu (vpravo) na prevodovku aktuátora DSM 070



Obr. 4 Spôsoby uchytenia aktuátora DSM 070. Uchytenie za zadnú časť (vľavo) a za spodnú časť (vpravo) aktuátora

Zaťaženie telesa pri pôsobení všetkých síl a uchytení za zadnú časť telesa

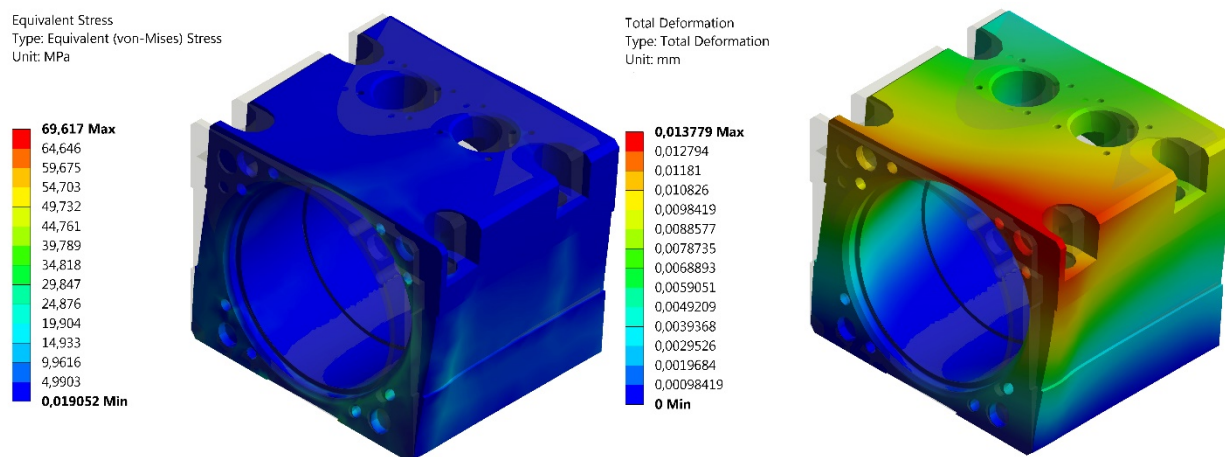
Teleso je zaťažované všetkými silami t.j. axiálnou silou, radiálnou silou a krútiacim momentom (Obr. 3) a jeho ukotvenie je za zadnú časť (Obr. 4). Hodnota napätia je zobrazená na Obr. 5 (vľavo), kde má maximálne napätia hodnotu 44,529 MPa. Hodnota dovoleného napätia pre materiál podľa EN AW 6082 má hodnotu 250 MPa. Koeficient bezpečnosti má hodnotu 5. Porovnanie zisteného a dovoleného napätia ($44,529 \text{ MPa} \leq 250 \text{ MPa}$) potvrdzuje, že navrhovaný materiál pri maximálnom pôsobení síl vyhovuje. Hodnota deformácie pri zaťažení všetkými silami na teleso (ukotvenie na zadnej časti) je zobrazená na Obr. 5 (vpravo), kde maximálna deformácia je 0,0146 mm. Na základe predpokladaného nasadenia modulu do výrobných CNC strojov a zariadení je hodnota deformácie vyhovujúca.



Obr. 5 Zobrazenie výsledného napätia všetkými silami na teleso (vľavo) a výsledná deformácia na teleso (vpravo) pri uchytení za zadnú časť telesa

Zaťaženie telesa pri pôsobení všetkých síl a uchytení za spodnú časť telesa

Teleso je zaťažované všetkými silami, t.j. axiálnou silou, radiálnou silou a krútiacim momentom Obr. 3 a jeho ukotvenie je za spodnú časť Obr. 4. Hodnota napätia je zobrazená na Obr. 6 (vľavo), kde má maximálne napätie hodnotu 69,617 MPa. Hodnota dovoleného napätia pre materiál podľa EN AW 6082 má hodnotu 250 MPa. Koeficient bezpečnosti má hodnotu 3. Porovnanie zisteného a dovoleného napätia ($69,617 \text{ MPa} \leq 250 \text{ MPa}$) potvrdzuje, že navrhovaný materiál pri maximálnom pôsobení síl vyhovuje. Hodnota deformácie pri zaťažení všetkými silami na teleso (ukotvenie na spodnej časti) je zobrazená na Obr. 6 (vpravo), kde maximálna deformácia je 0,0137 mm. Na základe predpokladaného nasadenia modulu do výrobných CNC strojov a zariadení je hodnota deformácie vyhovujúca.



Obr. 6 Zobrazenie výsledného napätia všetkými silami na teleso (vľavo) a výsledná deformácia na teleso (vpravo) pri uchytení za spodnú časť telesa

4. Záver

Podstatou článku bolo overenie hliníkovej zliatiny ako možnej deformovateľnej zložky telesa, pôsobením radiálnych a axiálnych síl súbežne s krútiacim momentom. Overovanie stavu a situácie počas experimentu bolo vykonávané prostredníctvom analýzy v programe ANSYS, ktorej výsledky sú určené v kapitole 3.2.

Pre ďalšiu možnú realizáciu experimentov by bolo najvhodnejšie simulovať dané analýzy pri dynamickom zaťažení, kde by boli dosiahnuté detailnejšie reálne podmienky, ktorými by bolo teleso namáhané v praxi. Keďže sa jedná o podrobné skúmanie tejto problematiky, je potrebné zabezpečiť na realizáciu dostatok časového horizontu.

Literatúra

- [1] SHRIVASTAVA, Suresh; GHOSH, Chiradeep; JONAS, John J. A comparison of the von Mises and Hencky equivalent strains for use in simple shear experiments. *Philosophical Magazine*, 2012, 92.7: 779-786.
- [2] Slovenský ústav technickej normalizácie: Hliník a zliatiny hliníka, odliatky, chemické zloženie a mechanické vlastnosti, Bratislava 2010,
- [3] ACTUATORS [online]. [s.a.]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné na internete: <<http://www.spinea.com/products/drivespin/>>

- [4] DRIVESPIN [online]. [s.a.]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné na internete:
<<http://www.spinea.com/downloads/catalogues/DS/>>
- [5] Maximální napětí von Mises [online]. [s.a.]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné na internete:
http://help.solidworks.com/2011/Czech/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Checking_stresses/prot_vonm.html
- [6] Interné zdroje SPINEA Technologies, s.r.o.: Technické údaje aktuátorov DriveSpin.
- [7] Interné zdroje SPINEA Technologies, s.r.o.: Výkresová dokumentácia aktuátorov DSM rady 070.
- [8] Interné zdroje SPINEA Technologies, s.r.o.: Aktuátory DriveSpin, produktová rada 070.
- [9] STN EN 755-2:2016, Hliník a zliatiny hliníka. Lisované tyče, rúry a profily. Časť 2: Mechanické vlastnosti.

IDENTIFIKÁCIA DYNAMIKY RAMENA MANIPULÁTORA S PNEUMATICKÝMI UMELÝMI SVALMI S VYUŽITÍM NEURÓNOVÝCH SIETI A UČIACICH ALGORITMOV V PROGRAME PYTHON

Identification of dynamics of the manipulator arm with pneumatic artificial muscles with use neural networks and learning algorithms in program Python

Monika Trojanová, Alexander Hošovský, Ivo Bukovský

Abstrakt: Článok sa venuje identifikácii ramena manipulátora s dvoma stupňami voľnosti poháňaného pneumatickými umelými svalmi. Namerané dáta použité v procese identifikácie boli podrobené korelačnej analýze. Pre identifikáciu bola zvolená MLP sieť (Multi-Layer Perceptron Network) a LNU (Linear Neural Unit) s využitím učiaceho algoritmu Levenberg-Marquardt (LM). Program Python slúžil ako nástroj pre vytvorenie dynamických modelov, predikciu dát a grafickú interpretáciu výsledkov.

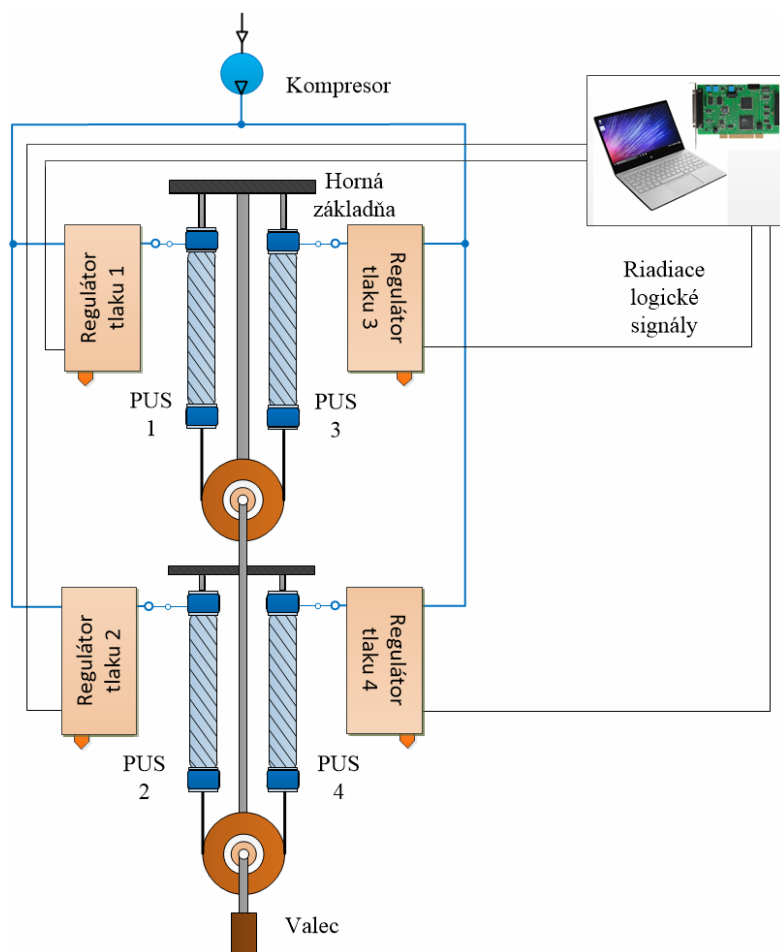
Kľúčové slová: identifikácia, umelý sval, MLP sieť, lineárna neurónová jednotka LNU, algoritmus učenia Levenberg-Marquardt, korelačná analýza

1. Úvod

V súčasnosti je automatizácia výrobného procesu bežným javom, ktorý má zabezpečiť vyššiu optimalizáciu výroby, produktivitu a v neposlednom rade konkurencieschopnosť. Manipulácia ako jedna z nevyhnutných činností podieľajúcich sa na procese výroby využíva mnohé manipulačné zariadenia, ktoré sú už v dnešnej dobe pomerne vysoko presné a taktiež výkonné. Napriek tomu sa zatiaľ nedokážu vyrovnat' flexibilitu ľudskej ruky ako manipulačného nástroja. Skúmané rameno manipulátora poháňaného pneumatickými svalmi tak poskytuje pohľad na síce atypický spôsob využitia umelých svalov v oblasti manipulácie, no s výhľadom do budúcnosti. Cieľom vývoja v danej oblasti je dosiahnuť čo najvyššiu presnosť pri manipulácii. Problém však nastáva pri narastajúcich nárokoch na riadenie, kde je potrebné čoraz viac riešiť problematiku prítomnosti nežiaducich javov. Pre vyššiu kvalitu riadenia je nevyhnutná správna identifikácia systému. [1],[2]

2. Popis systému ramena manipulátora s pneumatickými umelými svalmi

Systém, ktorý bol skúmaný je planárne robotické rameno poháňané pneumatickými umelými svalmi. Princiálna schéma zapojenia systému pre daný experiment je zobrazená na Obr. 1. Rameno manipulátora je uchytené o hornú základňu a disponuje dvoma rotačnými kĺbmi, ktoré mu tak poskytujú dva stupne voľnosti. Pohon rotačných kĺbov je zabezpečený pomocou pneumatických umelých svalov (PUS) od výrobcu FESTO typu MAS-20 – jednému kĺbu prislúcha pár svalov. Do svalov bolo kompresorom privádzané médium – stlačený vzduch, ktorý bol regulovaný pomocou elektronického regulátora tlaku (ERT) MATRIX EPR50. Každý sval mal vlastný regulátor tlaku, ktorého úlohou bolo zabezpečiť presné nastavenie tlaku vo svale. Tlak vo svaloch bol meraný pomocou snímača tlaku zabudovaného v regulátore tlaku. Prenos krútiaceho momentu, ktorý vyvíjajú PUS bol zabezpečený pomocou mechanizmu reťaz – reťazové koleso. Celý systém pozostáva z dvoch ramien, pričom na spodnom ramene manipulátora je uchytený valec, ktorý predstavuje záťaž s určitou hmotnosťou a momentom zotrvačnosti. Práve uhol natočenia kĺbu, ku ktorému je valec pripojený je sledovanou veličinou. Na meranie uhla kĺbu bol použitý typ snímača Kubler 3610 (inkrementálny snímač), ktorého rozlíšenie je 2500 impulzov/otáčku. Signály boli spracovávané pomocou I/O PCI karty Humusoft MF624 a rameno bolo riadené pomocou programu Matlab/Simulink.

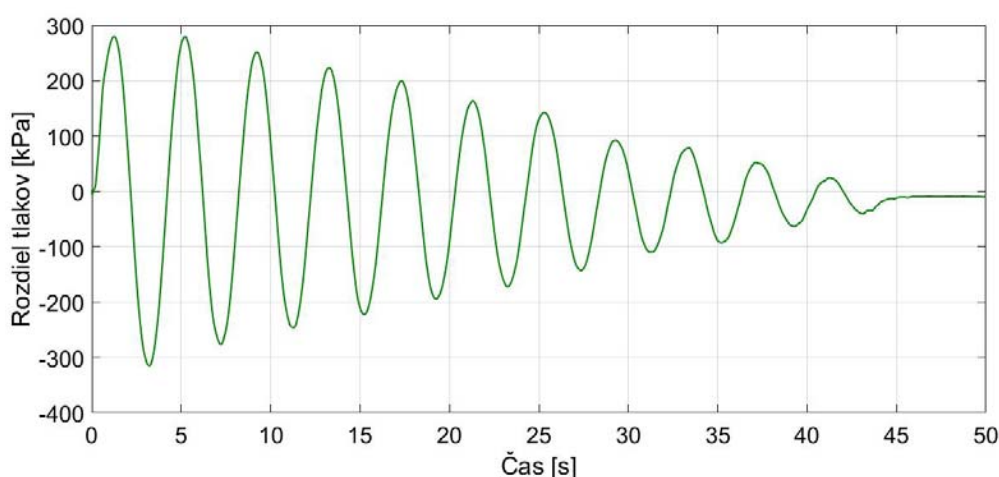


Obr. 1 Princiálna schéma ramena manipulátora poháňaného pneumatickými umelými svalmi

2.1. Trénovacie a testovacie dáta

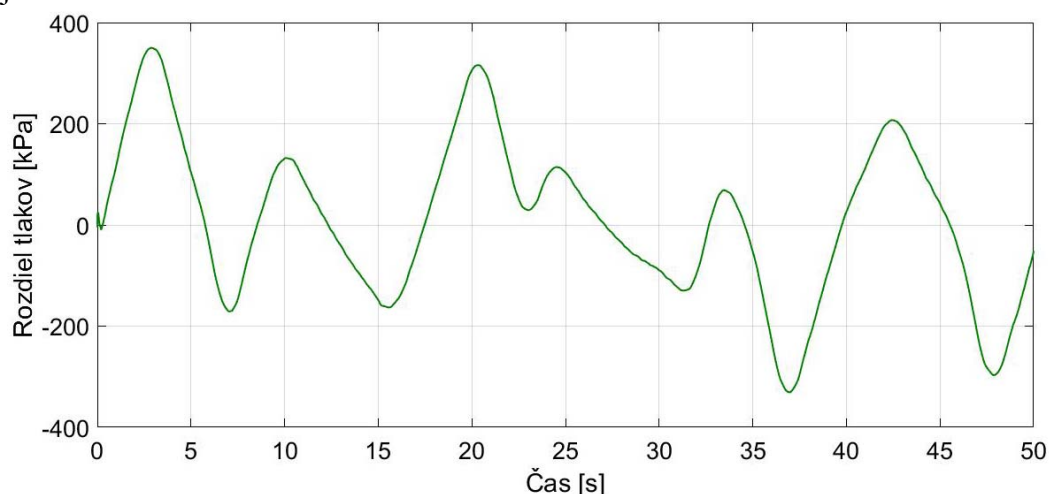
Dáta použité pre trénováciu a testováciu časť jednotlivých neurónových modelov boli získané meraním. Vstupnou meranou veličinou bol rozdiel tlakov vo svaloch Δp priamo závislý od zmeny vstupného napätia. Výstupnou veličinou bol uhol natočenia kĺbu θ . Dáta získané z merania sa týkali len jednej z osí manipulátora, nakoľko pri uvažovaní oboch osí by došlo k skresľovaniu informácií v dôsledku pôsobenia dynamických väzieb. V rámci celého merania bolo získaných 16 667 vzoriek so vzorkovacou periódou 3 ms, ktoré boli čiastočne upravené.

Časový priebeh rozdielu tlakov trénovacích dát (pozri Obr. 2) má klesajúcu tendenciu v dôsledku použitia trojuholníkového budiaceho signálu s lineárne klesajúcou amplitúdou. Svaly boli spočiatku natlakované na hodnotu rozdielu tlakov približne 300 kPa a následne bol jeden zo svalov napúšťaný a druhý vypúšťaný.



Obr. 2 Časová závislosť rozdielu tlakov dát použitých pre učiacu fázu

Dáta, ktoré boli použité pre testovanie boli generované pri náhodnej amplitúde budiaceho signálu. Krivka časového priebehu rozdielu tlakov (Obr. 3) má preto náhodne vyvíjajúci sa charakter.



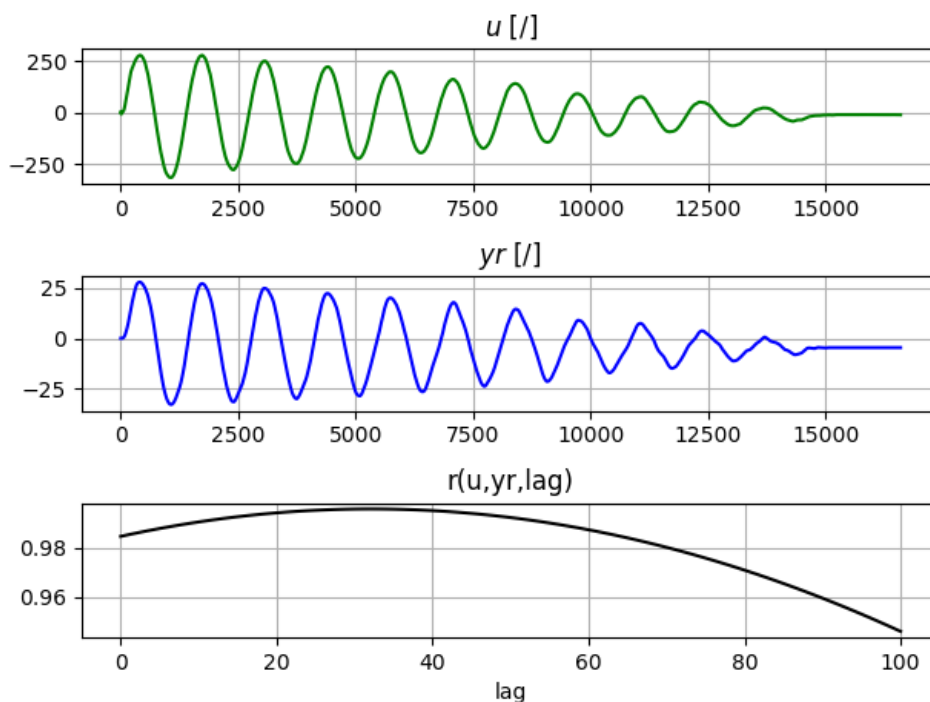
Obr. 3 Časová závislosť rozdielu tlakov dát použitých pre testováciu fázu

2.2. Korelačná analýza nameraných dát

Korelačná analýza ako metóda využívaná na vyjadrenie štatistickej závislosti medzi kvantitatívnymi premennými bola použitá pre zanalyzovanie nameraných dát určených pre učiacu fázu. Pomocou analýzy malo byť overené, či prvotne zvolené prevzorkovanie tréningových dát (frekvencia vzorkovania rovná 20) bolo zvolené vhodne. Pre výpočet korelačného koeficientu r bola použitá nasledujúca rovnica 1, ktorá bola doplnená o *lag*. Lag vyjadruje odhad časového posunu medzi x a y . Hodnoty x predstavovali vstupné namerané dáta (rozdiel tlakov Δp) a hodnoty y výstupné dáta (uhol natočenia kĺbu θ). [3]

$$r(x, y, \text{lag}) = \frac{1}{N} \sum_k \frac{(x_{k-\text{lag}} - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

Na Obr. 4 možno vidieť priebeh korelačného koeficientu (čierna krivka) neprevzorkovaných tréningových dát (zelená a modrá krivka). Z analýzy vyplýva, že v rozsahu časového posunu 20-40 jednotiek vzniká takmer čistá lineárna závislosť výstupných dát yr (resp. y) od vstupných dát u (resp. x), keďže hodnota korelačného koeficientu sa pohybuje v okolí hodnoty jeden. Pôvodné prevzorkovanie tak nebolo pre predikciu zvolené vhodne. Na základe zisteného bolo vhodnejšie pracovať s neprevzorkovanými dátami. Podľa analýzy by pre ďalší výskum vyhovovalo i prevzorkovanie s časovým posunom väčším ako 40, no pre učenie a testovanie by menší počet dát spôsoboval nepresnosť v učení a horšie výsledky pri testovaní.



Obr. 4 Korelačný koeficient neprevzorkovaných dát

3. Použité modely a algoritmy učenia pre experimentálnu časť

Pre identifikáciu ramena manipulátora boli použité dva modely neurónových sietí. Jedným z nich je lineárna neurónová jednotka, ktorý spadá pod koncepciu nekonvenčných neurónových jednotiek HONU. [4] Druhým zvoleným modelom je MLP sieť s jednou skrytou vrstvou. Ako algoritmus, ktorý mal byť implementovaný v učiacej fáze bol zvolený Levenberg-Marquardt. Základné matematické princípy, ktoré boli predpokladom pre zostavenie modelov sú uvedené v nasledujúcich častiach.

3.1. Levenberg-Marquardt

Levenberg-Marquardt je učiacim algoritmom, ktorý je obdobou Newtonovej metódy. Aplikáciou daného algoritmu dochádza k minimalizácii funkcie a výsledkom je číselné riešenie. Váhy neurónu, ktoré vyjadrujú jeho citlivosť sú aktualizované súčasne. Podstata metódy spočíva v stanovení Jacobianu J , ktorý sa určí na základe rovnice 2. Po výpočte Jacobianu J dôjde k výpočtu zmeny váh Δw (rovnica 3) a váhy sa následne aktualizujú. [4]

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_n(k=0)}{\partial w_0} & \dots & \frac{\partial f_n(k=0)}{\partial w_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n(k=N)}{\partial w_0} & \dots & \frac{\partial f_n(k=N)}{\partial w_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\Delta w^T = \left(J^T \cdot J + \frac{1}{\mu} \cdot L \right)^{-1} \cdot J^T \cdot e \quad (3)$$

3.2. HONU-LNU

Lineárna neurónová jednotka predstavuje taký model neurónu y_n , ktorého snahou je identifikovať lineárnu závislosť medzi vstupnými dátami u_i a výstupnými reálnymi dátami y_r . Rovnice 4 a 5 vyjadrujú matematickú formuláciu hľadaného neurónového modelu, kde w je vektor váh, w_i sú jednotlivé neurónové váhy, u je vstupný vektor neurónu, u_i sú jednotlivé vstupy a k predstavuje index času. Mieru, v akej nájdený model interpretuje reálne výstupné dáta vyjadruje chyba neurónu e , ktorá je daná rozdielom medzi reálnymi výstupnými hodnotami a nájdenými hodnotami modelu (rovnica 6). [4],[5]

$$y_n(k) = \sum_{i=0}^n w_i \cdot u_i(k) = w \cdot u(k) \quad (4)$$

$$y_n(k) = [w_0 w_1 \dots w_n] \cdot \begin{bmatrix} u_0 \\ \vdots \\ u_n(k) \end{bmatrix} = w_0 \cdot u_0(k) + w_1 \cdot u_1(k) + \dots + w_n \cdot u_n(k) \quad (5)$$

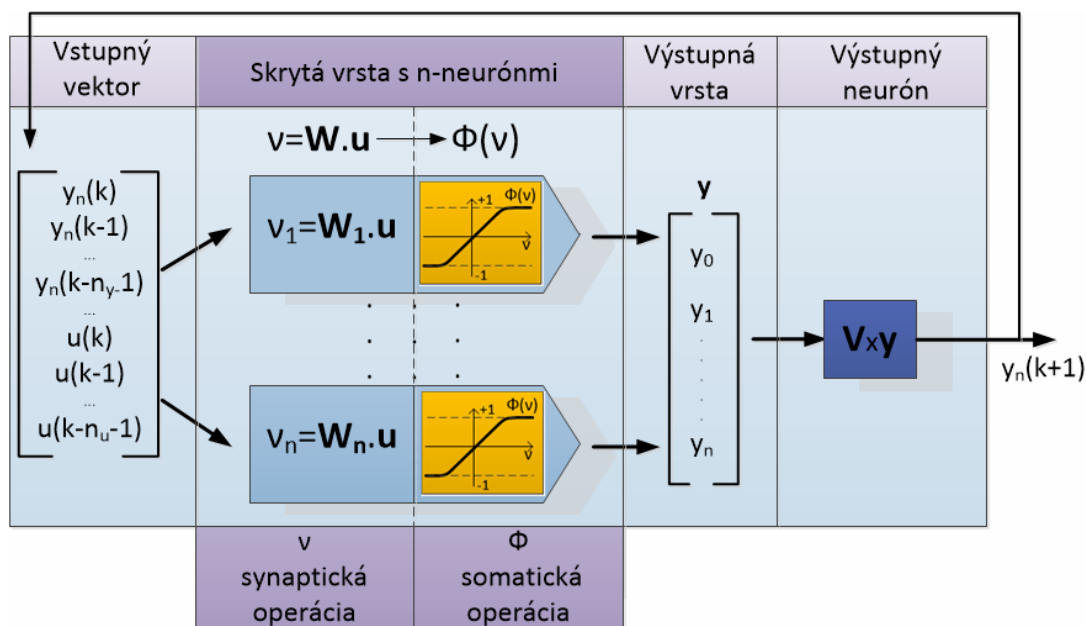
$$e(k) = y_r(k) - y_n(k) \quad (6)$$

3.3. MLP

Viacvrstvová perceptrónová sieť je veľmi známou doprednou architektúrou neurónovej siete. Základným stavebným kameňom tohto druhu siete je neurón nazývaný perceptrón. Na Obr. 5 je znázornená schéma dynamickej MLP siete s jednou skrytou vrstvou. Sieť obsahuje vstupné dáta dvojakého druhu. Prvými sú dáta u , ktoré môžu byť získané napr. nameraním reálnych dát. Druhým typom sú dáta y_n . Ide o dáta, ktoré sú výstupom modelu z predchádzajúcich epoch (ide o výstup v čase $k-1$ až $k-n_y-1$). Na skrytej vrstve sú umiestnené perceptróny, ktorých počet sa pohybuje v intervale $\langle 1; n \rangle$. Každý perceptrón má svoj vektor váh W , ktorý vyjadruje citlivosť konkrétneho neurónu. Na skrytej vrstve dochádza k dvom operáciám, a to synaptickéj v a somatickej ϕ . Synaptická operácia vytvára lineárne zoskupenia vstupov, zatiaľ čo somatická operácia je daná funkčným vzťahom $\phi(v)$, ktorý je daný nasledujúcou rovnicou 7. [4],[5]

$$\phi = \frac{2}{1 + e^{-v}} - 1 \quad (7)$$

Výstupom somatickej operácie je aktivačná funkcia. Na výstupnej vrstve sa nachádza výstupný neurón daný vektorom výstupných dát y a váhami výstupného neurónu V . Samotný výstupný neurón je lineárnou funkciou. MLP sieť môže byť tvorená jedným neurónom, ale i spojením niekoľkých perceptrónových neurónov, ktoré sú použité paralelne a sú pripojené k neurónu na výstupnej vrstve. [5],[6]



Obr. 5 Schéma dynamickej MLP siete s jednou skrytou vrstvou

4. Porovnanie výsledkov z experimentálnej časti

V experimentálnej časti boli pre učenie a testovanie použité namerané neprevzorkované dáta. Každý z vybratých modelov (LNU, MLP) bol zostavovaný pomocou programu IDLEX (podprogram Python-u) a spracovaný v rámci samostatnej časti, v ktorej sa nachádza grafická interpretácia výsledkov identifikácie. Celkový obrázok je zložený zo 4 grafov, kde:

- na ľavom hornom grafe je zobrazená časová závislosť rozdielu tlakov reálnych dát, namodelovaných dát a chyby počas učenia po poslednej epoche,
- na ľavom dolnom grafe je zobrazený parameter SSE (Sum Squared Error) v závislosti od epoch počas učenia,
- na pravom hornom grafe je zobrazená časová závislosť rozdielu tlakov reálnych dát, namodelovaných dát a chyby počas testovania, pričom k testovaniu boli vždy vybrané najlepšie váhy z učenia a teda i graf je vykreslený pre najlepšie váhy,
- na ľavom dolnom grafe je zobrazený parameter SSE_test učenia v závislosti od epoch.

Parameter SSE vyjadruje súčet kvadratických chýb medzi jednotlivými dátami a priemermi ich skupín. Pri identifikácii bolo počítané pre každú epochu minimálne SSE, pričom po vykonaní simulácie program vypísal najlepší parameter best SSE v rámci tréningu a najlepší best SSE_test v rámci testovania. Pre parameter SSE platí, že čím sa hodnota približuje bližšie k nule, tým dochádza k menšej chybe medzi namodelovanými a reálnymi dátami. [3]

4.1. Vstupné podmienky pre LNU a MLP

Dynamický model lineárneho neurónu s učiacim algoritmom Levenberg-Marquardt, ktorý bol vytvorený v pracovnom prostredí programu IDLEX mal zvolené nasledovné počiatkové podmienky:

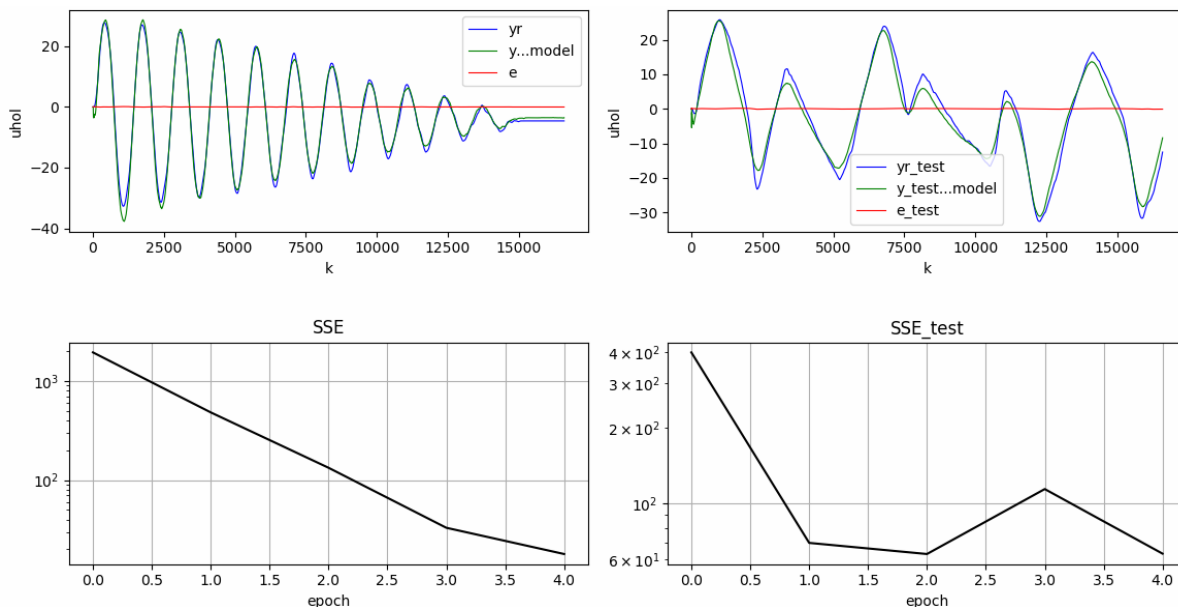
- rýchlosť učenia μ : 0,05;
- počet epoch e : 5;
- počet vstupov nu : 10;
- počet vstupov ny : 5.

Dynamickému model viacvrstvovej perceptrónovej siete s jednou skrytou vrstvou a jedným neurónom na skrytej vrstve boli určené nasledujúce počiatkové podmienky:

- rýchlosť učenia μ : 0,005;
- počet epoch e : 10;
- počet vstupov nu : 10;
- počet vstupov ny : 5;
- počet neurónov skrytej vrstvy nl : 1.

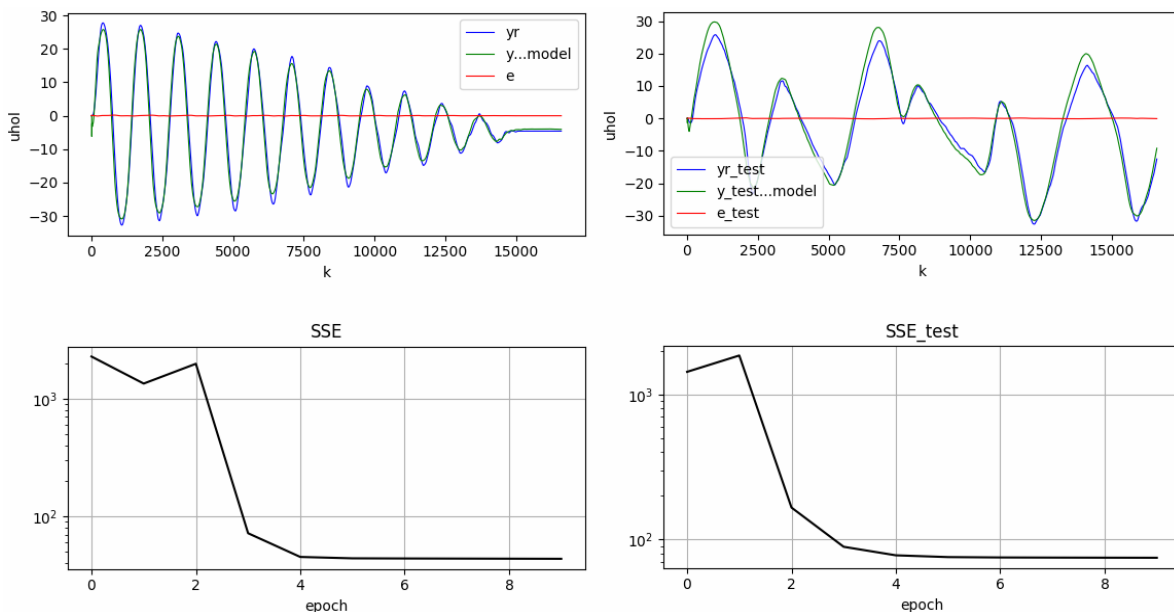
4.2. Výstupné modely LNU a MLP

Na Obr. 6 sa nachádza grafická interpretácia modelu LNU. Podľa parametra SSE pre testovaciu fázu a učiacu fázu možno skonštatovať, že zatiaľ čo parameter SSE má stabilný konvergujúci priebeh, pri parametri SSE_test došlo v testovacej fáze k miernemu narušeniu priebehu.



Obr. 6 Učiacia a testovacia fáza LNU s učiacim algoritmom Levenberg-Marquardt

Na Obr. 7 je zobrazený výstupný model MLP siete. Podľa parametra SSE pre testovaciu fázu a učiacu fázu možno skonštatovať, že oba parametre majú podobný stabilný a konvergujúci priebeh.



Obr. 7 Učiacia a testovacia fáza MLP siete

4.3. LNU vs MLP

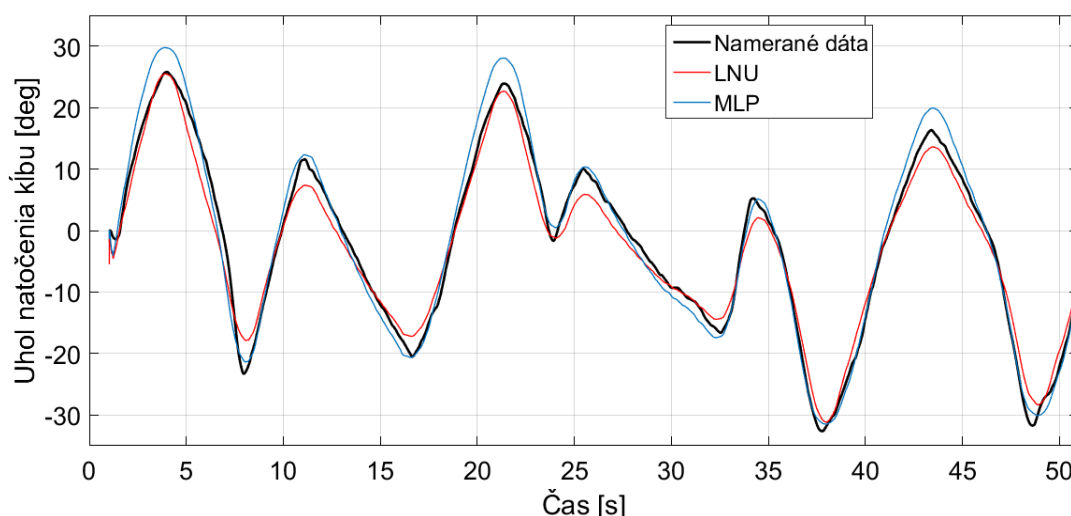
Výstupom experimentálnej časti sú jednotlivé modely, ktorých efektívnosť bola sledovaná pomocou parametra fit (Tab. 1). Tento parameter bol počítaný v programe Matlab pomocou nasledujúceho príkazu: `fit = goodnessOfFit(y, yr, 'NRMSE')`. Daným príkazom sa určí štatistický parameter NRMSE (Normalized Root Mean Square Error), ktorý vyjadruje mieru rozdielu medzi predpokladaným modelom a skutočnosťou. Údaj má percentuálny charakter, kde najideálnejší model by dosiahol hodnotu parametra rovnú 100%. [3]

Na základe parametra fit je lepším modelom lineárna neurónová jednotka. Model aj pri simulácií vykazoval pomerne vysokú stabilitu a konvergenciu parametra SSE, hoci pri testovaní bol mierne nestabilný. Druhým v poradí bola dynamická MLP sieť s jednou skrytou vrstvou a s jedným neurónom (fit 80,87 %). Pri tejto sieti je potrebné podotknúť, že boli vykonané simulácie vo vyššom počte v porovnaní s modelom LNU, keďže sieť je pri tréňovaní nestabilnejšia. Avšak v prípade, že sa sieť naučila dobre, tak hodnoty SSE konvergovali. Táto sieť môže byť výhodnejšou alternatívou aj pre komplikovanejšie dáta.

Tab. 1 Porovnanie vstupných podmienok a parametra fit pre skúmané modely

Parametre	MLP	LNU_LM
learning rate μ	0,005	0,05
počet epoch e	10	5
počet vstupov n_u	10	10
počet vstupov n_y	5	5
počet neurónov na skrytej vrstve n_1	1	---
fit	80,87 %	81,54 %

Nakoľko LNU a MLP sú na základe fit podobné, výsledky boli porovnané vzhľadom k nameraným dátam i graficky v programe Matlab (Obr. 8). Čierna krivka prezentuje reálne namerané náhodné dáta, červená krivka LNU a modrá MLP. Oba modely neboli schopné presného naučenia sa a následného testovania, o čom svedčia i hodnoty parametra fit a graficky interpretovaná nepresnosť modelov vzhľadom k vrcholom čiernej krivky. Zo zobrazeného je možné vyjadriť, že MLP je presnejšie pri záporných vrcholoch (záporných uhloch natočenia), no pri kladných presahuje čiernu krivku, kým to u LNU sa nedá presne definovať, v ktorom smere natočenia kľbu presnejšie kopíruje vrcholy nameraných dát.



Obr. 8 Porovnanie výstupných modelov LNU a MLP voči reálne nameraným dátam

5. Záver

Cieľom analýzy bolo identifikovať dynamiku ramena manipulátora s PUS pomocou zvolených modelov a učiacich algoritmov neurónových sietí v programe Python. Pre predikciu nameraných dát vyhovoval ako model LNU s učiacim algoritmom Levenberg-Marguardt, tak i MLP s jednou skrytou vrstvou a s jedným neurónom, čo nasvedčuje tomu, že dáta vykazujú pomerne vysokú lineárnu závislosť. Napriek tomu by bolo vhodné v nasledujúcej štúdií:

- analyzovať korelačný koeficient pre pohyb ramena zvlášť v každom zo smerov natočenia kĺbu,
- použiť program Matlab pre zostavenie rovnakých modelov a porovnať výsledky,
- meraním získať ďalšiu sadu nezávislých dát a použiť ju pre testovanie modelov,
- vytvoriť pre systém ďalšie modely a porovnať ich efektívnosť.

PodĎakovanie

Výskum je podporený grantom z Výskumnej grantovej agentúry v rámci Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied Číslo 1/0822/16 Výskum 3-stupňového inteligentného manipulátora založeného na pneumatických umelých svaloch a taktiež Projektom štrukturálnych fondov EÚ s ITMS kódom: 26220220103.

Použitá literatúra

- [1] Piteľ, J. et al.: Pneumatický umelý sval – perspektívny prvok mechatroniky (1). AT&P journal. 2008, Vol.12, p. 59-60, ISSN 1336-233X.
- [2] Piteľ, J. et al.: Pneumatické umelé svaly: modelovanie, simulácia, riadenie. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2015, p. 275, ISBN 978-80-553-2164-6.
- [3] Rimarčík, M.: Štatistika pre prax. 2007, p. 199, ISBN 978-80-969813-1-1.
- [4] Bukovský, I.: Nonconventional Neural Architectures and their Advantages for Technical Applications. Faculty of Mechanical Engineering, Prague: Czech Technical University in Prague. 2012, ISBN:978-80-01-05122-1.
- [5] Nelles, O.: Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models. Germany, Berlin: Springer. 2001, p. 786. ISBN 3-540-67369-5.
- [6] Kvasnička, V. et al: Introduction to the theory of neural networks, Slovakia, Bratislava: IRIS. 1997, p. 237. ISBN 9-788-088-77830-1.

AUTONOMNÍ SAMOROZKLÁDACÍ KOPTERA PRO ÚČEL SOUTĚŽE ARLISS/RESCUEBOT

Autonomous self-expanding copter for the ARLISS/RescueBot competition

Petr Homolka, Jaroslav Bušek

Ústav přístrojové a řídicí techniky, ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Abstrakt: Cílem této práce je návrh autonomní samorozkládací koptery pro účel účasti na mezinárodní studentské soutěži ARLISS/RescueBot. Návrh je řešen v rámci studentského projektu DICEBot. Podstatou konstrukce je jednoduchý mechanismus umožňující snadné a spolehlivé rozevření koptery. K stabilizaci koptery je použita opensource řídicí jednotka PixRacer, přičemž povely k autonomnímu letu jsou předávány ze sekundární řídicí desky založené na platformě Teensy. Výsledkem kombinace těchto dílčích řešení s jednoduchou konstrukcí rozkládacího mechanismu je robustní autonomní koptera, která je schopná vydržet náročné podmínky soutěže ARLISS/RescueBot. Přínosem této práce je zapojení studentů do praktického vývoje robotů, čímž získají cenné zkušenosti, a dále konfrontace s mezinárodními studentskými týmy..

Klíčové slova: koptera, autonomní, samorozkládací, MavLink

1. ÚVOD

V rámci studentského projektu DICEBot jsou navrhováni a vyvíjeni roboti především pro mezinárodní soutěž ARLISS/RescueBot. Tato soutěž se koná každoročně v poušti Black Rock Desert, Nevada. Pravidla soutěže definují dvě kategorie robotů: CanSat pro roboty určené pouze pro sběr dat a OpenClass pro autonomně pohyblivé roboty. Náš tým se rozhodl pro účast v kategorii OpenClass ve spolupráci s týmem s univerzity GeorgiaTech, Atlanta, Georgia. Pro tuto kategorii jsou definována jednoduchá omezující pravidla daná především konstrukcí nosných raket. Robot se musí vejít do nákladového prostoru rakety o tvaru válce s definovaným průměrem, výškou a maximální hmotností. V této kapsli je robot vystřelen za pomoci nosné rakety do výšky kolem 3000 m (přibližně 10 000 stop).

V okamžiku vrcholu letu rakety jsou otevřeny padáky nesoucí jednotlivé části rakety a robot vlastní vahou vypadne z kapsle nebo je vytlačen pomocí stlačeného oxidu uhličitého.

Tabulka 1. Omezující parametry soutěže ARLISS/RescueBot

Parametr	Hodnota
průměr tubusu	146 mm (5,78“)
výška tubusu	254 mm (10“)
hmotnost nákladu	1,8 kg

Následně se musí jakýmkoli způsobem, ale plně autonomně dostat na předem stanovené cílové místo, které je dáno přesnými GPS souřadnicemi. Cíl je definován jako okruh 10 metrů okolo této pozice. Vzdálenost mezi místem startu a cílem je proměnná v důsledku proměnných povětrnostních podmínek, přičemž doposud nejdelší vzdálenost byla do šesti kilometrů. Pravidla nijak nedefinují, jakou musí mít robot podobu, či jakým způsobem se

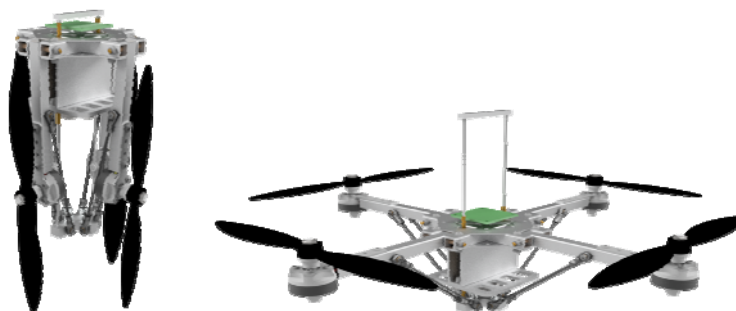
musí pohybovat. To je necháno čistě na úsudku tvůrců onoho robota. Vítězem se stává každý tým, jehož robot splňuje tyto požadavky a dosáhne stanoveného cíle.

2. VÝVOJ ROBOTA V RÁMCI PROJEKTU DICEBOT

Jak bylo řečeno v úvodu článku, soutěž probíhá v solné poušti. To může evokovat dojem perfektně hladkého povrchu, a tudíž snadného úkolu pro rovery nebo ostatní kolové roboty. Z loňských zkušeností jsme ale vyzorovali naprosto odlišnou realitu. Jelikož přes soutěžní plochu jezdí mnoho automobilů, je v ní veliké množství brázd a zvrásněných ploch. Ty mají také často velmi odlišné povrchové vlastnosti. Proto pro kolové roboty je pohyb po této ploše velmi obtížný a často dojde k uvíznutí robota. Přesto většina soutěžních týmů volila tuto koncepci pro její počáteční řešitelskou jednoduchost.

Jelikož pohyb po zemi není snadný, zbývá možnost pohybu vzduchem. Tím odpadají problémy pro překonávání pozemních překážek. Ovšem vstupují jiné obtíže, jako je například silný vítr nebo relativně dlouhá letová vzdálenost. Létající dron je také mnohem víc ovlivněn celkovou hmotností, která u pozemního robota není příliš důležitá. Největší hmotnost se dá ušetřit na pohonných akumulátorech. Ovšem jejich zmenšením se snižuje i celkový dolet. Proto je velice důležité najít optimální kombinaci velikosti, hmotnosti a dosahovaného doletu. Návrh softwaru pro létajícího drona je také mnohem složitější než pro kolové vozítko. To je dáno především nutností řešit velmi přesně polohu a pozici v třírozměrném prostoru.

Tým studentského projektu DICEBot se skládá především ze studentů technických oborů ČVUT v Praze. Prošli jím již jak studenti z Fakulty strojní, tak též několik studentů z Fakulty elektrotechnické. Aktivní členové řeší především vývoj a testování robota pro soutěž RescueBot, ale také se věnují ostatním studentům, kteří v rámci tohoto projektu píšou své diplomové či bakalářské práce, nebo semestrální projekty. Několik studentů již také pracovalo na projektu v dlouhodobějším měřítku



Obr. 1 Složená koptera (vlevo) a rozložená koptera (vpravo).

3. MECHANICKÁ KONSTRUKCE

Mechanická konstrukce je navrhována s ohledem na co nejvyšší účinnost celé koncepce robota v kontextu kompromisu mezi jeho velikostí a hmotností. Jelikož je koptera omezena její velikostí ve složené podobě, bylo snahou vytvořit konstrukci, která dovoluje použít co největší vrtule, jelikož čím větší vrtule jsou použity, tím je dosaženo delšího doletu při stejné kapacitě napájecích akumulátorů. Důležitým aspektem konstrukce je také její jednoduché, robustní a spolehlivé rozevření. V tomto případě je spolehlivost na prvním místě, jelikož pokud nedojde ke správnému rozevření celého rámu, koptera s velkou pravděpodobností havaruje.

Vývoj konstrukce prošel mnoha iteracemi, v nichž byl pro návrh využit 3D modelovací program Autodesk Inventor®. Bylo vybráno to řešení, které nejlépe splňuje veškeré důležité požadavky na něj kladené a také zachovává celkovou výslednou jednoduchost a požadovanou nízkou hmotnost. Díky jednoduchosti řešení se jedná o dostatečně spolehlivé zařízení pro nasazení v náročných podmínkách, což se podařilo ověřit při četných i neúspěšných testovacích letech. Při návrhu muselo být bráno v potaz také přetížení při startu nosné rakety. K tomu musí být dimenzováno hlavně uchycení pohonných akumulátorů, které jsou nejtěžší součástí koptery a mají tedy největší setrvačnost.

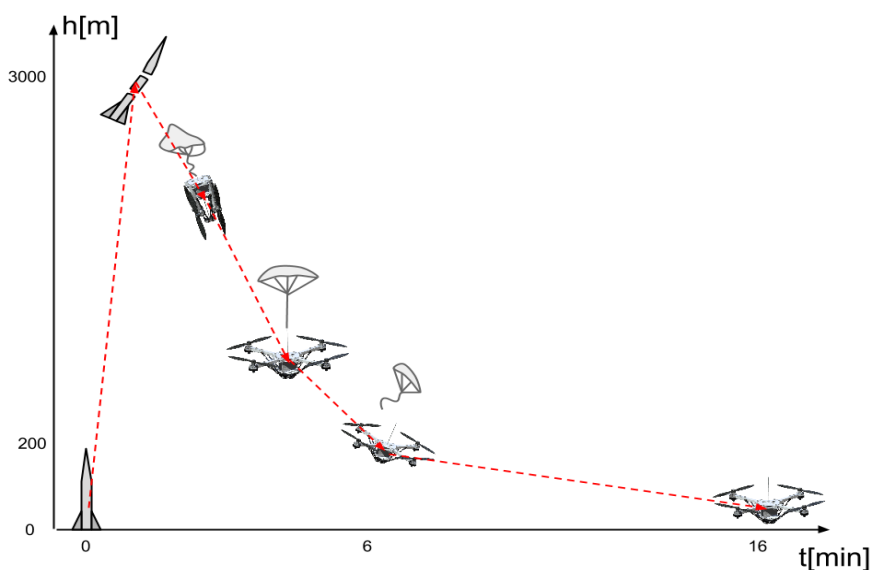
Téměř celá konstrukce je vyrobena z duralových profilů a desek. Pouze vzpěry rozkládací konstrukce jsou z uhlíkových trubiček, jelikož mají lepší mechanické vlastnosti. Celkově je kladen velký důraz na snadnou vyrobitelnost celého rámu na základních výrobních strojích a za použití snadno dostupného materiálu. Koncepce rozevírání je založena na principu deštníku (Obr. 1). Ramena jsou spojena vzpěrami a ty jsou uprostřed kluzně uchyceny na posuvných táhlech. Na středové části jsou shora pevně připevněny neodymové magnety zabezpečující zajištění v rozevřené poloze. Jako rozkládací aktuátor bylo uvažováno mnoho řešení včetně využití servopohonů či předepjatých pružin. Nakonec bylo zvoleno řešení, které jednoduše využívá sílu vyvozenou tahem stabilizačního padáku. Toto řešení je konstrukčně velmi jednoduché a lehké, přičemž se jedná o velmi spolehlivý mechanismus, což bylo četnými pokusy ověřeno. Jelikož padák působí na kopteru silou po celou dobu až do jeho odpálení, rám má dostatečné množství času pro správné rozevření.

Největší průměr vrtulí, který se povedlo do konstrukce zakomponovat, je osm palců. To je již dostatečná velikost pro požadovaný dolet, což bylo ověřeno jak teoretickým výpočtem pomocí návrhového programu [1], tak letovými testy. Účinnost stejně velkých vrtulí se také liší v závislosti na použitém materiálu a zpracování. Pro počáteční testy dostačovaly levné plastové vrtule, které jsou méně účinné, ale jsou velmi odolné. Ovšem pro maximální efektivitu letu bylo nutné použít vrtule uhlíkové, které se vyrábí v přesných formách a jsou precizně vyvážené, čemuž též odpovídá jejich vyšší cena.

4. PLÁN LETU

Jelikož efektivnost letu koptery je ovlivněna mnoha vnějšími vlivy, je třeba jeho fáze správně naplánovat. Jak již bylo řečeno, let začíná ve výšce přibližně 3 km nad zemí. Poušť se nachází v nadmořské výšce 1,2 km. Potenciální počátek letu koptery je tedy ve výšce zhruba 4 km nad mořem. V této výšce je již mnohem menší hustota vzduchu než nad zemí. Ve výšce 5 km nad mořem je hustota vzduchu přibližně o čtvrtinu menší než v 1 km nad mořem [2]. Let v této výšce by byl tedy velmi neefektivní. Proto je navrženo řešení, kdy celý let za pomoci vlastních motorů koptery se odehrává v blízkosti zemského povrchu, a tedy v místě s nejvyšší možnou hustotou vzduchu (Obr. 2).

Ihned po vypadnutí koptery z tubusu rakety se začne nafukovat stabilizační padák. Díky síle v lanku od padáku, působící na posuvné táhlo otevíracího mechanismu, se začne rozevírat rám. Po dosažení výsledné pozice rámu je mechanismus zafixován dosednutím neodymových magnetů na sebe. Ty poté již nedovolí opětovné složení rámu. Takto rozložená koptera klesá velkou rychlostí bržděná pouze stabilizačním padáčkem do výšky přibližně 200 m nad zemí. V této výšce se využívají data z barometru, který má velký rozsah. Rychlost klesání s padáčkem je volena vyšší z důvodu nebezpečí zanesení větrem dále od požadované cílové pozice. V této výšce jsou softwarově odjištěny a roztočeny motory v minimálních otáčkách. Dále je za pomoci odporového drátu přepáleno nosné lanko padáku.



Obr. 2 Schématické znázornění plánu letu.



Obr. 3 Řídicí elektronika na platformě PixRacer.

Následuje již samostatný let koptery až nad cílovou polohu. Výška je postupně snižována až na vzdálenost dosahu ultrazvukového senzoru. To znamená let ve výšce pod 10 m nad zemským povrchem. Ultrazvukový senzor je volen hlavně kvůli mnohem větší přesnosti oproti barometrickému senzoru, který je značně ovlivněn změnou atmosférických podmínek. Po příletu nad místo cíle koptera postupně klesá až na zem, kde vypne motory a přejde pouze do telemetrického režimu. Ten vysílá telemetrická data včetně aktuální polohy pomocí bezdrátového přenosu na frekvenci 900 MHz (frekvenční pásmo povolené na území Spojených států amerických). To je nezbytné pro případné dohledání koptery při poruše, havárii nebo při přistání na chybném místě.

5. ŘÍDICÍ ELEKTRONIKA

Po předchozích neúspěšných pokusech o vytvoření kompletně vlastní řídicí jednotky byl pro letošní ročník zvolen odlišný přístup a bylo rozhodnuto použít již hotové open-source

řešení. K tomuto se dospělo především z důvodu časové zátěže testováním vlastní elektroniky a řídicích algoritmů, které je pro spolehlivou funkčnost nezbytné. To v současném množství členů týmu nebylo možné. Využití hotové jednotky ušetřilo mnoho času a již nyní jsou dosaženy uspokojivé výsledky.

Jako hlavní řídicí jednotka je použita deska PixRacer (Obr. 3) s opensource firmwarem APM. Tato jednotka již obsahuje téměř všechny potřebné senzory. Jediným externím senzorem je v tomto případě použit GPS přijímač, který komunikuje přes sériové rozhraní po standardním protokolu NMEA.

Pro řízení logiky letu a sepnutí systému pro odpálení padáku bylo třeba přidat navíc ještě druhotnou řídicí jednotku. Jako vhodné řešení bylo zvoleno Teensy 3.1. Jelikož celý letošní koncept je uzpůsoben rychlému vývoji, je tato jednotka velmi výhodnou volbou vzhledem ke své malé velikosti a dostatečnému výkonu. Mikrokontrolér je možné programovat s využitím knihoven a objektového přístupu známého z Arduina. Tato řídicí jednotka má za úkol číst telemetrická data z řídicí jednotky PixRacer přes sériové rozhraní po protokolu MavLink. Ze získaných dat vyhodnocuje Teensy současný stav, ve kterém se koptera nachází a podle toho dává zpět pomocí telemetrických dat pokyny řídicí jednotce a ve správnou chvíli dá signál pro odpálení padáku.

6. ZÁVĚR

V rámci studentského projektu DICEBot se podařilo zrealizovat samorozkládací autonomní kopteru pro mezinárodní studentskou soutěž ARLISS/RescueBot. Byly využity snadno dostupné komponenty a materiály, které lze v případě nutnosti snadno opravit v náročných podmínkách pouště, kde se soutěž koná. Zároveň byla pro řízení koptery použita osvědčená řídicí jednotka PixRacer v kombinaci s odolnou platformou Teensy, která obstarává autonomitu letu. Byly provedeny základní testy a nyní probíhá detailní ladění celé koncepce, aby mohla být koptera (snad úspěšně) nasazena v rámci letošního ročníku soutěže, který se koná jako každoročně začátkem září.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS14/182/OHK2/3T/12.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Mueller, M. (2016). eCalc - xcopterCalc - the most reliable RC Calculator on the Web. [online] Ecalc.ch. Available at: <http://www.ecalc.ch/xcopterCalc.php> [Accessed 5 Jun. 2016].
- [2] Airbus, Getting to Grips with Aircraft Performance, Airbus Industrie, Customer Services, Blagnac, 2000, p. 11-16.