

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA AUTOMATIZAČNÍ TECHNIKY A ŘÍZENÍ



XXXVIII. Seminar ASR '2014 “Instruments and Control”

Ostrava, April 25, 2014

Programme Committee

R. FARANA	FS VŠB - TU Ostrava
K. JARACZ	Pedagogic Academy Krakow, Poland
V. KEBO	HGF VŠB-TU Ostrava
K. KOSTÚR	TU Košice, F BERG, Slovakia
Š. KOZÁK	FEI STU Bratislava, Slovakia
I. PETRÁŠ	TU Košice, F BERG, Slovakia
J. PLUTA	University of Science and Technology, Krakow, Poland
D. POPESCU	University of Craiova, Romania
B. SAPINSKI	University of Science and Technology, Krakow, Poland
M. ŠEDA	FSI VUT v Brně
J. ŠEMINSKÝ	TU v Košicích, Slovensko
B. ŠULC	FS ČVUT v Praze
I. ŠVARC	FSI VUT v Brně
I. TAUFER	Univerzita Pardubice
J. TŮMA	FS VŠB-TU Ostrava
V. VAŠEK	FAI UTB ve Zlíně
J. VÁSÁRHELYI	TU Miskolc, Hungary
A. VÍTEČEK	FS VŠB - TU Ostrava
F. ZEZULKA	FEKT VUT v Brně

Organizing Committee

M. BABIUCH, P. SMUTNÝ, R. WAGNEROVÁ

Secretary Office

✉ **Department CSI (ATR-352), VŠB-TU Ostrava**

av. 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba

☎ +420 59 732 1280

📠 +420 59 691 6129

 <http://akce.fs.vsb.cz/2014/asr2014/>

Proceedings Editors

P. SMUTNÝ

ISBN 978-80-248-3398-9

Table of Contents

Determination of the Performance of the Technological Process Based on Models	5
<i>BARANOVÁ, Vladena, LANDRYOVÁ, Lenka & FUTÓ, Jozef</i>	
Validácia procesu merania teploty zliatiny hliníka pri tlakovom liatí	12
<i>DUBJÁK, Ján</i>	
Využití Linguistic Fuzzy-Logic Control pro řízení technologických systémů	20
<i>FARANA, Radim, WALEK, Bogdan, JANOŠEK, Michal & ŽÁČEK, Jaroslav</i>	
Positioning Accuracy of Telescopic Rod Type PKS.....	28
<i>GRÚBEROVÁ, Michaela & VAJSÁBEL, Michal</i>	
Návrh a realizace řídicího algoritmu a jeho softwarové podpory s ověřením na laboratorním modelu	38
<i>HÝL, Radim & WAGNEROVÁ, Renata</i>	
Zpracování zvukových signálů využitím ADSP-21469 EZ-KIT Lite.....	50
<i>JANEČKA, Patrik</i>	
Ověření nové technologie vozby vlaků simulačním modelem.....	58
<i>LORENZ, Filip</i>	
Multi Agent Distributed Control System for Coordination of Heating Plants.....	63
<i>MARIŠKA, Martin, DUŠEK, František, LIGUŠOVÁ, Jana & LIGUŠ, Ján</i>	
Porovnanie výsledkov experimentu na základe použitia štatistických metód a využitím neurónových sietí.....	66
<i>MICHAL, Peter</i>	
Laboratory Setup for Testing Various Types of Active Vibration Control Algorithms	72
<i>PILBAUER Dan, KUČERA Vladimír, BUŠEK Jaroslav & VYHLÍDAL Tomáš</i>	
Návrh metodiky kalibrace nelinearit 2D triangulačních skenerů	80
<i>PODEŠVA, Petr & FOJTÍK, David</i>	
Design and Development of GUI for Mapping of Obstacle by Sensor Fusion Techniques	88
<i>SHARMA, Rahul</i>	
The Brief Summary of Drive Development for Prosthesis and Rehabilitation Devices of Human Hand Based on Fluidic Actuators	95
<i>ŠEMINSKÝ, Jaroslav</i>	
Modelování a simulace aktivně tlumené struktury.....	101
<i>ŠURÁNEK, Pavel, TŮMA, Jiří & MAHDAL, Miroslav</i>	
Simulácia dynamiky pneumatického aktuátora využitím rôznych modelov svalov	108
<i>TÓTHOVÁ, Mária</i>	
Správa alarmov v operátorských pracoviskách	115
<i>URBAN, Patrik & LANDRYOVÁ, Lenka</i>	
Priama a inverzná úloha kinematiky na riadenie PKS	123
<i>VAJSÁBEL, Michal & GRÚBEROVÁ, Michaela & BARBOLYAS, Boris & BARTALSKÝ Lukáš</i>	
Kalman Filter for Signal Processing and Navigation	133
<i>VASILEV, Andrey</i>	
Dominantnost pólů regulačního obvodu	142
<i>VÍTEČKOVÁ, Miluše & VÍTEČEK, Antonín</i>	

Preface

Annual „Seminář ASŘ“ (Seminary of Automatic Control Systems), organized by the Faculty of Mechanical Engineering, Department of Control Systems and Instrumentation in collaboration with the Committee of Applied Cybernetics and Informatics – KAKI Ostrava, achieved on this year 2014, was held thirty-eight times.

The seminars of ASR demonstrate as important Workshops every year their fixed position at the large offer of science-research actions with international range and with a reputable special even social level. The workshop „Seminary ASR“ was distinctly signed on this times as an effective platform for meeting teachers and Ph.D. students from the VŠB - Technical University of Ostrava with scientists and students from other universities of Czech Republic, Slovakia and Poland, even with experts from industrial companies and other institutions. In 2014 the Seminary of ASR is split into two parts. The first one is a student competition – STOČ 2014 as the 19th Student Science Workshop and the second part is a traditional XXXVIIIth Seminary of ASR “Instruments & Control” as a Ph.D. seminary and student competition.

The goal of Seminary of ASR'14 "Instruments and Control" is to present results of R&D projects, reciprocal interchange of participant's information, experiences and retrieval of possibilities for cooperation on common projects, mainly between Ph.D. students. The other goal of this year's Seminary of ASR is to introduce the professional public, experts and scientific workers from universities, research institutions, industry, design and supply firms with the most up-to-date knowledge from the areas of automation, measuring, diagnostics and control systems, program systems for control, SCADA/HMI systems, CAD, and other areas, and to provide an exchange of experience.

The main topics of Seminary ASR'2014 “Instruments and Control” there are:

- The methods and algorithms of automatic control
- Modeling and simulation of control elements and systems
- Measuring and diagnostic systems
- The means of automation devices
- Program support of control and diagnostic systems
- Applied informatics (Computer Science)

The new series of international conferences, known as International Carpathian Control Conference (ICCC), were established in the year 2000 in collaboration with three partners which are technical universities such as TU Košice (faculty of BERG), AGH Krakow (faculty of FMIR) and VŠB-TU Ostrava (faculties of FME and MGF).

This year's conference will be held in May 2014 in Czech Republic as an “ICCC'2014”. Now the ICCC conference is organized by five technical universities from Poland, Slovakia, Czech Republic, Hungary and Romania in the alternate venues.

DOC. ING. RENATA WAGNEROVÁ, PH.D.
Chairman

PROF. ING. RADIM FARANA, CSC.
Co-Chairman

Determination of the Performance of the Technological Process Based on Models

BARANOVÁ, Vladena¹, LANDRYOVÁ, Lenka² & FUTÓ, Jozef³

¹ Ing. ✉ Department of Control Systems and Instrumentation VSB – Technical University Ostrava, Ostrava, Czech Republic, 🖨 vladena.baranova@gmail.com

² doc. Ing. CSc. 🖨 lenka.landryova@vsb.cz

³ doc. Ing. Ph.D. ✉ Institute of Control and Informatization of Production Processes, Faculty of Mining, Ecology, Process Control and Geotechnologies, Technical University of Košice, Slovakia 🖨 jozef.futo@tuke.sk.

Abstract: *The continuously increasing requirements on the performance improvement of technological processes in the field of industrial engineering reinforce the need for searching for reserves and risk reduction. One of the possibilities is the design and determination of probabilistic models of observed phenomena on the basis of new information technologies. The use of the statistical and mathematical processing of data and its subsequent evaluation provides the opportunity to create models describing the course and predictable development of the process. This article is devoted to the analysis of adverse events, such as outburst and ejection in the process of refining steel in an oxygen converter in order to create models that present the dependence of the above-mentioned phenomena and thus affect the capability of the process itself. An evaluation of the random variable in the form of the Shewhart charts and the subsequent determination of the process capability index can become decisive in determining the key performance indicator KPI of this complex technological process.*

Keywords: *technological process, model, outburst, ejection, KPI*

1 Introduction

Current information technologies allow capturing and recording data from processes in hard operating conditions with new technical means and in real-time, following the measured data archiving, processing and evaluating in situ or in the laboratory [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. An example could be the use of small industrial cameras connected to a computer during model creation for monitoring adverse phenomena in the steel making process [13]. In laboratory conditions data collected by sensors and analyzed using mathematical and statistical methods have become the basis for evaluation of the phenomena, which are in operating conditions characterized by a rapid course and unwelcome presence. Watching them in situ is difficult and dangerous, but for creating their models that can serve as the key performance indicators KPI of the technological process, they are indispensable.

Each performance indicator needs to have its target value to define its development towards the ideal status. The records and application of KPIs for the steel making process enabled the determination of various parameters (indices), which describe the impact of technical and human factors on a monitored technological process.

2 Description of the principle of model creation

When creating such models of complex phenomena of a real fact we abstract from a wide range of details and consider only the significant aspects of the phenomenon, which have the importance in terms of an objective examination. In such a way we receive a simplified and therefore useful idea of an actual fact as the created model according to Eykhoff definition: *"Model is an expression of the essential characteristics of an existing object, which describes knowledge about this object in a usable form"*[4, 14].

When analyzing the data obtained, we assumed that these phenomena are the consequence of an action of some „unregulated” variables during refining steel as the effect of a variety of technical means, but also the human factor, which all affect not only the process itself, but also its result. The whole course of a steel refining process was recorded by two cameras KAM1 and KAM2 (Figure 1). The observed phenomena were recorded and evaluated with the necessary information (mostly time variables) so that the observed phenomenon has been described by means of "knowledge about the object." A color camera (KAM1) was placed over the cap of a converter, and monitored outbursts, while a black-and-white camera (KAM2) was placed under the converter and monitored ejections.

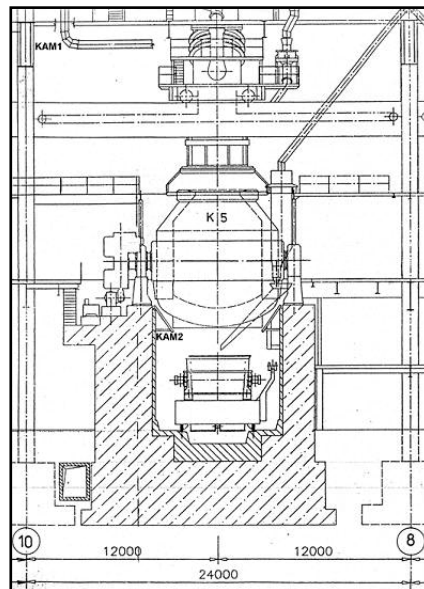


Figure 1 – Placement of cameras KAM1 and KAM2 in the converter

Records of 30 blows were the starting point for the models creation, where each blow is accompanied by outbursts and at least one ejection. Occurrence of outbursts and ejections in the process of refining steel in an oxygen converter is an undesirable event, because of the significant financial, material, time and energy losses. All these cases are based on the same assumption, namely that the observed phenomena are characterized by a random variable - time. It is important to note that the duration and the course of phenomena with regard to the dynamics of the whole process were possible to determine by means of a video [1, 2, 3, 6].

3 Observed actions – outbursts and ejections

In the steelmaking process to the melted iron oxygen through a nozzle in the form of a gas stream is supplied for decarbonization. Peak flow blowing causes rapid slag decarbonization of the final step of the process. A gas stream is tearing off fluid, causing squirt metal droplets. This phenomenon is generally called an outburst or spraying and is visually manifested by whipping flames from the converter. In the past, it was studied,

because it causes operational problems and leads to a reduction in productivity and a lower yield of steel. It is therefore desirable to reduce the number of outbursts.



Figure 2 – Demonstration of outburst duration from KAM1

The term ejection means the irregular squirt of smaller or larger particles of metal and slag during blowing from the throat converter. As a result of ejection the yield of steel decreases (0.5 - 1%), the blow balance of a melt modifies during refining, the final temperature of the steel changes and the slag and steel increasingly create formations in the mouth throat of a converter. Ejection is visually identifiable as a phenomenon, in which the converter is in flames and from its throat pieces of slag melt squirt.



Figure 3 – Demonstration of the ejection duration from KAM2

4 Creating models based on the examination of data from the audio-video recording

According to the used recordings, models can be divided into three groups:

1. Processing of video recording,
2. Processing of audible recording,
3. Simultaneous processing of video and audible recording.

Given the scale of the problems we will consider only models processed from the video recording. The video recording provides information about the unwanted phenomena (outbursts, ejection) that accompany the production of steel.

This information concerns the time course of the mentioned phenomena and their intensity. Thus the obtained time series of a random variable can be evaluated as an analog

signal with the time course or as a discrete random variable. An example of such an evaluation can be seen in Figure 4, where charts show the time courses of outbursts, ejections and the blow interruption for 10 blows.

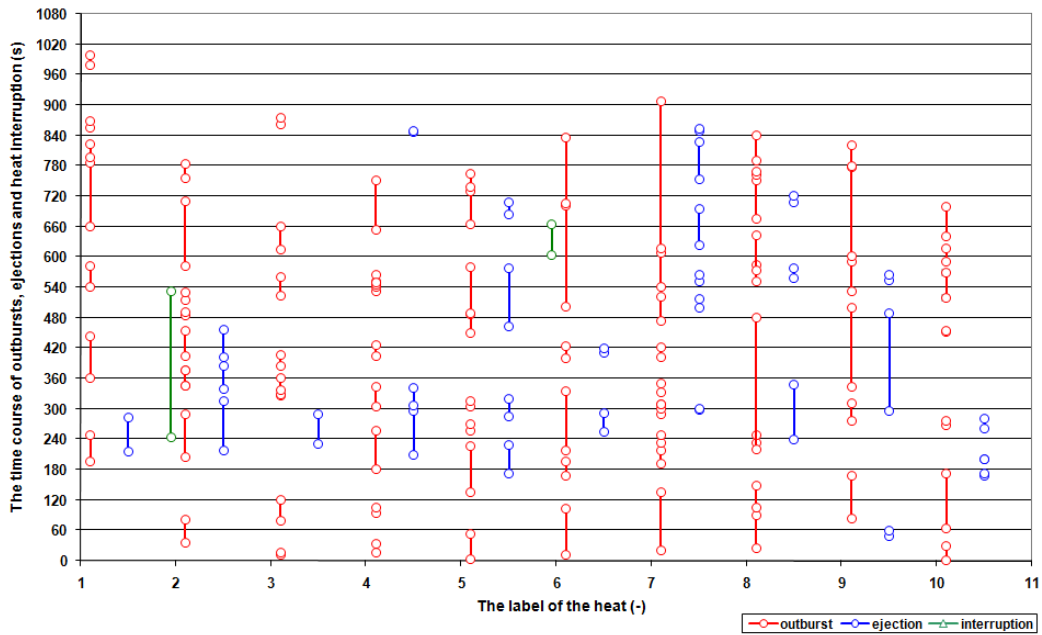


Figure 4 – Time course of outbursts, ejections and blow interruption in the blows 1-10

In Figure 5 we can see a model that describes the relationship between outbursts and ejection. A strong correlation between the model and the measured values of time of the beginning for outbursts and ejections confirms the value of correlation coefficient $R^2 = 0.9628$, respectively the coefficient of reliability. After outburst, we can likely expect ejection.

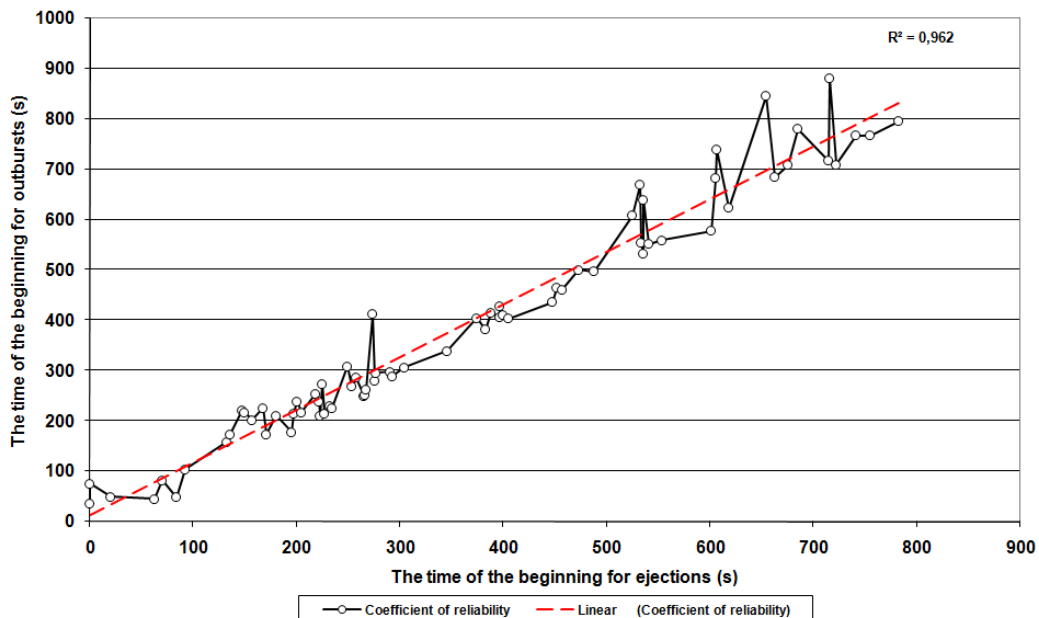


Figure 5 – Model of interdependence between outbursts and ejections

Other models may be created in the form of various characteristics of random variables such as time to the beginning of the outburst and ejection, the mean time to the beginning of the outburst and ejection. Qualitative attributes of these phenomena can be described by a number of statistical indicators. The video recording allows us to evaluate and describe the

dynamics of the course of phenomena and subsequently determine its impact on the course of the blow. It is therefore possible to create models based on the video recording that may be helpful in deciding in situ.

It is important to note that when analyzing the recorded video, all phenomena considered for outbursts and ejections were described by the attributes. A laboratory evaluation is worsened due to the measurement chain and subjective approach of the observer. Repeating a recording in the laboratory allows a more correct evaluation of the course of the phenomena, their parameters and the post-processing of data in the form of a model for a predetermined objective.

Following the determination of the process capability index, one of the properties of KPI may be assigned to the process. An example of such a determination is the evaluation of a random variable as a Shewhart diagrams in Figure 6 and Figure 7. Each value that is outside of the boundaries of the upper warning limit in Figure 6 and Figure 7 indicates that the observed numerical characteristics begin to recede the mean of the observed random variable. An assumption for bringing the course of outbursts and ejection under control is to identify the causes of a discrete process and the execution of remedial measures.

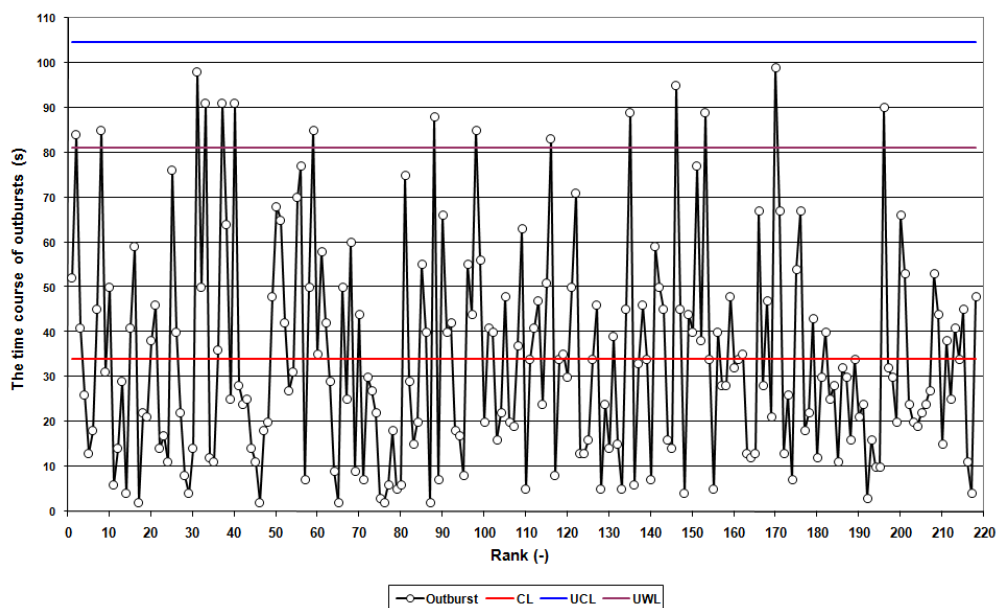


Figure 6 – Shewhart chart evaluates the duration of the outbursts

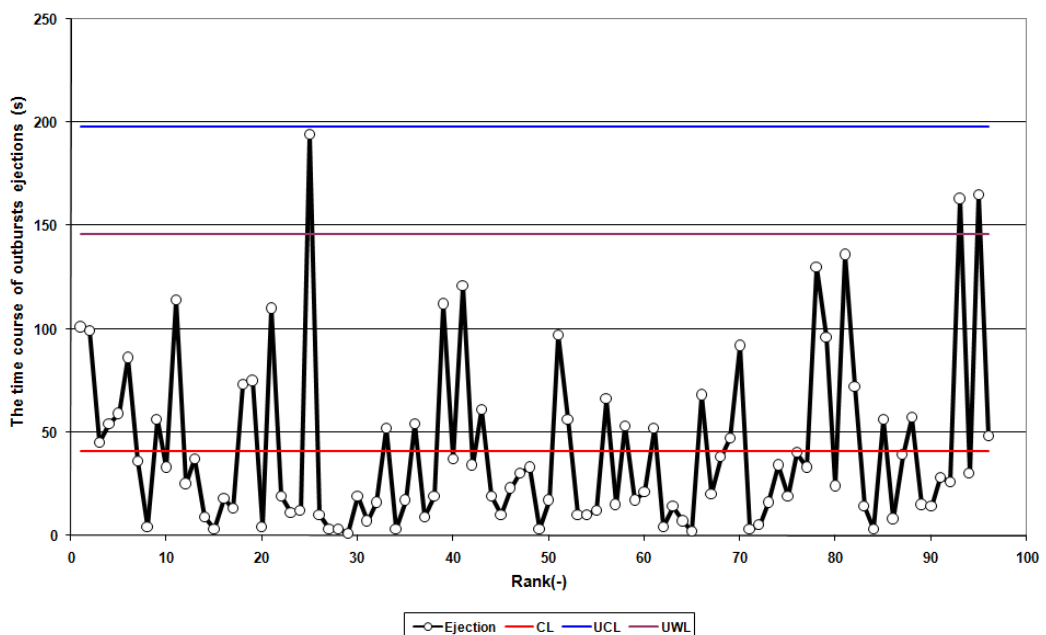


Figure 7 – Shewhart chart evaluates the duration of the ejections

5 Determination of the process capability

The role of the process capability index PCI is simply to express the relation between the target value T , specified limits of USL and LSL (Upper and Lower Specification Limit) and the actual process expressed by the mean value μ and the standard deviation σ of the measured values of the selected quality characteristic of the process. Target value T is the desired mean value of the quality characteristic that must be achieved, respectively to be as closely to it as possible. The lower and upper specification limits LSL and USL are the limits set for the character quality with respect to the required variability in order to ensure the required functionality of process [1, 2, 3, 10, 11, 12].

Capability index C_{pm} , the Taguchi capability index, removes some of the weaknesses of indices C_p and C_{pk} and retains their good qualities. This index was designed in the context of loss function, used in the Taguchi approach to quality assessment. It compares the maximum permissible variability of the observed quality characteristic given by width of the tolerance band with its real variability around the target value T . For its calculation the following relation is used:

$$C_{pm} = \frac{USL - LSL}{6 \cdot \sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (1)$$

The term $\{\sigma^2 + (\mu - T)^2\}$ is a measure of the average quadratic loss due to non-compliance with the conditions of production quality. When the standard deviation increases and / or the mean moves away from the target value, the denominator index value increases and C_{pm} decreases. The advantage of this index is the ability to record the changes in median values that are in the index C_{pk} “compensated” by changing the standard deviation. This index is used for two-sided tolerance and the target located at the center of the tolerance band, as is the case in our application [1, 2, 3].

$$C_{pmoutburst} = 0.5750 \quad (2)$$

$$C_{pmejection} = 0.5942 \quad (3)$$

6 Conclusions




The mentioned examples of processing of video recording are only part of the opportunities, which new technologies allow. The aim of the article is mainly to describe options for modeling based on the processing of a video recording that were carried out in the most demanding conditions. It doesn't solve the suppression of these adverse phenomena. The design and technological solutions to combat these phenomena are already known and in many cases used. Similarly there are not given examples of the processing of the audible recording, for example in the form of a Fourier transformation or other characteristics of the random variable obtained by the simultaneous processing of both recordings (audible and video).

7 References

- [1] BENKOVÁ, M., FLOREKOVÁ, L., BOGDANOVSKÁ, G.: Systémy riadenia kvality. Elfa s.r.o, ISBN 987-80-8086-066-0, Košice, 2007, ISBN 978-80-8086-066-0
- [2] FLOREKOVÁ, L.: Metódy štatistického hodnotenia kvality - SPC. Acta Montanistica Slovaca, vol. 1, 1998, pp. 1–20, ISSN 1335-1788
- [3] HANZELOVÁ, M., FLOREKOVÁ, L.: Environmental performance evaluation. In 5th International Control Conference 2004. Zakopane, Poland, 25. – 28. may 2004, pp. 915 – 918. ISBN 83–89772–00–0.
- [4] HANZELOVÁ, M., FLOREKOVÁ, L., Benková M., 2002 - A protection of air from point of view of local producer of polluting substances / emissions. In 3rd International Control Conference 2002. Malenovice, Czech republic, 27. – 30. may, pp 569–574.
- [5] CHLEBOVÁ, Z., KREPELKA, F., IVANIČOVÁ, L.: Statistical evaluation of measurements of random signal of vibration response of the drilling stand during rock drilling. In: Acta Mechanica Slovaca. Roč. 12, č. 3-C (2008), s. 199-208. - ISSN 1335-2393
- [6] KAČUR, J., LACIAK, M., DURDÁN, M.: Meranie relevantných veličín v procese podzemného splyňovania uhlia. In: AT&P journal. Roč. 17, č. 11 (2010), s. 51-55. - ISSN 1335-2237
- [7] KAČUR, J., LACIAK, M., DURDÁN, M.: Remote monitoring and control of the UCC process. - 1 elektronický optický disk (CD-ROM). In: ICCC 2011 : proceedings of the 12th International Carpatian Control Conference : 25-28 May 2011, Velké Karlovice, Czech Republic. - S.l. : IEEE, 2011 P. 180-184. - ISBN 978-1-61284-359-9
- [8] KREPELKA, F., CHLEBOVÁ, Z., IVANIČOVÁ, L.: Measurement, analysis and evaluation of random processes at rock drilling. In: Acta Mechanica Slovaca. Roč. 12, č. 3-C (2008), s. 229-236. - ISSN 1335-2393
- [9] LEŠŠO, I., HOROVČÁK, P., FLEGNER, P. :Hodnotenie metód spracovania signálu snímača z hľadiska teórie informácie. In: AT&P Journal. Roč. 11, č. 4 (2004), s. 70-73, ISSN 1335-2237
- [10] LEŠŠO, I., KREPELKA, F., HOROVČÁK, P., TERPÁK, J., BENKOVÁ, M., FLEGNER, P., BOGDANOVSKÁ, G., BEDNÁROVÁ, D., ŠUJANSKÝ, M., HUDYMÁČOVÁ, M., STEHLÍKOVÁ, B.: Výskum exaktných metód hodnotenia efektívnosti a kvality procesu rozpojovania hornín rotačným vítaním, Záverečná správa za celú dobu riešenia projektu : Č. projektu: 1419407/ - Košice: TU – 2009
- [11] Malindžáková, M.: 2012 - Hodnotenie dovezeného vs. spáleného odpadu vs. produkcia emisií. Odpady, roč. 12 (2), s. 23 – 25, 2012
- [12] Malindžáková M., 2009 - Synergický efekt vzájomnej podpory EMS a LCA. Kvalita pro život, roc. 10 (2), s. 27-29, 2009
- [13] STEHLÍKOVÁ, B., KOSTŮR, K., JACO, M.: Technological process distortions identification by digital cameras taken / - 2005. In: ICCC '2005. Volume 1. - Miskolc : University of Miskolc, 2005 P. 355-360. - ISBN 9636616442
- [14] TŮMA, J., WAGNEROVÁ, R., FARANA, R., LANDRYOVÁ, L.: Základy automatizace, 1. vyd. Ostrava, VŠB-TU Ostrava, 280s, ISBN 978-80-248-1523-7.

Validácia procesu merania teploty zliatiny hliníka pri tlakovom liatí

DUBJÁK, Ján¹

¹Ing.,  Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, Katedra matematiky, informatiky a kybernetiky, Bayerova 1, 080 01 Prešov, 
jan.dubjak@tuke.sk,  <http://www.fvt.tuke.sk/kmik>

Abstrakt: Liatie pod tlakom je výborný spôsob pre výrobu rôznych súčiastok vyrobených z neželezných kovov. Teplota je dôležitým technologickým parametrom výroby, ktorý má vplyv na štruktúru a kvalitu odliatkov. Použitie presného kontinuálneho meranie teploty zliatiny je najlepším prístupom pre predikciu problémov s kvalitou štruktúry výrobkov. Teplotný merací systém by mal napomôcť získať spätnú väzbu z výrobného procesu tak, aby sa zabránilo prípadným nedostatkom v ďalších fázach výroby.

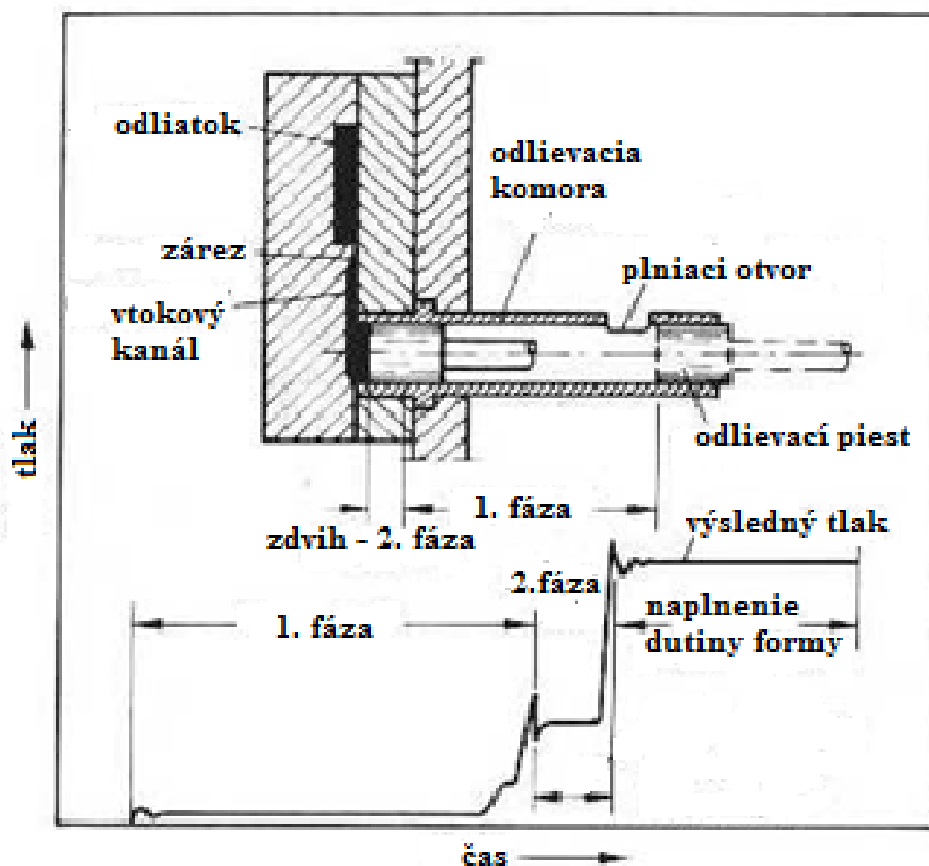
Pri meraní sa použil termočlánok typu "K" v ochrannej trubici z grafitu. Preto, aby bol proces výroby spôsobilý je nevyhnutné poznať skutočné a presné hodnoty teploty taveniny. Prístupilo sa teda k validácii tohto procesu. Pre overenie procesu merania teploty sme použili postupy a nástroje SPC (Štatistická kontrola procesu) a grafické nástroje Microsoft Excel 2007.

Kľúčové slová: tlakové liatie, teplota, termočlánok, validácia, SPC (Statistic process control)

1 Tlakové liatie

Jednou z mnohých možností používanou pre produkciu odliatkov je technológia odlievania pod tlakom. Jedná sa o špecifickú metódu používaná najmä pri výrobe rozmerovo menších, ľahších, tenkostenných ale zároveň tvarovo zložitejších výrobkov s presne nadimenzovanými počtami kusov v jednotlivých sériách pričom sa kladie výrazný dôraz na kvalitu povrchu, ktorý je zvyčajne hladký. Tieto odliatky sú vyrábané zväčša zo zliatin neželezných kovov so strednou teplotou odlievania.

Liatie pod tlakom Obr.1 je metóda presného liatia, ktorá sa najviac blíži k ideálnej snahe priamej premeny základného materiálu v hotový výrobok. Je to spôsob výroby odliatkov, pri ktorom je roztavený kov vstrekaný do trvalej formy veľkou rýchlosťou 10 – 100 m·s⁻¹, ktorú kov dosahuje vo vtokovom záreze za pôsobenia vysokého tlaku (tavenina sa lisuje tlakmi do 500 MPa). Počas doby tuhnutia zostáva kov pod tlakom. Veľká rýchlosť plnenia a vysoký tlak umožňujú odlievať týmto spôsobom tenkostenné a veľmi členité odliatky, ktoré v mnohých prípadoch nevyžadujú ďalšie opracovanie okrem odstránenia vtoku a otrepu.



Obrázok 1 – Príklad technológie tlakového liatia

Dôležitá je teplota liatia vzhľadom na trvanlivosť formy a dobu tuhnutia zliatiny. Keďže je nebezpečenstvo predčasného stuhnutia tenkých stien odliatku, má význam množstvo tepla, ktoré je potrebné odvieť formou do doby stuhnutia odliatku.

Treba si všimnúť obsah plynov v roztopenej zliatine. Pri rýchlom tuhnutí zostáva v zliatine aj v tuhom stave rozpustené viac plynov ako pri pomalom tuhnutí. Objemové zmeny pri chladnutí vyúsťujú do zmršťovania zliatiny. Vzhľadom na kovovú formu prevláda pri liatí pod tlakom brzdené zmrštenie, ktoré je oveľa nižšie ako voľné zmrštenie pri liatí do piesku. Tiež sú dôležité mechanické vlastnosti za vyšších teplôt, kde pri nízkych hodnotách pri zliatine by mohlo pri brzdenom zmršťovaní dochádzať k praskaniu odliatku.

Cieľom taviaceho procesu preto musí byť natanenie zliatiny s požadovanou kvalitou a to za čo možno najnižšie náklady. Kvalitná tavenina sa vyznačuje predovšetkým požadovaným chemickým zložením, čo najnižším obsahom oxidačných a neoxidačných prímiesí a nízkym naplnením. O kvalite kovu rozhoduje najmä:

- tavená surovina,
- typ a konštrukcie taviacich a udržiavacích pecí,
- spôsob vedení metalurgického procesu,
- metalurgické spracovanie taveniny a spôsob liatia.

Pri tavení a následnom odlievaní vznikajú nenávratné a návratné straty kovu.

2 Kontrola teploty taveniny

Kontrola leiacej teploty je bezpodmienečne nutná. Teplota kovu by mala byť kontrolovaná počas celého procesu výroby a to od samotného tavenia materiálu až po odlievanie súčiastky.

Na meranie teplôt pri liati hliníkových zliatin sa používajú takmer výhradne plášťové termočlánky NiCr-Ni, ktoré sú nielen dostatočne presné, ale majú aj dostatočne dlhú životnosť. Plášťové termočlánky sú vďaka ich vlastnostiam používané v chemických zariadeniach, elektrárňach, peciach, meraniach v potrubiach, pri výrobe motorov a na skúšobniach. V ohybnom tenkostennom plášťovom vedení sú uložené a zalisované termodrôty v ohňovzdornom oxide magnézia. Dobrý prestup tepla medzi plášťom a termopárom umožňuje krátky reakčný čas t a vysokú presnosť merania. Prevedenie odolné voči otrasu zaručuje dlhú životnosť. V štandardnom prevedení sú termopáry izolované od plášťa.

Pri operatívnom meraní teploty zliatín hliníka sa používajú ponorné články, v ktorých je termočlánok osadený vo vhodnej rukoväti a v ochrannom plášti Obr.2. Tento plášť je štandardne vyrobený zo špeciálneho materiálu najčastejšie zirkónu alebo je ošetrený ochranným náterom. Ochranné vrstvy a nátery sú dôležité pretože hliník pôsobí na tieto trubice agresívne a hrozilo by ich poškodenie a následné poškodenie termočlánkov. Ochrana termočlánku je funkčná pokiaľ nedôjde k mechanickému poškodeniu.



Obrázok 2 – Plášťový termočlánok NiCr-Ni v zirkónovom plášti

Dlhodobu sa teplota v peci meria termočlánkami v ochranných trubiciach z drahších ale odolnejších materiálov Obr3. Tieto trubice ponorené do taveniny sú vyrábané napríklad z grafitu, keramiky a pod..



Obrázok 3 – Kontinuálny termočlánok v grafitovej trubici

Problémom aj napriek masívnej ochrannej vrstve je postupné obalovanie ochranných plášťov agresívnymi oxidmi hliníka čo môže aj pri najmenšom poškodení v priebehu neodbornej manipulácie spôsobiť poškodenie alebo až zničenie termočlánku, čo je spojené s vysokými nákladmi na opravu alebo prípadnú výmenu. Preto je potrebná preventívna validácia termočlánku v meracom systéme nevyhnutná.

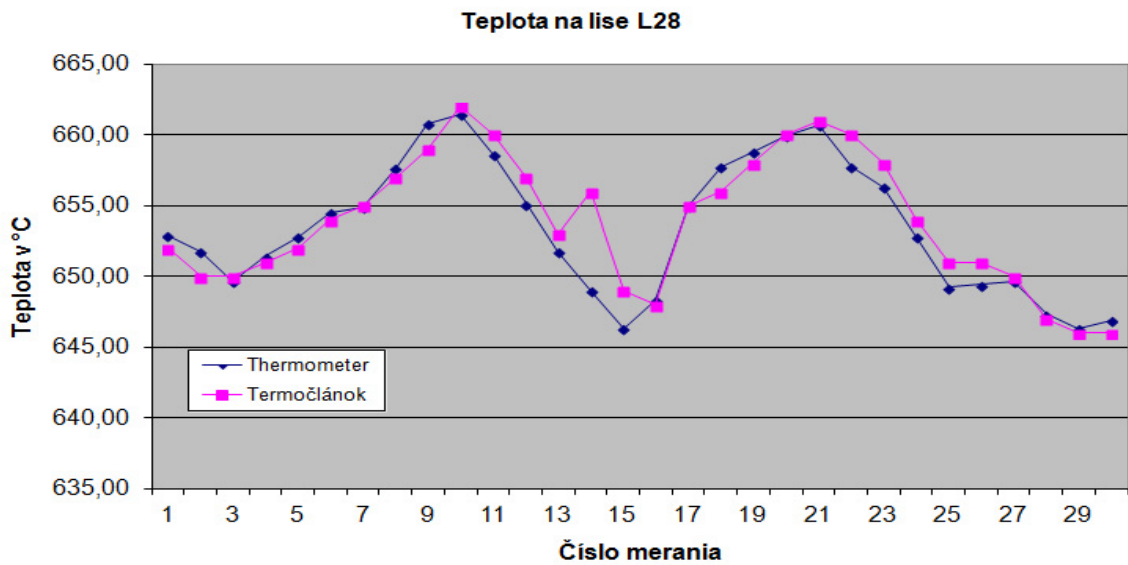
Sledovaný merací systém pozostáva s vaňového udržiavacieho agregátu, v ktorom je ponorený plášťový termočlánok Obr.4. Regulácia a zobrazovanie parametrov je zabezpečené na kontrolnom paneli.



Obrázok 4 – Skúmaný merací systém

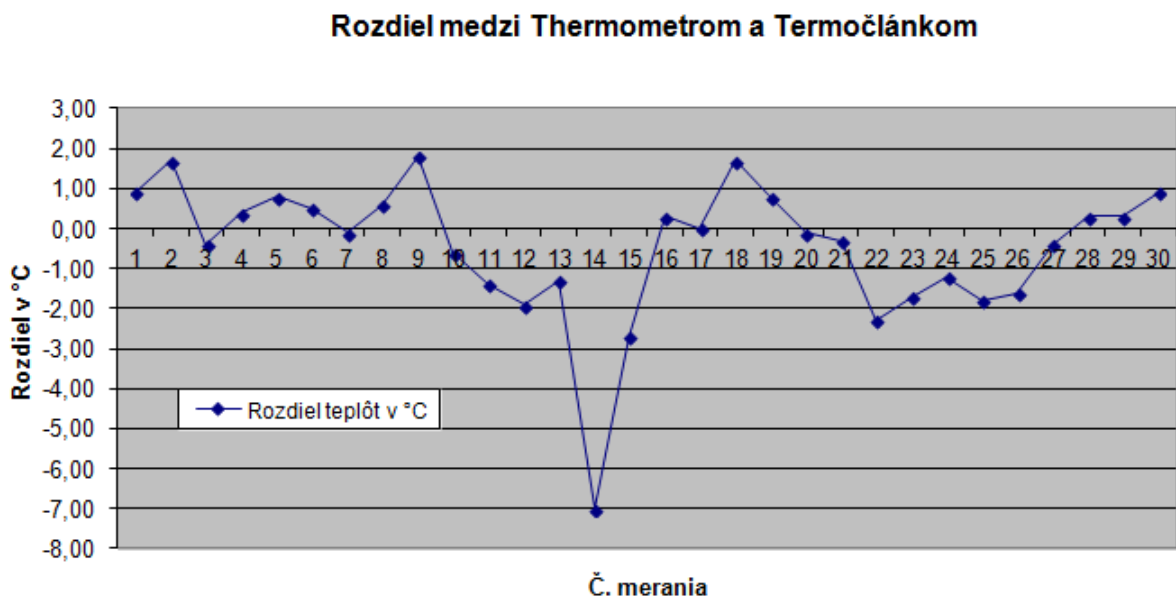
3 Postup validácie procesu merania teploty

1. Prvým krokom po odmeraní a následnom zapísaní hodnôt nameraných ručným termometrom a kontinuálnym termočlánkom bolo, že tieto údaje boli spracované do tabuľky. Z tejto tabuľky boli neskôr údaje používané vo všetkých vyhodnocovacích operáciách.
2. V ďalšom kroku sa pomocou programu Microsoft Office Excel 2007 hodnoty teplôt, ktoré boli namerané kontinuálnym termočlánkom graficky porovnali s hodnotami nameranými ručným termometrom. Toto porovnanie ukázalo, či hodnoty od termočlánku v peci, ktoré sa zobrazujú na displeji kontrolného panela zodpovedajú reálnej teplote taveniny Obr5.



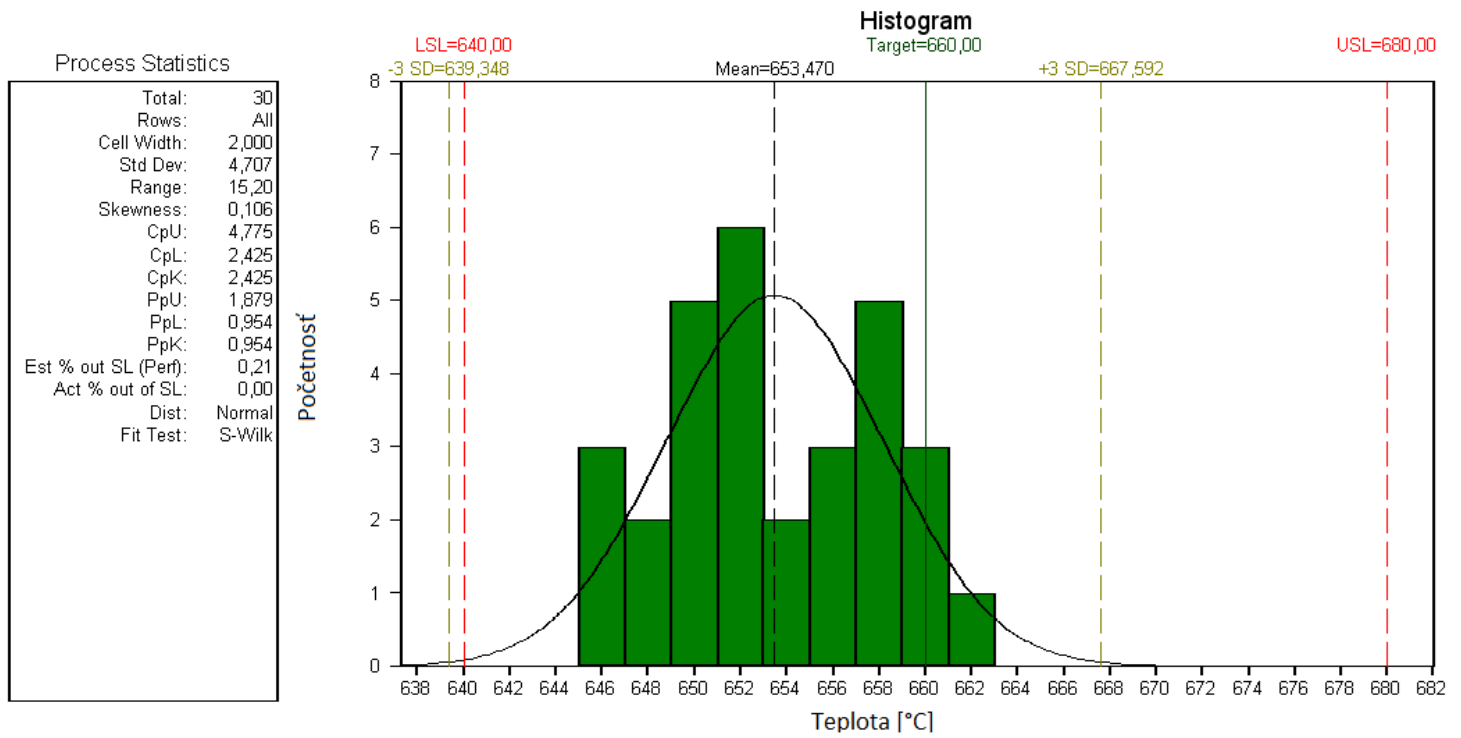
Obrázok 5 – Porovnanie teploty nameranej termometrom a termočlánkom pre kontinuálne meranie teploty

Z porovnania hodnôt Obr.6 je zrejmé, že odchýlka medzi kontinuálnym meraním a ručne nameranými hodnotami pohybuje v rozmedzí +/- 2°C. Takáto odchýlka je pri zvládnutom procese nepodstatná a preto možno považovať takéto kontinuálne meranie za dostačujúce pri monitoringu teploty taveniny. Jedno meranie vykázalo veľkú odchýlku. V procese vyhodnotenia táto hodnota bola zadefinovaná ako hrubá chyba zapríčinená operátorom a to buď zlým odčítaním z displeja alebo zlým zápisom hodnoty

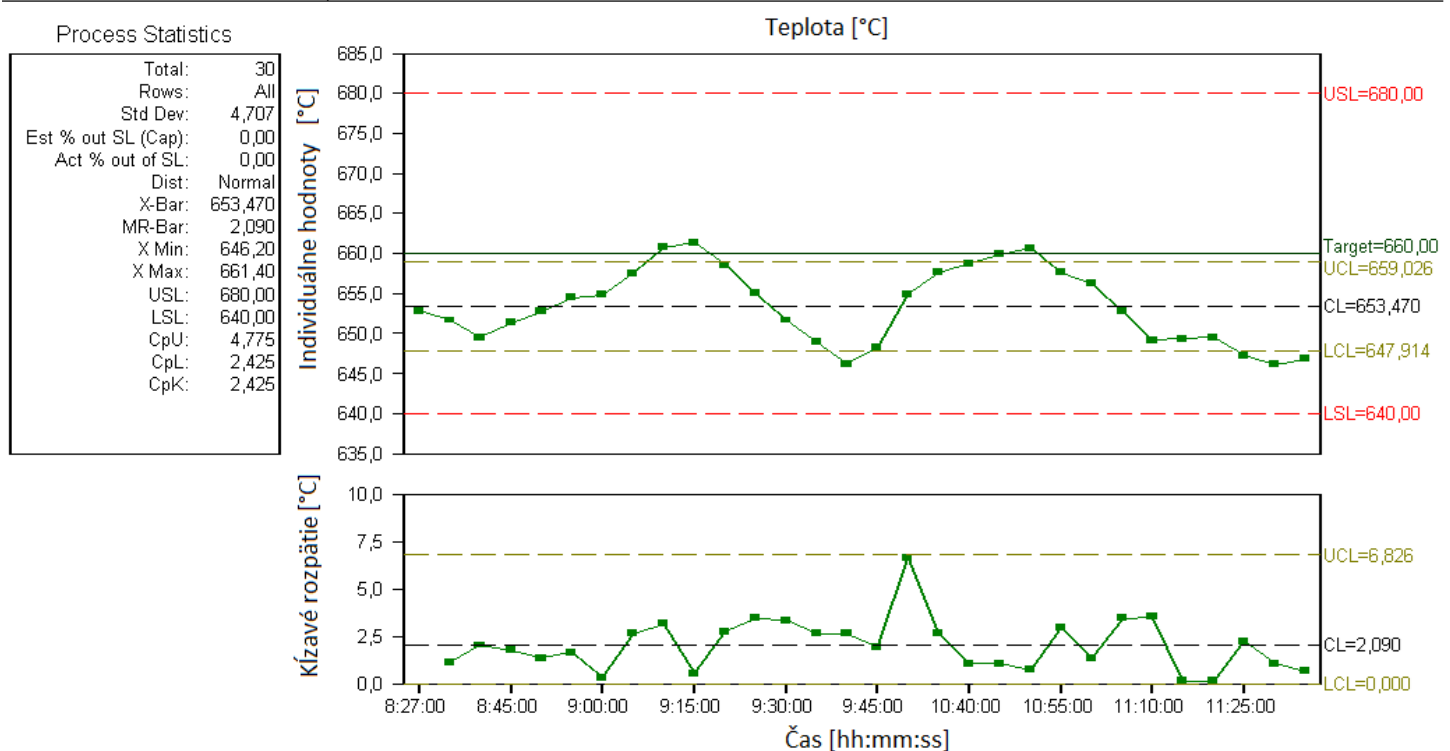


Obrázok 6 – Rozdiel nameraných teplôt

- Keď sme overili relevantnosť hodnôt, mohli sme pristúpiť k samotnej validácii prostredníctvom nástrojov SPC (Statistic process control). Údaje sa spracovali programom SPSS QI Analyst Version 3.0 do histogramu Obr.7 a regulačného diagramu Obr.8. To umožnilo vyhodnotenie výskumu, konkrétne validáciu procesu merania teploty kontinuálnym termočlánkom v danom meracom systéme.



Obrázok 7 – Rozdiel nameraných teplôt



Obrázok 8 – Rozdiel nameraných teplôt

4 Zhodnotenie validácie

Z analýzy histogramu možno určiť, že merací systém má vhodné rozloženie hodnôt a to aj napriek tomu, že poloha histogramu nie je centrovaná na stred. Tento jav ale hodnotíme nie ako chybu v procese udržiavania teploty. Bolo to spôsobené nastavením hodnoty z technologického postupu na regulačnom obvode, ktorá bola ale odlišná od štatisticky určeného stred. Celý priebeh výrobného procesu ukazuje regulačný diagram, ktorý potvrdzuje výsledky odvodené z histogramu. Dôležitým faktom je, že index spôsobilosti CpK mal dostatočnú hodnotu na to, aby bol proces merania teploty kontinuálnym termočlánkom pre tento merací systém vyhodnotený ako spôsobilý.

5 Záver

Validácia resp. overovanie relevantnosti hodnôt je pre správne rozhodnutia vo výrobe nevyhnutné. Na jednoduché a rýchle overenie spôsobilosti výrobných procesov je optimálne použiť metodiku SPC (Statistic process control), ktorá v dostatočnej miere odzrkadľuje priebeh procesu. Rovnako na jej základe možno predikovať správanie výrobných procesov a tak dostatočne pružne reagovať na nedostatky. Na základe týchto ukazovateľov bolo možné vyhodnotiť relevantnosť informácií z automatizovaného monitorovania teploty pre spoločnosť MOPS PRESS s.r.o..

9 Použitá literatúra

MICHUNA, Š., LUKÁČ, I., LOUDA, P., OČENÁŠEK, V. SCHNEIDER, H., DRÁPALA, J., KOŘENÝ, R., MIŠKUFOVÁ, A.: Aluminium materials and technologies from A to Z, Prešov: Adin, s.r.o., 2007, 613 s. ISBN 978-80-89244-18-8.

VINARCIK, E. J.: High Integrity Die Casting Processes, New York: John Wiley and Sons, 2003, 223 s. ISBN 0-471-20131-6.

RAGAN, E.: Proces liatia pod tlakom, Prešov: FVT TU Košice so sídlom v Prešove, 1997, 61 s. ISBN 80-7099-268-9.

RAGAN, E. a kol.: Liatie kovu pod tlakom, Prešov: TUKE FVT so sídlom v Prešove, 2007, 383s. ISBN 978-80-8073-979-9.

BOLIBRUCHOVÁ, D.: Zlievarenská technológia, Žilina: Georg, 2010, 247 s. ISBN 978-80-89401-14-7.

Šebesta - služby slevárnám s.r.o.: Tlakové lití v praxi, Firemná literatúra.

Využití Linguistic Fuzzy-Logic Control pro řízení technologických systémů Use of Linguistic Fuzzy-Logic Control for technological systems control

FARANA, Radim¹, WALEK, Bogdan², JANOŠEK, Michal³ & ŽÁČEK, Jaroslav⁴

¹ prof. Ing. CSc., ✉ Ostravská univerzita v Ostravě, Katedra informatiky a počítačů, 30. dubna 33, 701 03 Ostrava, 💻 radim.farana@osu.cz

✉ Politechnika Świetokrzyska Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, Poland, 💻 farana@tu.kielce.pl

✉ VŠB-TU Ostrava, Katedra automatizační techniky a řízení, 17. Listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, 💻 radim.farana@vsb.cz

² RNDr. PhD., ✉ Ostravská univerzita v Ostravě, Katedra informatiky a počítačů, 30. dubna 22, 701 03 Ostrava, 💻 bogdan.walek@osu.cz,

³ RNDr. PhD., ✉ Ostravská univerzita v Ostravě, Katedra informatiky a počítačů, 30. dubna 22, 701 03 Ostrava, 💻 michal.janosek@osu.cz,

⁴ RNDr. PhD., ✉ Ostravská univerzita v Ostravě, Katedra informatiky a počítačů, 30. dubna 22, 701 03 Ostrava, 💻 jaroslav.zacek@osu.cz,

Abstrakt: příspěvek popisuje využití systému Linguistic Fuzzy-Logic Control, vyvinutého na Ostravské univerzitě v Ostravě pro řízení technologických systémů. Využití znalostí expertů, snadno aplikovatelné touto technikou, umožňuje velmi jednoduše sestavit i velmi komplikovanou strategii řízení s velmi dobrými výsledky. Postupy vypracované v Laboratoři inteligentních systémů řízení Ostravské univerzity v Ostravě jsou prezentovány na řízení modelů helikoptéry a magnetické levitace, které reprezentují rychlé regulované soustavy s velmi malým tlumením. Sestavené regulátory využívající metodiku LFLC u nich dosahují velmi dobré výsledky.

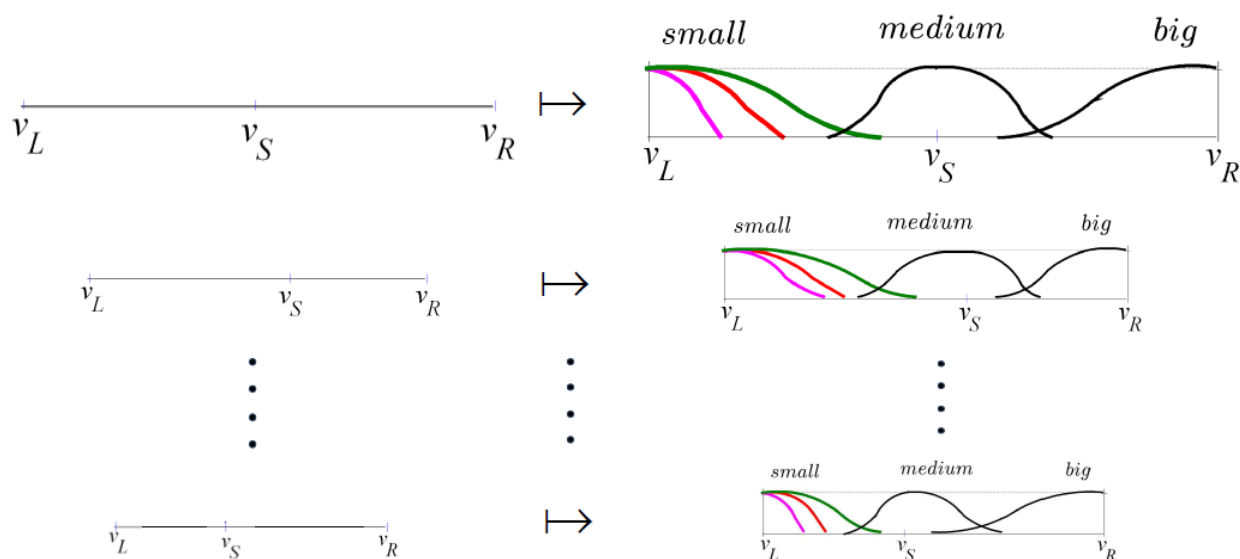
Klíčová slova: fuzzy logika, řízení, Linguistic Fuzzy-Logic Control, technologický systém

1 Úvod

Fuzzy logika byla objevena Prof. Zadehem [Zadeh 1965] a s úspěchem použita pro popis systémů s neurčitostmi [Zadeh a Kacprzyk 1992] v šedesátých letech dvacátého století. Tato technika byla následně využita také pro vytváření systémů řízení. Nyní je fuzzy řízení již přijímáno jako standardní nástroj pro řízení technologických systémů. Obvykle je využívána technika postavená na fuzzy IF-THEN pravidlech, obvykle v podobě poprvé použité Mamdanim [Mamdani a Assilian 1975], nebo Takagim a Sugenum [Takagi a Sugeno 1985]. Úspěch fuzzy logického řízení je založen na skutečnosti, že popis reálného systému je obvykle alespoň zčásti neurčitý. Tyto neurčitosti vznikají z mnoha důvodů, velké složitosti regulované soustavy, nedostatku znalostí o regulované soustavě, lidský faktor v řízení, a další, obvykle v kombinaci několika vlivů.

Speciální systém fuzzy řízení byl vyvinut na Ostravské univerzitě v Ostravě prof. Novákem a jeho týmem [Novák 1995, Novák a Perfilieva 1999, Novák 2010] na základě slovního popisu systému. Linguistic Fuzzy Logic Controller (LFLC) je výsledkem aplikace formální teorie fuzzy logiky v širším smyslu (FLb). Základním konceptem FLb jsou hodnotící jazykové výrazy a jazykové popisy. Popisné (jazykové) výrazy jsou přírodní jazykové výrazy jako malý, střední, velký, asi třicet pět let, zhruba tisíc, velmi krátká, více či méně hluboký, ne příliš vysoký, zhruba teplé nebo horké médium, zhruba silný, zhruba středně významné a mnoho dalších. Vytváří malou, ale velmi důležitou, složku přirozeného jazyka, protože jsme je zvyklí použít v běžném vyjadřování, aby bylo možné hodnotit jevy kolem nás. Hodnotící výrazy mají důležitou roli v našem životě, protože nám pomáhá určit naše rozhodnutí, pomáhají nám v učení a porozumění, a mnoho dalších aktivitách.

Jednoduché hodnotící jazykové výrazy mají obecnou podobu <linguistic modifier> <TE-adjective> (kde <TE-adjective> je jedním z přídavných jmen "malé - sm, střední - me, big - bi" nebo "zero - ze ". <linguistic modifier> je příslovce, jako je "extrémně - ex, výrazně - si, velmi - ve, spíše - ra, více či méně - ml, přibližně - ro, přibližně zhruba - qr, velmi zhruba - vr"), viz obrázek 1. LFLC je dobrým nástrojem pro definování strategie řízení, můžeme ho použít i pro řízení rychlých technologických procesů se vzorkovací periodou 0,01 [s] nebo méně. Příspěvek prezentuje dva příklady citlivých nelineárních modelů, jako je model magnetické levitace a model vrtulníku, které představuje velmi rychlé systémy řízení. Tyto modely jsou velmi užitečné pro ověření návrh systému řízení, protože jejich popis a matematické modely jsou k dispozici, např. [Humusoft 2014a] a [Humusoft 2014b].



Obrázek 1 – Základní principy určení hodnot (extrémně malý, velmi malý, malý, střední a velký) jako funkce přiřazující ke každému kontextu $w \in W$ specifickou fuzzy množinu [Novák 2010]

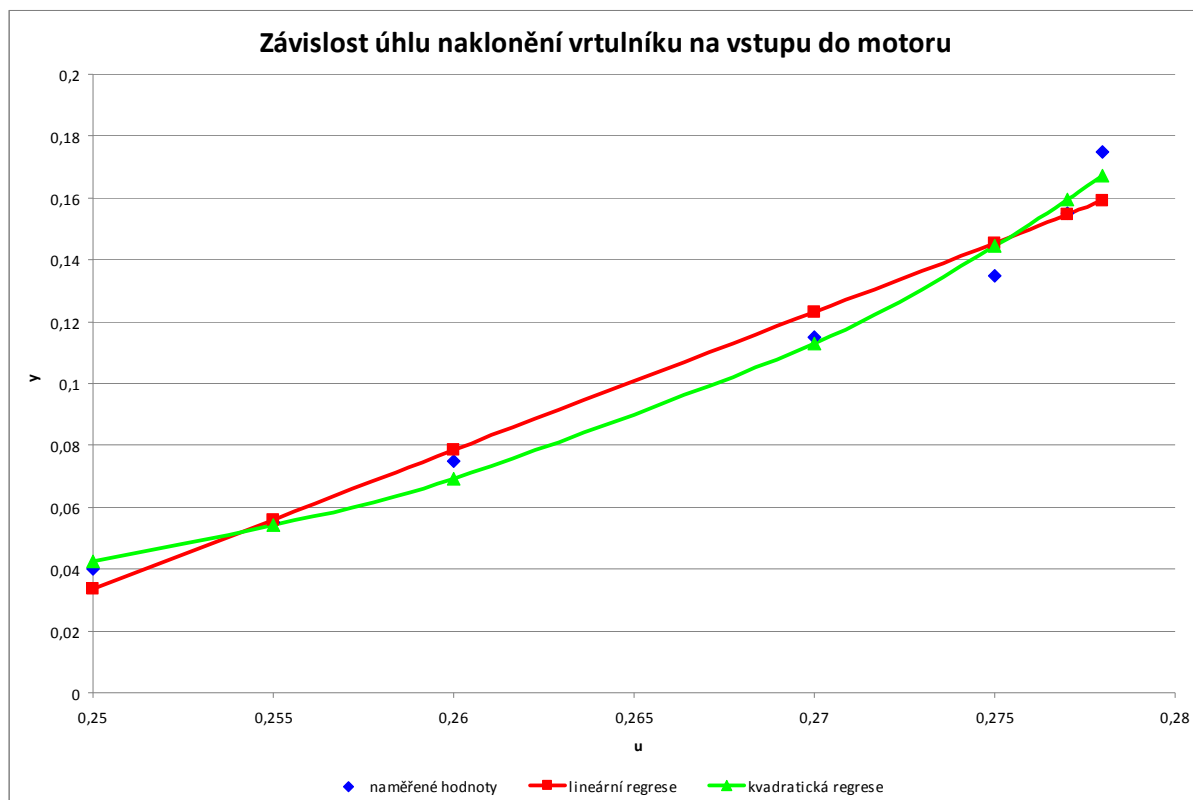
2 Model vrtulníku

Model vrtulníku představuje citlivý dvourozměrný systém řízení – řízeny jsou úhly náklonu a azimutu a je možné je řízena odděleně. Chcete-li získat matematický model řízení úhlu náklonu vrtulníku, můžeme použít standardní metody identifikace na základě přechodové charakteristiky. Obrázek 2 ukazuje statickou charakteristiku resp. závislost úhlu náklonu vrtulníku na vstupu do motoru. Vidíme, že systém je sice nelineární, ale v okolí pracovního bodu můžeme provést linearizaci. Obrázek 3 pak ukazuje přechodovou charakteristiku, jako odpověď na vstupní hodnotu skoku $u = 0,2$ a odpovídající přechodové charakteristiky dvou matematických modelů, získaných standardními identifikačními metodami. Pro proporcionální systém druhého řádu:

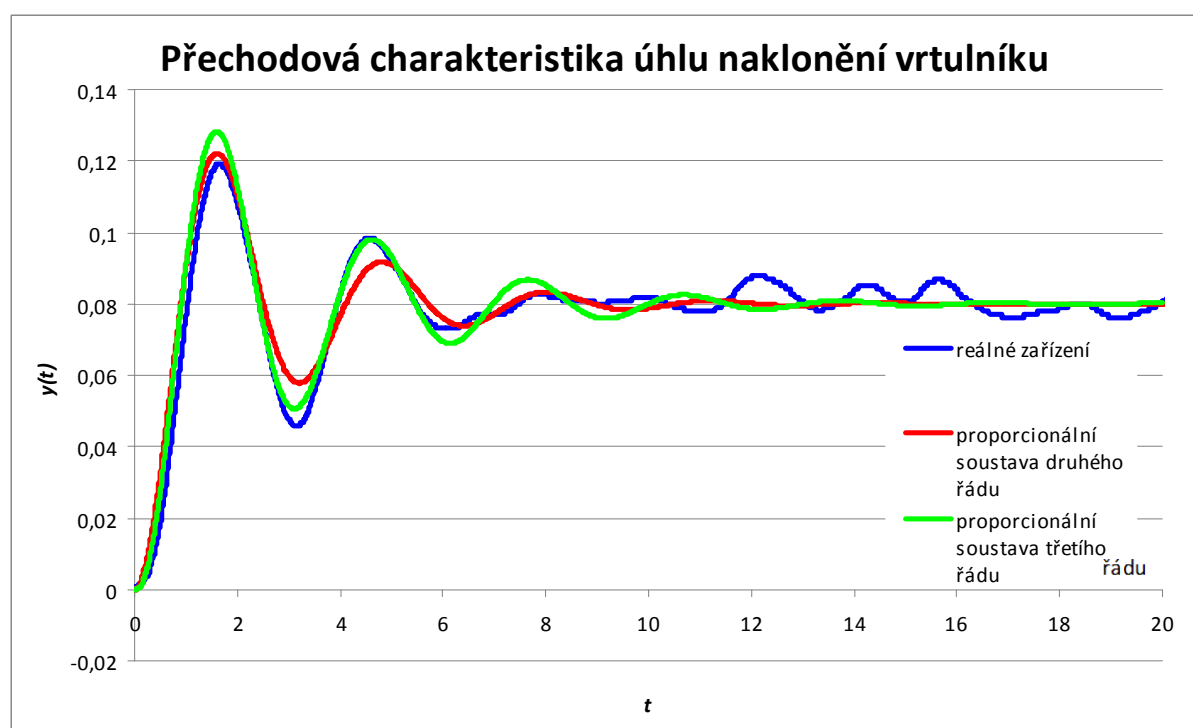
$$0,0625\ddot{y}(t) + 0,05\dot{y}(t) + 0,25y(t) = u(t), \quad (1)$$

a proporcionální systém třetího řádu, který dává přesnější shodu s chováním reálného modelu a proto bude použit pro další zkoumání:

$$0,005\ddot{y}(t) + 0,060025\dot{y}(t) + 0,0588\ddot{y}(t) + 0,25y(t) = u(t), \quad (2)$$



Obrázek 2 – Statická charakteristika úhlu naklonění vrtulníku



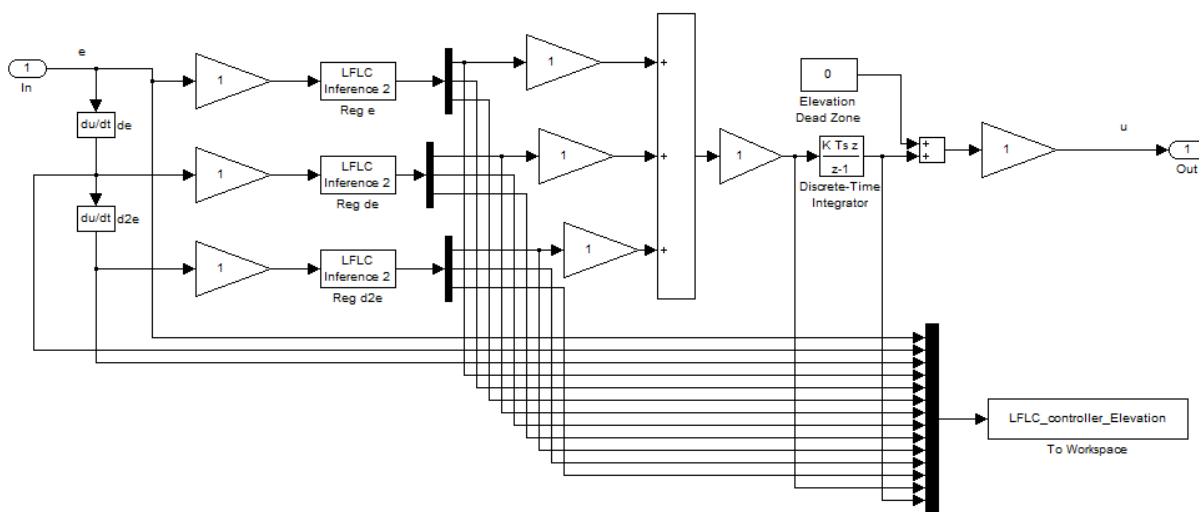
Obrázek 3 – Přechodová charakteristika skoku polohy úhlu naklonění vrtulníku a matematické modely jeho chování

Typickým prvním řešeným problémem je polohové řízení úhlu naklonění vrtulníku. Můžeme velmi jednoduše pomocí LFLC definovat strategii řízení pro reakci na odchylku úhlu naklonění vrtulníku, viz obrázek 4. Inferenční blok LFLC propojuje LFLC regulátor definovaný jako monotónní následujícím souborem pravidel, viz tabulka 1.

Tabulka 1: Soubor pravidel LFLC regulátoru

vstup výstup	vstup výstup
"-exbi" "-exbi"	"exsm" "exsm"
"-sibi" "-sibi"	"sism" "sism"
"-vebi" "-vebi"	"vesm" "vesm"
"-mlbi" "-mlbi"	"mlsm" "mlsm"
"-robi" "-robi"	"rosm" "rosm"
"-qrbi" "-qrbi"	"qrsm" "qrsm"
"-vrbi" "-vrbi"	"vrsm" "vrsm"
"-rabi" "-rabi"	"rasm" "rasm"
"-tyme" "-tyme"	"tyme" "tyme"
"-rasm" "-rasm"	"rabi" "rabi"
"-vrsm" "-vrsm"	"vrbi" "vrbi"
"-qrsm" "-qrsm"	"qrbi" "qrbi"
"-rosm" "-rosm"	"robi" "robi"
"-mlsm" "-mlsm"	"mlbi" "mlbi"
"-vesm" "-vesm"	"vebi" "vebi"
"-sism" "-sism"	"sibi" "sibi"
"-exsm" "-exsm"	"exbi" "exbi"
"ze" "ze"	

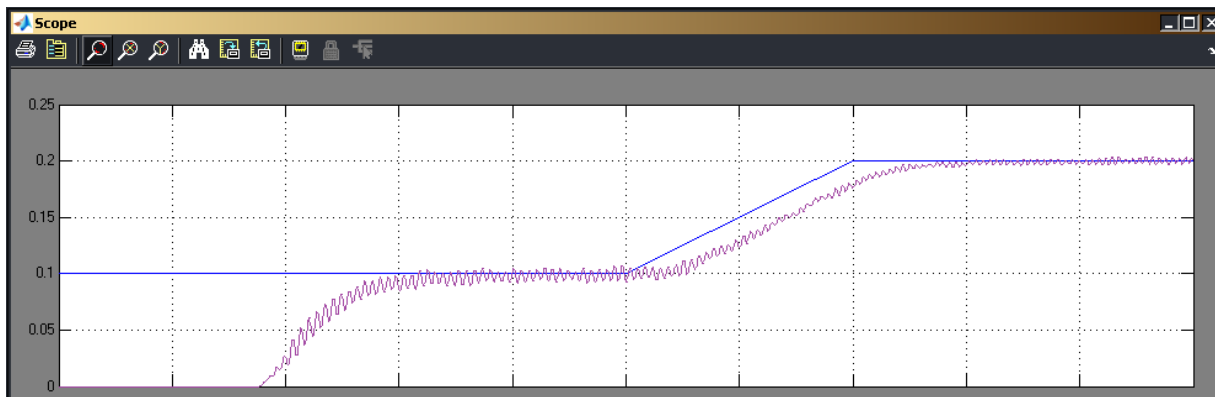
Je zřejmé, že výsledky získané použitím regulátoru pracujícího pouze s regulační odchylkou nejsou použitelné. Musíme zahrnovat reakci na derivaci odchylky (první a druhou). Analýzou přechodové charakteristiky zjistíme, že první derivace regulační odchylky nabývá hodnot stokrát vyšší než odchylka a druhá derivace hodnot stokrát vyšší než první derivace. To je způsobeno hodnotou vzorkovací periody $T = 0,01$ [s]. Následkem toho nemůžeme pokračovat v sestavování klasického fuzzy regulátoru založeného na třech vstupních hodnotách – regulační odchylce a její první a druhé derivaci. V tomto případě musíme vyvinout speciální strategii, na základě vícenásobného použití regulátorů LFLC, viz obrázek 4.



Obrázek 4 – Výsledný LFLC regulátor pro řízení úhlu naklonění vrtulníku

Následně je možné snadno změnit strategii řízení, například nastavit velmi malou reakci na malé hodnoty odchylky a velmi velkou reakci na velkou odchylku a tak dosáhnout požadovanou polohu vrtulníku rychleji.

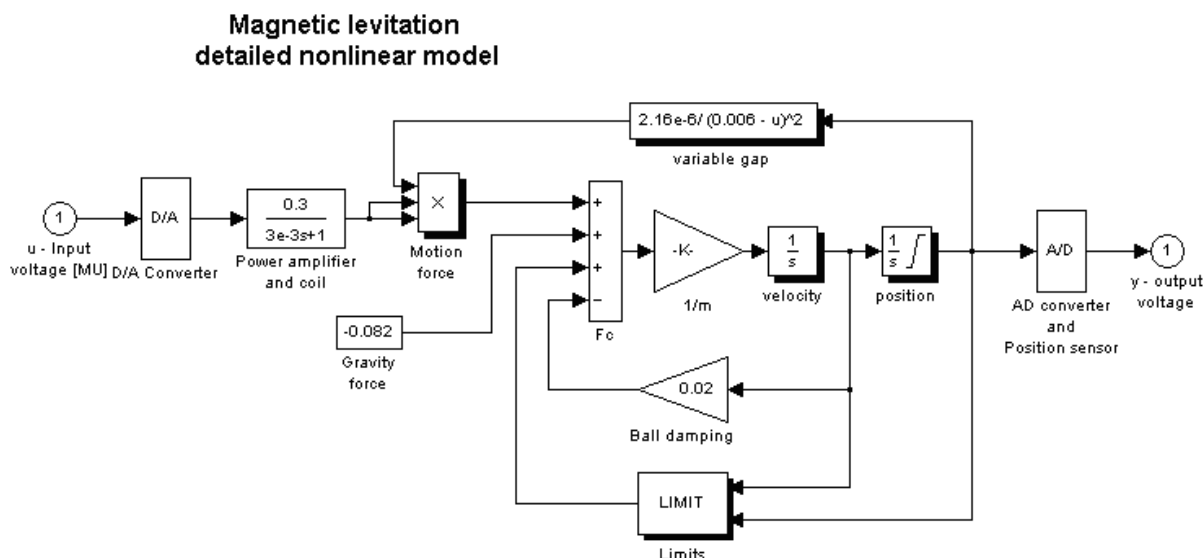
Obrázek 5 ukazuje výsledek řízení modelu vrtulníku. Je zřejmé, že LFLC regulátor je použitelný pro polohové řízení, ale není použitelný pro programové řízení. To samozřejmě odpovídá očekávání, protože v uzavřené smyčce se nachází pouze jeden integrátor.



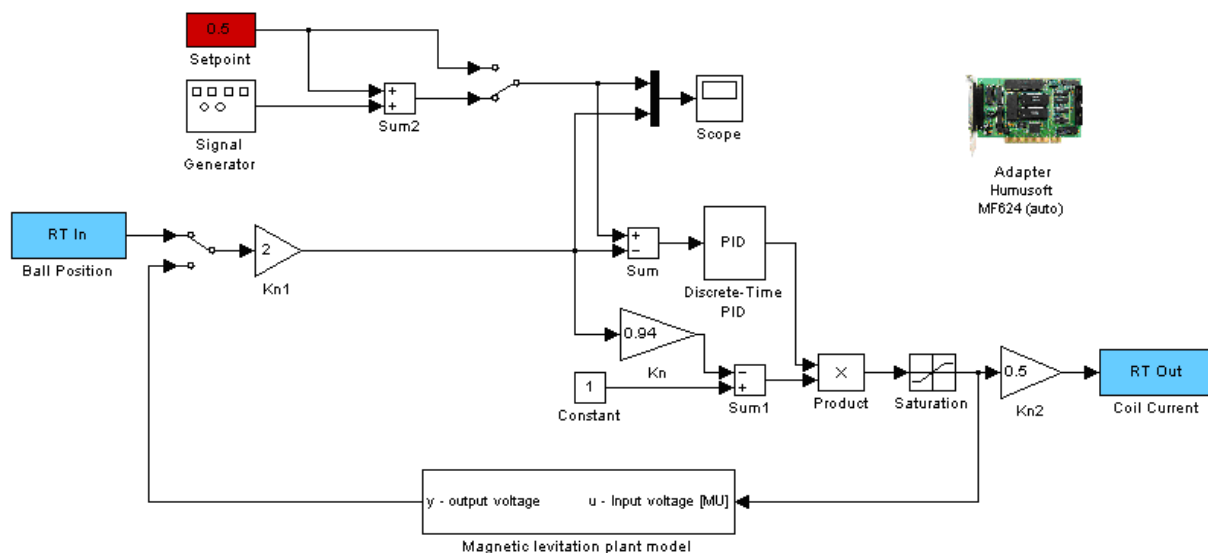
Obrázek 5 – Průběh řízení úhlu naklonění vrtulníku

3 Model magnetické levitace

Magnetická levitace je velmi složitý nelineární systém. Pro získání matematického modelu můžeme použít klasické identifikační metody, ale my máme k dispozici velmi dobrý matematický model vytvořený výrobcem [Humusoft 2014b], viz obrázek 6. Pro porovnání výsledků použijeme jako referenční PID regulátor a průběh žádané veličiny, vytvořený výrobcem v ukázkovém příkladu, viz obrázek 7.



Obrázek 6 – Simulační model modelu magnetické levitace



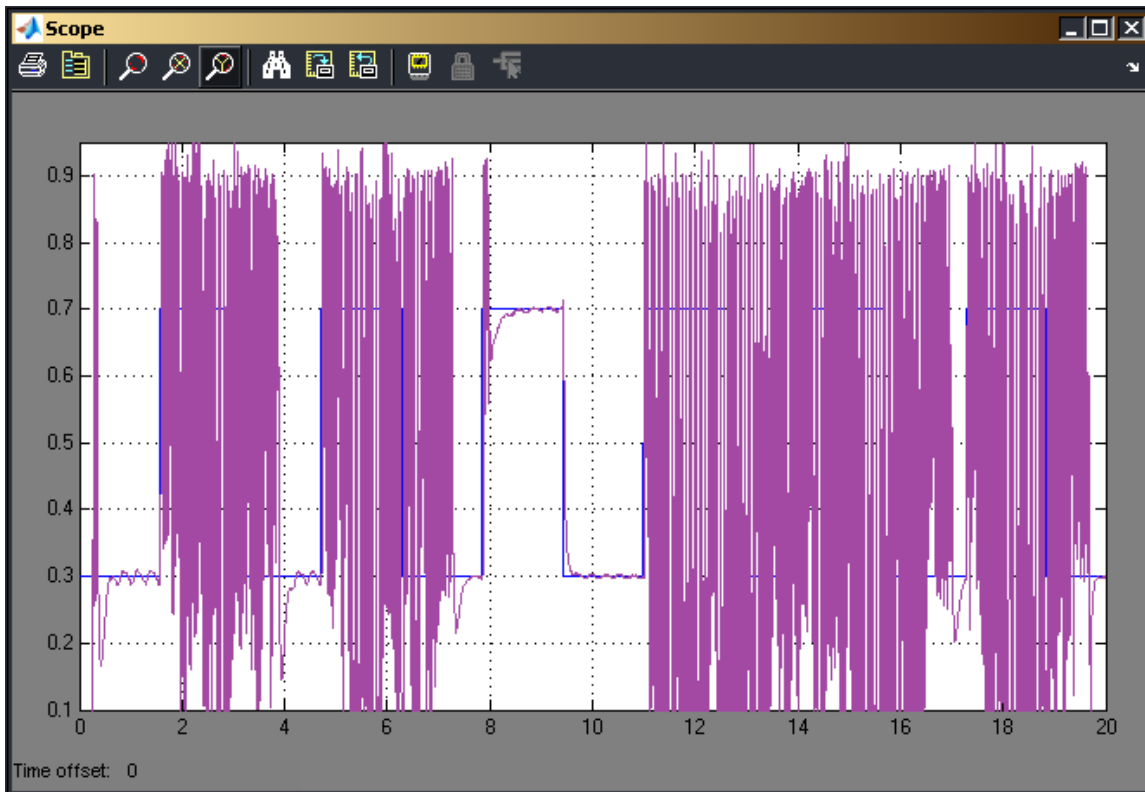
Obrázek 7 – PID řízení modelu magnetické levitace, vytvořené výrobcem

Budeme používat obdobné principy konstrukce LFLC regulátoru, ověřené na modelu vrtulníku, s kontexty popsány v tabulce 2.

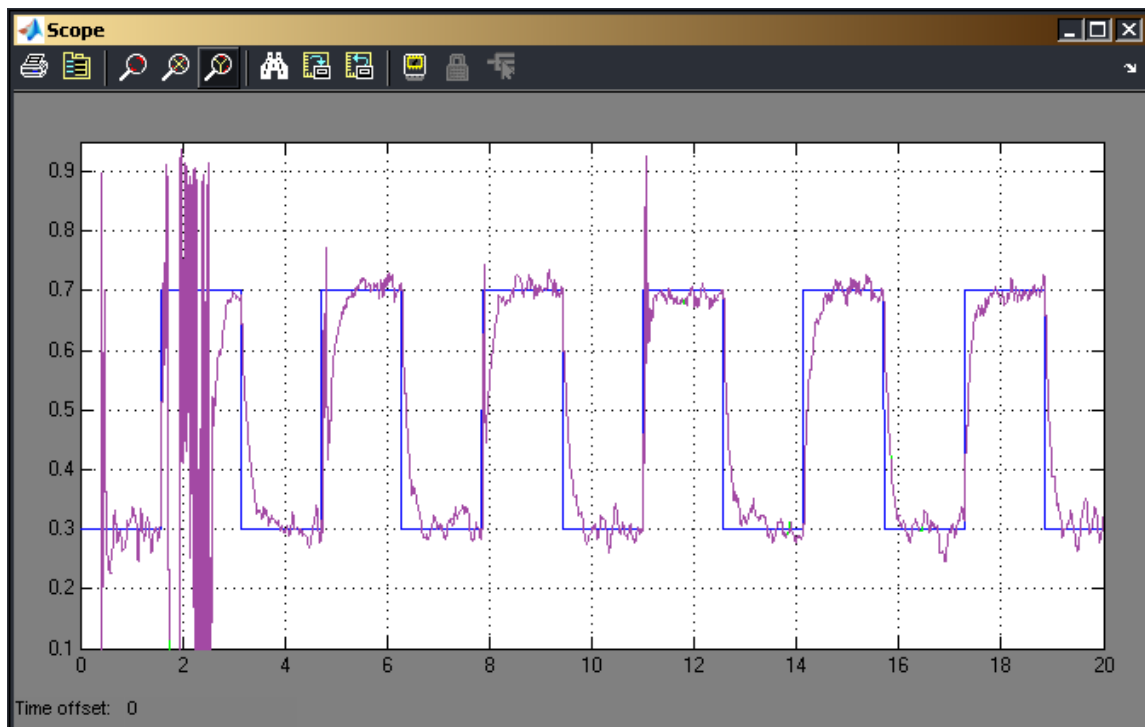
Tabulka 2: Kontexty LFLC regulátoru magnetické levitace

Vstupní hodnota	Rozsah vstupních hodnot	Koeficient přenosu	Rozsah výstupních hodnot
de	$-50 \div 50$	1	$-50 \div 50$
e	$-0,5 \div 0,5$	10	$-5 \div 5$
d^2e	$-40000 \div 40000$	0,03	$-1200 \div 1200$

Obrázky 8 a 9 porovnávají výsledek řízení pro požadovaný průběh polohy levitujícího objektu, představující posloupnost skokových změn polohy. Vidíme, že objekt magnetické levitace je velmi citlivý a řízení procesu pomocí PID regulátoru je často nestabilní. Řídicí systém pouze jednou stabilizoval požadovanou pozici blíže k elektromagnetu. Výsledek LFLC řízení je mnohem lepší. Problém se stabilitou byl kompenzován, převážně díky vlastnostem LFLC řízení, vhodně sestaveného souboru pravidel a omezení akční veličiny na jednotlivých složkách regulátoru.



Obrázek 8 – Řízení modelu magnetické levitace pomocí PID regulátoru



Obrázek 9 – Řízení modelu magnetické levitace pomocí LFLC regulátoru

4 Závěr

Prezentované příklady LFLC řízení byly získány na Ostravské univerzitě v Ostravě v rámci řešení podpory European Regional Development Fund, při řešení projektu IT4Innovations Centre of Excellence (CZ.1.05/1.1.00/02.0070) a v rámci řešení projektu Studentské grantové soutěže (SGS15/PřF/2014) za účasti studentů, podporovaný Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR. Z dosažených výsledků je zřejmé, že moderní matematické metody, jako je fuzzy řízení, jsou použitelné pro řízení rychlých technologických procesů s periodou vzorkování 0,01 [s] nebo kratší. Systém Linguistic Fuzzy-Logic Control, vyvinutý na Ostravské univerzitě, je velmi užitečný nástroj pro popis strategie řízení. Prezentované výsledky ukázaly, jak použitá technologie může pomoci snadno popsat strategii řízení od včetně řízení technologických systémů. Tato technologie a reálné modely jsou využívány jako podklad pro problémově orientovanou výuku na Katedře informatiky a počítačů, Přírodovědecké fakulty pro studenty magisterských studijních programů a jejich společně i individuální projekty. Studenti se naučí, jak definovat strategii řízení a ověří si ji na reálném modelu magnetické levitace. Po dokončení těchto projektů jsou studenti schopni definovat strategie řízení založené na LFLC pro jakýkoli podobný řízený systém. Jsou také schopni porovnat získané výsledky s různými strategiemi fuzzy řízení, např. [Takosoglu aj. 2012] nebo [Godoy aj. 2013].

5 Použitá literatura

- GODOY, W. F., DA SILVA, I. N., GOEDEL, A., PALÁCIOS, R.H.C. 2013. Fuzzy logic applied at industrial roasters in the temperature control. In *11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, IMS 2013*, Sao Paulo, Brazil, 2013, pp. 450-455.
- HUMUSOFT 2014a. *CE 150 Helicopter Model* [on-line], 2014 [cit 2014-04-18]. Available on web: <http://www.humusoft.cz/produkty/models/ce150/>
- HUMUSOFT 2014b. *CE 152 Magnetic Levitation Model* [on-line], 2014 [cit 2014-04-18]. Available on web: <http://www.humusoft.cz/produkty/models/ce152/>.
- MAMDANI, E. a ASSILIAN, S. 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic control. *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, 1975, pp. 1–13.
- NOVÁK, V. 1995. Linguistically Oriented Fuzzy Logic Control and Its Design. *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 12, 1995, pp. 263-277.
- NOVÁK, V. 2010. Genuine Linguistic Fuzzy Logic Control: Powerful and Successful Control Method. *Computational Intelligence for Knowledge-Based Systems Design*, Hüllermeier, E. and Kruse, R. and Hoffmann, F. (eds.), Springer, Berlin, 2010, pp. 634 - 644.
- NOVÁK, V. a PERFILIEVA, I. 1999. Evaluating Linguistic Expressions and Functional Fuzzy Theories in Fuzzy Logic. *Computing with Words in Information/Intelligent Systems I*, L. A. Zadeh a J. Kacprzyk (eds.), Springer-Verlag, Heidelberg, 1999, pp. 383-406.
- TAKAGI, T. a SUGENO, M. 1985. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybern*, Vol. 15, 1985, pp. 116–132.
- TAKOSOGLU, J. E., LASKI, P. A. a BLASIAK, S. 2012. A fuzzy logic controller for the positioning control of an electro-pneumatic servo-drive. *Journal of Systems and Control Engineering*, volume 226, Issue 10, November 2012, pp. 1335-1343.
- ZADEH, L. A. 1965. Fuzzy sets. *Information & Control*, vol. 8, 1965, pp. 338-353.
- ZADEH, L. A. a KACPRZYK, J. 1992. *Fuzzy Logic for the Management of Uncertainty*. J. Wiley & Sons, New York 1992.

Positioning Accuracy of Telescopic Rod Type PKS

GRÚBEROVÁ, Michaela¹ & VAJSÁBEL, Michal²

¹ Ing, ✉ STU in Bratislava, Faculty of Mechanical Engineering, Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava SR, 📧 miachaela.gruberova@stuba.sk, 🌐 URL www.sjf.stuba.sk

² Ing, 📧 e-mail michal.vajsabel@stuba.sk, 🌐 URL www.sjf.stuba.sk

Abstract: Nowadays, parallel kinematic structures such as Tricept come to the forefront in the field of machine tools. Parallel kinematic structures offer some asset, for instance high structural rigidity, better payload-to-weight ratio, high dynamic capacities and high accuracy. The main task in the area of quality assurance is to identify and evaluate the various factors that influence the final product quality. These factors are e.g. the surrounding environment, mechanical inaccuracy of the Tricept, inaccuracy of data reading and the uncertainty of the coordinate measuring machine Leica.

The basic performance characteristics include one-way positioning and distance accuracy and repeatability, as well as track accuracy, track repeatability, track speed and position drift. This paper briefly describes the methods of testing the mentioned characteristics of the Tricept type parallel kinematic structure. The experiment is suggested according the standard ISO 230-2:2006.

Keywords: Tricept, parallel kinematic structure, quality assurance, repeatable positioning accuracy

1 Parallel kinematic structure

Kinematic structures are divided into serial, parallel and hybrid. The main objective of the kinematic structure is a definite movement and makes the prescribed operation. They are joined into one unit and perform movement either rotational or translational.[1]

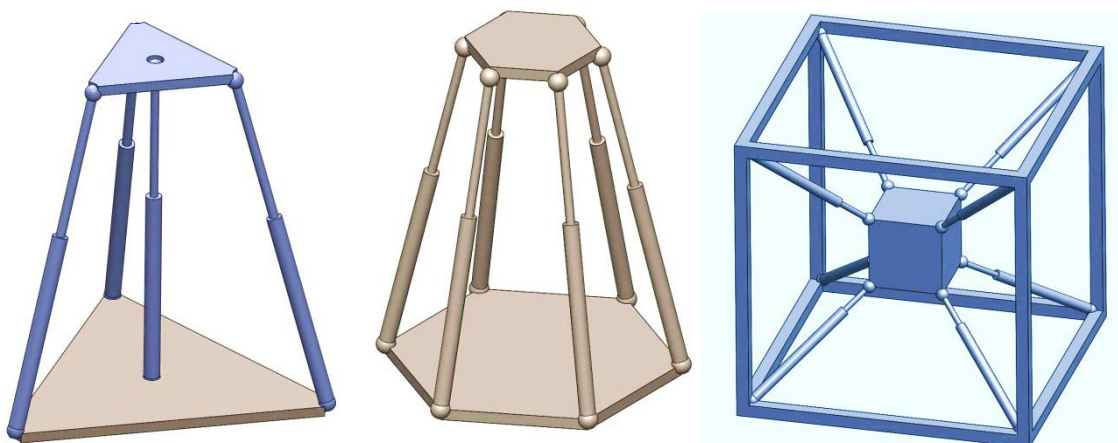


Figure 1 – Types of parallel kinematic structure

a) tripod, b) hexapod, c) octapod

Parallel kinematic structure is mounted on the machine platform which is suspended on remote variable-screwed and articulated arms (Fig. 1). With these arms can be platform

rotated and oriented, as the requested operation requires. A parallel kinematic structure comprises at least two kinematic chains being functionally arranged in parallel. Each of the two kinematic chains has, at a moveable end thereof, at least one degree of freedom, and comprising a passive anti-planar joint arrangement having a translational degree of freedom and two rotational degrees of freedom. Each anti-planar joint arrangement has an input section and an output section. At least one of the kinematic chains comprises a planar joint arrangement having at least one of at least one translational degree of freedom and a rotational degree of freedom, the planar joint arrangement having an output section. Further, the planar joint arrangement is adapted for active movements in at least one of its degrees of freedom. The input section of the anti-planar joint arrangement and the output section of the respective planar joint arrangement are coupled. The parallel kinematic structure further comprises a moveable end-effector section coupled with the output sections of the anti-planar joint arrangements.[1]

The advantages of parallel kinematic structure (PKS):

- parts of the machine are least stressed bending moment (frame)
- High operating speed of the machine
- acceleration of the driven machine is variable
- low weight of moving parts
- use of standard components
- high measuring accuracy
- repeatability of individual components within the machine

Disadvantages of parallel kinematic structure (PKS):

- measuring system for the required accuracy is costly
- effect of temperature on metal structure
- complicated management system - the high cost
- manage necessary for them six-axle linear motion
- little space for tool change

2 Tricept

For the design of parallel kinematic machines (PKM), it is important to make an appropriate choice for the geometrical parameters in order to fulfil the customers' requirements. Unfortunately, one cannot start with the design of new machines unless one can cope with a number of issues that are related to the analysis of parallel machines. In particular, this includes the determination of the size, shape, and properties of the workspace. In the last two decades, many scientists have been working on different aspects of analysis. Especially for spatial parallel robots, most results can only be determined numerically due to the inherent complexity of PKMs. But mostly these results cannot be used to solve the design problem, i.e. how one has to choose the parameters so that the resulting machines have the desired properties. [6, 7]

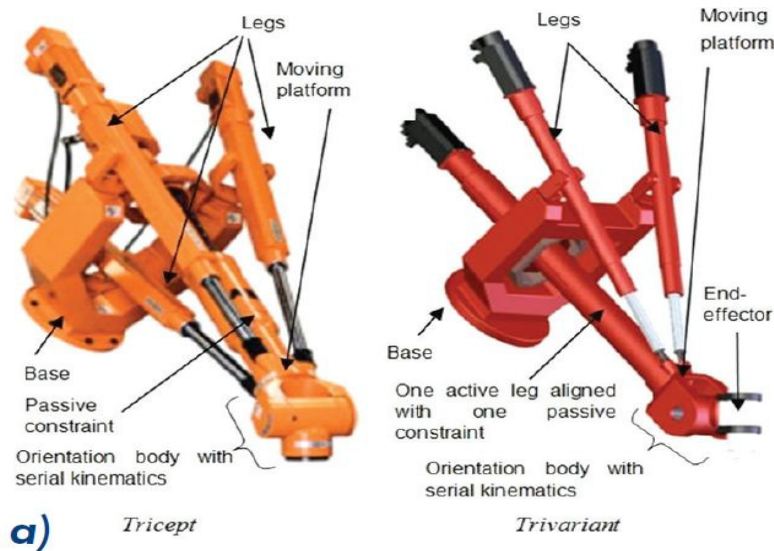


Figure 2 – hybrid PKM Tricept – difference between Tricept and Trivariant [2]

Hybrid kinematic structures are a combination of series and parallel kinematic structures (Fig. 2). It provides new opportunities in design and allows them to improve the characteristics of parallel kinematic structures (PKS). There are a large number of designs and construction of machines that are used in industry for high-speed machining, welding, plasma cutting, laser cutting, measuring, control and handling. [7]

Tricept is one of the hybrid PKS, where the positioning structure comprises from a parallel kinematics, which is connected to an end effector, which is represented by a serial KS and removes three degrees of freedom. Tricept is composed of a fixed part of the so-called stable platform, on which are mounted by pivot joints three telescopic rods and one central rod. At the opposite end of the rods is movable platform for which it is possible to place a serial kinematics or different actuators. The central rod passes through the platforms. It is attached with the swivel to the moveable and stable platform. Three telescopic rods are removable using a ball screw and are driven by three autonomous own servomotors. Joints allow rotational movement of the telescopic rod to the stable platform.

Central rod axis always passes through the central point. Tricept is positioned vertically on a skeleton.



Figure 4 – Tricept at STU

The actuators are controlled via frequency converter Movidrive and are stopped using the engine, which includes an integrated brake. The system is provided by programmable MOVIPLC. Programming of logic of machine is provided by SEW - Eurodrive through utility software Movitools MotionStudio. The software provides necessary diagnostics for calibration and operation and it is used to manage and communicate. At the Faculty of Mechanical Engineering STU in Bratislava is a machine robot type Tricept with the following parameters:

PKS type Tricept with 3 degrees of freedom
load: 30 kg
maximum length of the telescopic rod ejection: ± 300 mm
angle of rotation of the central rod to the stable platform: $\pm 45^\circ$
actuation by: synchronous servomotor SEW CMP63M
power $P = 400$ W
rotational frequency: $N = 4\,500 \text{ min}^{-1}$, 75 s^{-1}
integrated encoder resolver: RH1M

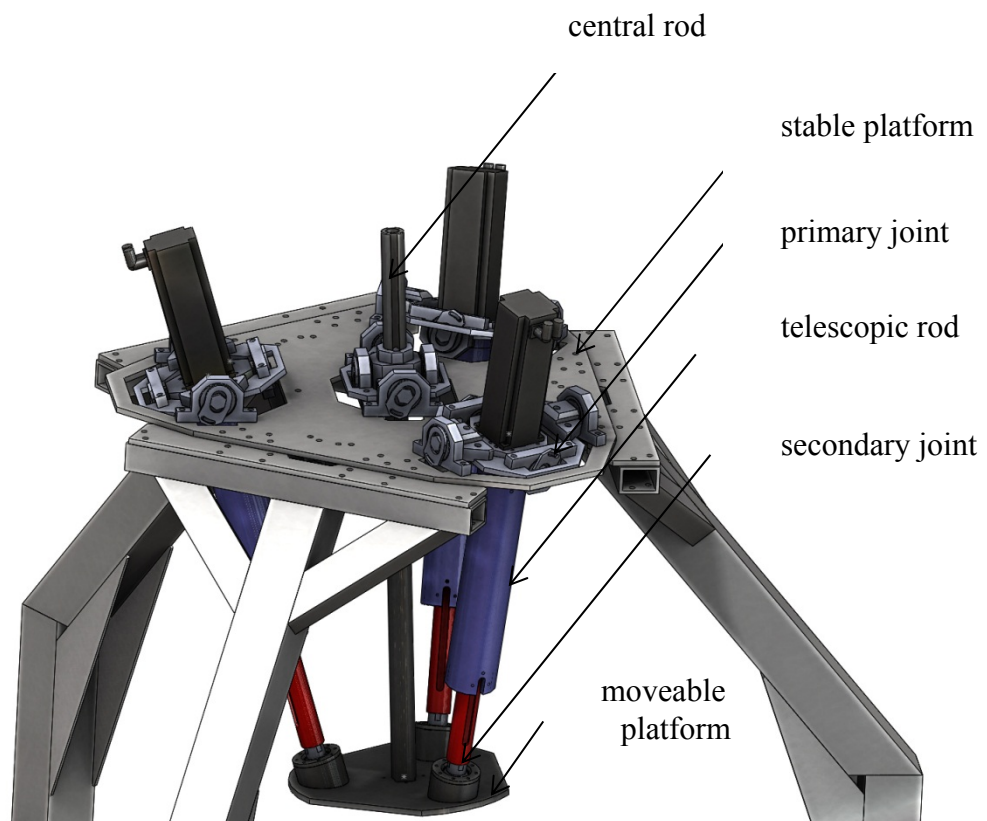


Figure 5 – Parts of Tricept at STU

3 Specification of the influences acting on machine tools

Machine tools, as all the other machines are differently affected by various factors that impact on them from the environment, but also its own construction, quality of manufacture and materials from which they are made. These factors then devalued trajectory forming the point of the tool coordinate system while it is moving. This task depends on the specific design of the machine and the machining conditions. This section briefly describes the most common sources of uncertainty. [8]

4 Positional accuracy test of telescopic rod type PKS

Before performing the test must be satisfied all the necessary balancing actions, settlement procedures and functional testing and must be limited movements of Tricept as required settings of measuring instruments.

Dimensioning and proposal of construction of Tricept is based on specific operating conditions. Another task of robotic manufacturing systems is to control Tricept using the software. Control program and electronic functionality of Tricept assembly can be simulated on a computer. Finding the correct position of the movable platform and the entire functionality of the robot is subject to feedback from various types of sensors. Initial calibration is required when putting Tricept into operation. Calibration is the process of determining the actual values of kinematic and dynamic parameters. Kinematic parameters describe the relative position and orientation of telescopic rods and joints of the robot in the unloaded condition. Dynamic parameters describe the state of telescopic rods and joints including the mass and internal friction under load. Calibrated robot has a higher absolute positioning accuracy, and thus the actual position of the end effector corresponds better with positions computed respectively simulated model of the software input therefore Sew- Eurodrive gives detailed instructions for calibration and positioning of their engines and its assembled devices at start up using utility software Movitools. Tricept operates on many influences, because all components work with some irregularities. It is necessary to determine the estimated total uncertainty of Tricept, but this should be on the order of microns [10^{-5} m], which is sufficient for technical practice.

According to the type of control, the number of axes of robot and how the members and end-effector are moving along complex trajectories, the desired control type of superiority through information obtained from sensors or specified by operators. Inside sensors sensed condition of Tricept and provide current location information of telescopic rods, speed and acceleration ejet, ejet direction, temperature of devices. External sensors corrected preset parameters and recover work environment, thereby significantly influence the functioning of the resulting system.

Telescopic rod is composed of two main parts (Fig. 6). Rigid, stationary portion of the shaft is mounted on a stable platform in the primary joint. The second part of the rod is movable and extendable. Displacement of the two parts of the rod and the variable length of telescopic rod allows moveable ball screw. Translational movement is in the direction of the axis of the two parts of the telescopic rods. Ball screw in the rod is the sliding type joint. [6].

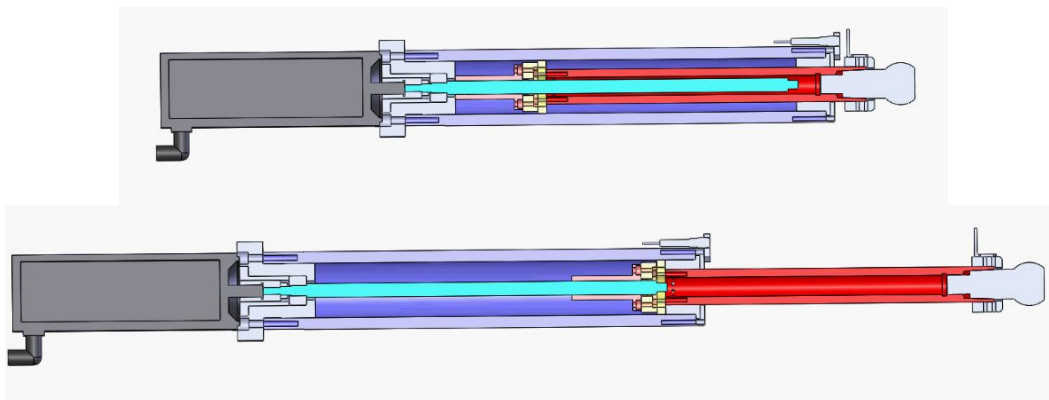


Figure 6 – Tricept telescopic rod

The difference between the final position of the end effector, or other -defined point on a moving platform, and the desired value entered in offline programming represents the accuracy with which the robot will work. For the final accuracy of industrial robot is important to calibrate it. Calibration of telescopic rods is system of specified activities under defined conditions which define the relationship between the measured value with a certain

measurement uncertainty. Calculation of uncertainty will be determined by calculation from the measured values obtained by comparing them with a reference standard. In this case, it is the standard of length with the associated measurement during the extension and retraction of telescopic rods. Results of calibration are used by software to correct the measured deviations. Evaluation of calibration involves the evaluation of errors and uncertainties in measurements. Sources of error arising from the improper use of measuring instruments and faulty installation of equipment before and during calibration will follow, corrected or removed. Random and systematic errors will be evaluated.

Test procedures for the robot type Tricept can be divided into calibration and measurement of ejection of one telescopic rod and for positioning and evaluation of the whole structure. The procedure was chosen to complement and should exclude the accuracy of the telescopic rods, their drives and gears ball screws. Steering of servo motors via inverters ensures sufficient current stability.

Test procedures according to ISO 230-2:2006 based on laser interferometric method of measurement geometries represent one of the most accurate measurements positioning of industrial robots. By measuring the length of ejection of one telescopic rod can be compared the position measuring system with a set value (non-linear measurement standard prescribed for the 2000 mm minimum 5 measurement positions).

Telescopic rods with movement of the ball screw are linear actuator. Their ejection can be measured and compared with a reference standard in the process of calibration procedures specified in ISO 230-2:2006. One of the parts of the calibration is to measure the telescopic rod fully assembled kit of Tricept, where is measured and evaluated each of the three rods alone. Measured rod should be preferably measured in a vertical position.

The first measure is designed to eject one telescopic rod from the zero position to the maximum position and back. Each measurement is repeated 10 times at a minimum speed and at the maximum possible speed. It is 40 measurements to achieve the minimum and maximum. Then we select 5 random length values to eject telescopic rod and we measure the position accuracy at a constant speed when retracting telescopic rod in one direction and also when inserting the telescopic rod. Measurement is repeated 30 times at each point, it is a total 300 measurement positions for both directions. Additional measurements will be entered into the random values telescopic rod telescopic and measured in both directions from various previous positions 30 times. We have chosen 5 points what 150 measurements are. For all three rods that means 1470 measurements.

Measured positions P_i are designed according to the relationship:

$$P_i = (j - 1)p + r \quad (1)$$

where:

P_i – measured position

i – number of measured position,

p – measured interval,

r – shall enter a different value in each measured position. It is used to prevent periodic errors.

Approximation to the measured point is made in both directions. The measurement is made using the standard measurement cycle shown in Figure 7.

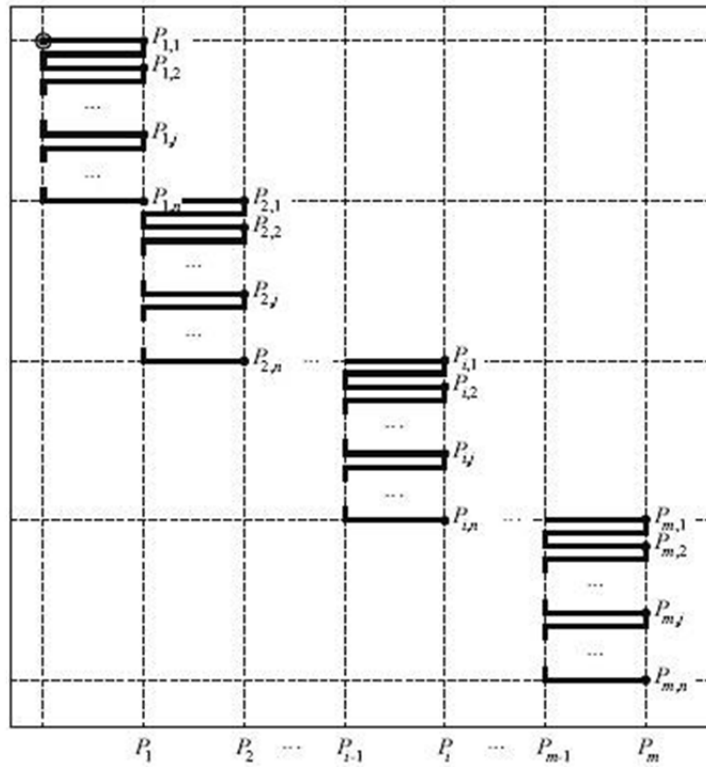


Figure 7 – Measurement cycle [9]

According to the standards of measurement that can be derived some basic parameters. The parameters are: average deviation desired position x_{ij} , standard deviation desired position s_j , numbness B_j .

Desired position deviation is the difference between the actual position value for the output of the machine and the specified value.

$$x_{ij} = P_{ij} - P_j \quad (2)$$

The average unilateral deviation desired position is the average deviation of the measured position in a series of unilateral approaches to the position.

$$\bar{x}_j \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \uparrow \quad (3)$$

$$\bar{x}_j \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (4)$$

The standard deviation of the desired position:

$$s_j \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_j \uparrow)^2} \quad (5)$$

$$s_j \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_j \downarrow)^2} \quad (6)$$

Numbness is the difference in average unilateral deviations along the selected axis

$$B_j = \bar{x}_j \uparrow - \bar{x}_j \downarrow \quad (7)$$

Evaluation and comparison of a standard length desired ejection telescopic rods serve as the basis for programming the entire management structure. The measured deviations and uncertainty serve to calculate compensation parameters.

When designing a testing kit complete positioning Tricept can proceed similarly and given to the selected point on a moving platform to measure the deviation from the desired value.

Runway accuracy (AT) devices is the ability to move a defined point on the end cap n times in the same direction along the desired path. Runway accuracy is the maximum runway deviation obtained when positioning and orientation. Runway accuracy is determined by the following two factors:

- positioning accuracy track - deviation between the programmed path and the barycentric line sets obtained Railways (positioning accuracy runway AT)
- precision orientation track - deviation between the programmed angular orientation and angular diameter reached orientation (ie orientation accuracy of the track).

One-way positioning accuracy:

$$AP = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 \div (\bar{z} - z_c)^2} \quad (8)$$

$$AP_x = (\bar{x} - x_c) \quad (9)$$

$$AP_y = (\bar{y} - y_c) \quad (10)$$

$$AP_z = (\bar{z} - z_c) \quad (11)$$

with

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j,$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j,$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j$$

where $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ are the barycentric coordinates of a set of points obtained after repeating the same location n -times,

x_c, y_c, z_c are the coordinates of the desired position,

x_j, y_j, z_j are the coordinates of the reached position.

Precision runway orientation (AT_a, AT_b, AT_c) is defined as the maximum deviation from the programmed angles along the path.

$$AT_a = \max |\bar{a}_i - a_i| \quad (12)$$

$$AT_b = \max |\bar{b}_i - b_i| \quad (13)$$

$$AT_c = \max |\bar{c}_i - c_i| \quad (14)$$

$$i = 1, \dots, m$$

$$\bar{a}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (15)$$

$$\bar{b}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (16)$$

$$\bar{c}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij} \quad (17)$$

a_i, b_i, c_i are specified angles in the given point (x_i, y_i, z_i) ,

a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} are achieved angles in the given point (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})

Repeatability track (RT) refers to the closeness between the tracks reached the n -times repetition of the same desired path. To set the path followed by n times in the same direction is determined repeatability track:

- RTP maximum value which corresponds to the radius of the circle centered on the center of gravity perpendicular to the track plane.

- the maximum amount of scattering angles around the mean value calculated at various points.

Calculation precision repeatability track where all parameters needed to calculate as defined in the precision positioning track:

$$RT_p = \max RT_{pi} = \max[\bar{l}_i + S_{li}] \quad (18)$$

$$i = 1, \dots, m$$

$$\bar{l}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{ij} \quad (19)$$

$$S_{li} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - \bar{l}_i)^2}{n-1}} \quad (20)$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2 + (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + (z_{ij} - \bar{z}_i)^2} \quad (22)$$

$$RT_a = \max 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_i)^2}{n-1}} \quad (22)$$

$$RT_b = \max 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_{ij} - \bar{b}_i)^2}{n-1}} \quad (23)$$

$$RT_c = \max 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - \bar{c}_i)^2}{n-1}} \quad (24)$$

One way position repeatability (RP) determine the accuracy of repeated stops the programmed end point position of the test cycle and the deviations from the specified values in the coordinate system of the robot. Measuring devices will position sensor coordinate system, software, PC. Measure the deviation of the position of the end point platform robot from the desired values in the unloaded condition. Testing repeatability is adjusted so that the end point of the robot approached the measurement positions of the two sides that will be reflected in the joints and backlash in the gears. Positioning repeatability is measured 20 times. Evaluation of sensed deviations is converted to the PC using MS Excel spreadsheet process. Seeking position repeatability is determined by the formula.

One Way position repeatability RP:

$$RP = \bar{L} + 3 S_L \quad (25)$$

Mean variation

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (26)$$

Deviation of the measured position of the program L_i :

$$L_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2} \quad (27)$$

Standard deviation S_L :

$$S_L = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2} \quad (28)$$

5 Conclusion

Up to now experiments carried out on Tricept take place gradually. Since there were a lot of unexpected events, it was necessary to repair the machine several times. By the used software, is currently performed firstly electronic and then lastly mechanical calibration. Experimental results will form the basis for the implementation of optimization design of Tricept as the basis for adjusting the control system.

Acknowledgements

This article was supported by the agency VEGA MŠ SR under Grant 1/0584/12.

6 References

- [1] BAUR, Charles; HELMER, Patrick; WEIBEL, Marc. Parallel Kinematic Structure. U.S. Patent Application 12/446,491, 2006.
- [2] POPPEOVÁ, V., BULEJ, F. a SVĚTLÁ, J. Sériové, paralelné a hybridné kinematické štruktúry výrobných strojov a robotov. The 13th International Scientific Conference, 2010
- [3] SICILIANO, B. Inverse kinematics, manipulatory analysis and closed-loop direct kinematics algorithm. Napoli, 1999
- [4] SKAŘUPA, J. a MOSTÝN, V. Teorie průmyslových robotů. Viena Košice, 2000. ISBN 80-88922-35-6
- [5] ZHANG, D., Parallel robotic machine tools. Canada, 2010, ISBN 978-1-4419-1116-2
- [6] PLOSKUŇÁKOVÁ, L.- KOLLÁTH, L.- KUREKOVÁ, E. 2010. Analýza konštrukcie a vlastností triceptu
- [7] PKM TRICEPT S.L.-Tricept. Available online: www.pkmtricept.com/productos
- [8] Jiangyin Nareaije Robot Co., Ltd. – The Multifunctional Trivariant B-2000 Robot. 2010. [online]. 2010. Available on internet: www.chinanej.com/en/ProductShow.asp?ID=215.
- [9] ISO 230-2:2006 Test code for machine tools – Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes
- [10] OMACHELOVÁ M., MARTIŠOVITŠ I., KUREKOVÁ E., KOLLÁTH L., “Analytical expression of the lengths of tricept telescopic rods ejection,” Czech republic, pp. 45-50, April 2013 [37th seminar ASR, Instruments and Control, Ostrava].
- [11] OMACHELOVÁ M., KUREKOVÁ E., HALAJ M., MARTIŠOVITŠ I., Theoretical aspects of control of the tricept type parallel kinematic structure. Czech republic, MAY 2014, <http://www.icc-conf.cz/conference/iccc2014/>
- [12] JURIŠICA, L. – HUBINSKÝ, P. – KARDOŠ, J. Robotika, Bratislava: STU v Bratislave, 2005, <https://www.sjf.tuke.sk/seminsky/IVS/skripta.pdf>
- [13] BOŽEK P. A KOL., Špecializované robotické systémy, Ámos, 2011, ISBN 978-80-904766-8-4, www.uiam.mtf.stuba.sk/predmety/srs/1-Ucebica/#_Toc310244208
- [14] CINTULA, L. Simulační modelování paralelných mechanismů, Brno, 2012, Diplomová práce

Návrh a realizace řídicího algoritmu a jeho softwarové podpory s ověřením na laboratorním modelu

HÝL, Radim¹ & WAGNEROVÁ, Renata²

¹ Ing., ✉ ATR – 352, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 17. Listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava – Poruba, 💻 radim.hyl.st1@vsb.cz, 🌐 www.352.vsb.cz

² doc., Ph.D., 💻 renata.wagnerova@vsb.cz

Abstrakt: Článek se zabývá návrhem a realizací algoritmů řízení a jejich softwarovou podporou. Popisuje návrh prediktivního řízení s interním modelem (MPC) pro vybraný laboratorní model. Řízeným systémem je teplovzdušný model (TVM), který se svými dvěma vstupy a dvěma výstupy reprezentuje mnohorozměrovou soustavu (MIMO). MPC algoritmus byl vytvořen v programu MATLAB a pro minimalizaci kvadratického kritéria a výpočet optimálního akčního zásahu využívá funkce qpOASES ze stejnojmenného open-source softwarové balíčku. MPC algoritmus běží v MATLABu jako nadřazená vrstva systému řízení a PLC realizuje komunikaci s modelem. Akční zásahy mohou být pomocí PLC přímo nastaveny na akční členy nebo sloužit jako žádané veličiny podřízeným PID regulátorům realizovaným v PLC. Dále byla vytvořena vizualizace chování modelu v SCADA/MMI systému Control Web 6. Pro změnu parametrů MPC regulátoru a vkládání interního modelu byla navržena a realizována aplikace vytvořená v graphical user interface (GUI) softwaru MATLAB.

Klíčová slova: prediktivní řízení, MPC, MATLAB, Control Web, PLC

1 Úvod

V průmyslu jsou velmi rozšířeny průmyslové spalovací elektrárny, které musí zajistit výrobu procesního tepla, páry a často i elektrickou energii pro výrobní proces. Vzhledem k rychlým a nepředvídatelným změnám ve spotřebě, např. rychlé změny zatížení způsobené výkyvy v oblasti produkce, se chování elektrárny jeví jako vysoce dynamické. Časté změny ve spotřebě páry kladou vysoké nároky na řízení elektrárny. Současný stav řídicích systémů pro řízení spalování je postaven na využití PID regulátorů, kdy změny hodnot žádaných veličin regulátorů jsou prováděny operátory s operátorského pracoviště. Časté manuální vstupy operátorů jsou nezbytné, aby procesní veličiny z technologického procesu zůstaly uvnitř bezpečně definovaného pracovního rozsahu, např. tlaky v parním potrubí, teploty či toky materiálu. Vzhledem k častému vzájemnému ovlivňování procesních veličin, velkým časovým konstantám a dopravnímu zpoždění, parametry PID regulátorů musí být nastaveny obezřetně pro dosažení robustnosti a vyhnutí se kmitání. V případě nasazení prediktivního řízení pro řízení spalovacího procesu je elektrárna schopna rychle reagovat na změny ve spotřebě se splněním výše uvedených podmínek. Z tohoto důvodu nasazení řídicích metod založených na interním modelu v průmyslu stále roste, viz [1]. V [8] je MPC použito pro řízení procesu spalování odpadu a v [3] v průmyslových spalovacích elektrárnách na biomasu. Tato práce se snaží přiblížit čtenářům obě uvedené metody řízení a nastiňuje i jejich možné společné nasazení při řízení spalovacího procesu. Obě koncepce byly ověřeny na laboratorním modelu, který představuje zjednodušený model spalovací komory.

2 Popis navrhované metody řízení

Prediktivní řízení je jednou z moderních metod řízení, která ve velké míře nachází uplatnění v různých oblastech průmyslu. Pro výpočet budoucích hodnot akčních zásahů se využívá znalosti diskrétního matematického modelu řízeného systému, který zároveň slouží k získání budoucích odezev systému na daný budicí signál. Výhodou prediktivního řízení oproti jiným přístupům je, že při výpočtu akčního zásahu (výstupu regulátoru) je uvažován i budoucí průběh žádané hodnoty a je zohledněno optimalizační kritérium, nazývané také účelová funkce. Z vypočtené posloupnosti akčních zásahů se v daném kroku aplikuje pouze první hodnota a v následujícím kroku se celý postup výpočtu opakuje, tzv. strategie pohyblivého horizontu. Jednou z předností, kterou prediktivní řízení disponuje, je možnost zahrnutí omezení na rozsah vstupních, stavových nebo výstupních veličin (teplot, tlaků, poloh ventilů, teplotních gradientů atd.) přímo do výpočtu akčních zásahů. I díky tomu je kvalita regulace ve srovnání s regulací pomocí PID regulátoru vyšší. MPC regulátor je od základu koncipován jako mnohorozměrný a koordinovaně pracuje s větším počtem akčních a regulovaných veličin.

Hlavní výhody:

- Řízení vícerozměrných systémů
- Obsahuje interní model pro robustní a rychlé řízení
- Mnoho možností parametrizace regulátoru
- Schopnost vyrovnat se s dlouhými časovými konstantami a zpožděními

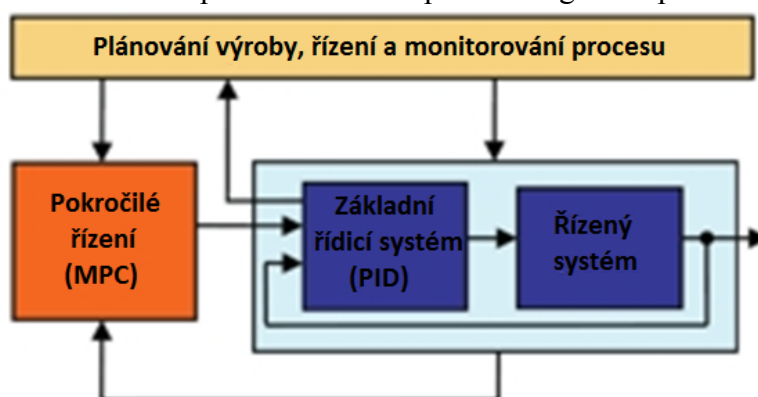
Bohužel, musíme také pamatovat na několik omezení:

- Vysoká výpočetní náročnost
- Pouze omezené použití v PLC

Dvě typické aplikace MPC regulátoru, které jsou předmětem tohoto článku, jsou následující:

A. MPC regulátor běží v nadřazené rovině PID regulátorům v hierarchickém řídicím systému

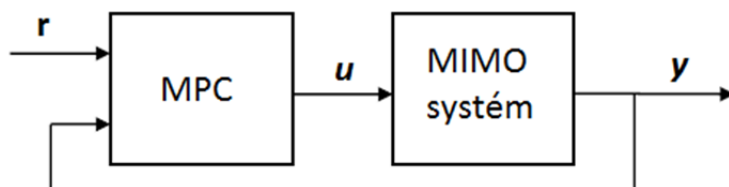
Ve většině zařízení slouží výstupy MPC regulátoru jako žádané hodnoty PID regulátorům, např. žádaná hodnota průtoku vzduchu pro PID regulátor průtoku.



Obrázek 1 Zapojení MPC regulátoru v hierarchickém řídicím systému

B. MPC regulátor přímo řídí řízený systém

V případě menších instalací jsou výstupy MPC regulátoru přímou referencí ventilových pozic, čerpadel, ventilátorů atd. Tato konfigurace klade větší nároky na frekvenci vzorkování.



Obrázek 2 Schéma regulačního obvodu s MPC
(\mathbf{r} – vektor žádaných veličin (reference), \mathbf{u} – akčních veličin a \mathbf{y} – regulovaných veličin)

3 Realizace prediktivního řízení s interním modelem

Algoritmus prediktivního řízení s penalizací $\Delta \mathbf{u}$ byl naprogramován v prostředí MATLAB a vychází z knihy [12] s jedinou modifikací, kdy pro výpočet optimálního řízení se používá místo funkce quadprog z Optimization Toolboxu funkce qpOASES ze stejnojmenného volně šiřitelného softwarového balíčku. MPC regulátor je schopen řídit mnohorozměrové systémy a jeho vstupy jsou regulované veličiny a žádané veličiny a výstupy jsou akční veličiny. Dále se mohou vyskytnout ještě neregulované poruchové veličiny, které prozatím zanedbáváme. Regulované veličiny jsou řízeny na žádanou hodnotu v rozmezí definovaných limitů. Akční veličiny mohou být přímo připojeny k akčním členům nebo jako žádané hodnoty k PID regulátorům. MPC řeší účelovou funkci ve tvaru

$$J = \sum_{i=1}^N q_{y_i} (r_{s_i} - y_i)^2 + \sum_{i=1}^N q_{\Delta u_i} \Delta u_i^2 \quad (1)$$

s ohledem na horní a dolní limity akčních zásahů. Proměnné y_i , r_{s_i} a u_i jsou i -té regulované veličiny, žádané veličiny a akční veličiny. q_{y_i} a $q_{\Delta u_i}$ jsou váhy představující relativní důležitost regulované veličiny y_i a omezení přírůstků akční veličiny Δu_i . Účelovou funkci můžeme přepsat do maticové podoby

$$J = \mathbf{Q}_y (\mathbf{r}_s - \mathbf{y})^T (\mathbf{r}_s - \mathbf{y}) + \Delta \mathbf{u} \mathbf{Q}_{\Delta u} \Delta \mathbf{u} \quad (2)$$

\mathbf{r}_s je vektor popisující průběh budoucích žádaných veličin na horizontu predikce N_p . $\mathbf{Q}_{\Delta u}$ je diagonální matice a pro její sestavení platí vzorec

$$\mathbf{Q}_{\Delta u} = q_{\Delta u} \mathbf{I}_{N_c \times N_c} \quad (q_{\Delta u_i} > 0) \quad (3)$$

kde $q_{\Delta u}$ je vektor vah omazujících přírůstky akčních veličin a N_c horizont řízení. Oba jsou společně s diagonální maticí vah důležitosti regulovaných veličin \mathbf{Q}_y stavitelnými parametry MPC regulátoru. Sestavení této druhé váhové matice je na stejném principu. Vektor \mathbf{y} predikované regulované veličiny může být nahrazena rovnicí

$$\mathbf{y} = \mathbf{F} \mathbf{x}(k_i) + \Phi \Delta \mathbf{u} \quad (4)$$

kde platí

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \mathbf{CA}^3 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{N_p} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{CB} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{CA}^2 \mathbf{B} & \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & & & & \\ \mathbf{CA}^{N_p-1} \mathbf{B} & \mathbf{CA}^{N_p-2} \mathbf{B} & \mathbf{CA}^{N_p-3} \mathbf{B} & \dots & \mathbf{CA}^{N_p-N_c} \mathbf{B} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{x}(k_i)$ je vektor aktuálních stavových veličin.

Jak už bylo zmíněno výše, MPC algoritmus používá pro řešení kvadratických optimalizačních problémů funkci qpOASES. Tato funkce lze pomocí mex funkce implementovat do programu MATLAB, Simulink nebo Scilab a řeší optimalizační problémy ve tvaru

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{g} \\ \mathbf{lb} \mathbf{A} \leq & \mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{ub} \mathbf{A} \\ \mathbf{lb} \leq & \mathbf{x} \leq \mathbf{ub} \end{aligned} \quad (6)$$

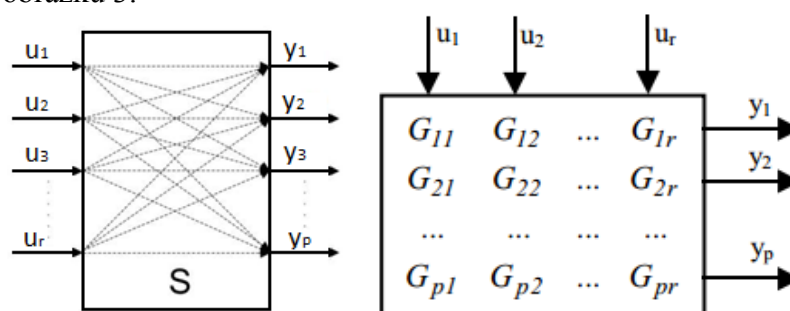
kde Hessova matice \mathbf{H} je symetrická kladně definitní a \mathbf{g} je vektor gradientů, \mathbf{lb} a \mathbf{ub} jsou vektory dolních a horních omezujících podmínek. Prozatím se nepracuje s omezující maticí \mathbf{A} a omezujícími vektory $\mathbf{lb} \mathbf{A}$ a $\mathbf{ub} \mathbf{A}$ vázanými na horní a dolní omezující podmínky. Tuto formu kvadratického kritéria používá také MATLAB ve funkci quadprog. Konstrukci matice \mathbf{H} a vektoru \mathbf{g} popisují následující rovnice.

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \Phi^T \mathbf{Q}_y \Phi + \mathbf{Q}_{\Delta u} \\ \mathbf{g} &= -\Phi^T \mathbf{Q}_y (\mathbf{r}_s - \mathbf{F} \mathbf{x}(k_i)) \end{aligned} \quad (7)$$

4 Identifikace systému a definování interního modelu

Nedílnou součástí prediktivního řízení je znalost co nejpřesnějšího matematického modelu řízeného systému. Nejjednodušší a v průmyslu nejpoužívanějším popisem je přenosová funkce získaná z přechodové charakteristiky. Jelikož řízený systém je mnohorozměrný, je popsán maticí těchto přenosových funkcí. Protože pro prediktivní řízení byl zvolen diskretní stavový popisem systému, bylo nutné matici přenosových funkcí transformovat do tohoto tvaru a tento převod algoritmizovat. Jelikož budoucím cílem práce je implementace celého prediktivního řízení do PLC bez použití MATLABu, kde nebude možno použít funkce tohoto programu, jsou pro sestavení interního modelu použity jen základní funkce, které jsou dodávány společně s PLC AC500 od firmy ABB. Možnost implementace algoritmu pro sestavení interního modelu pro prediktivní regulátor jsem ověřil přepsáním algoritmu v programu CoDeSys ve standardu IEC 1131. Tento algoritmus převádí matici přenosů mnohorozměrového systému s maximálním počtem šesti vstupních veličin na stavový popis, dále jej diskretizuje a přidává diskretní dopravní zpoždění.

Mnohorozměrový regulační obvod je takový obvod, který má více regulovaných veličin y a je znázorněn na obrázku 3.



Obrázek 3 Závislosti vstupních a výstupních veličin a přenosová matice MIMO systému

Vztah mezi jednou vstupní veličinou u a jednou výstupní veličinou y je v našem případě popsán přenosem jako ve vzorci 9, který popisuje proporcionalní systém se setrvačností třetího řádu. Třetí řád systému uvažujeme jako maximální. Všechny dané přenosy můžeme zapsat do matice přenosových funkcí \mathbf{G} .

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & \dots & G_{1m}(s) \\ \vdots & & \\ G_{r1}(s) & \dots & G_{rm}(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} = \frac{\frac{b_1}{a_0} s^2 + \frac{b_2}{a_0} s + \frac{b_3}{a_0}}{s^3 + \frac{a_1}{a_0} s^2 + \frac{a_2}{a_0} s + \frac{a_3}{a_0}} \quad (9)$$

Vztah mezi jednou vstupní a jednou výstupní veličinou popsaný přenosem 9 můžeme pomocí metody postupné integrace převést na maticovou diferenciální rovnici neboli stavový popis v kanonickém tvaru pozorování.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{a_1}{a_0} & 1 & 0 \\ -\frac{a_2}{a_0} & 0 & 1 \\ -\frac{a_3}{a_0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_1}{a_0} \\ \frac{b_2}{a_0} \\ \frac{b_3}{a_0} \end{bmatrix} u(t) \quad (10)$$

$$y(t) = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + 0u(t)$$

Což lze zapsat jako:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{c}^T \mathbf{x}(t) + du(t) \end{aligned} \quad (11)$$

kde

- A**...je matice systému
- b**...je vektor vstupu
- c^T**...je vektor výstupu
- d**...konstanta převodu

Metoda postupné integrace má výhodu v tom, že výstupní veličina $y(t)$ je přímo jednou ze stavových veličin, a že v rovnici vystupuje jen vstupní veličina $u(t)$, ne její derivace. Použitý systém splňuje silnou podmínku fyzikální realizovatelnosti a výstup závisí na stavových veličinách a rovnice výstupu tudíž neobsahuje vstupní veličiny. Pro tyto systémy je d nulová konstanta a stavový popis můžeme přepsat do tvaru 12.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) \\ y &= \mathbf{c}^T \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (12)$$

Dalším úkolem bylo systém diskretizovat na tvar

$$\begin{aligned} \mathbf{x}[(k+1)T] &= \mathbf{F}\mathbf{x}(kT) + \mathbf{g}u(kT) \\ y[kT] &= \mathbf{c}^T \mathbf{x}(kT) \end{aligned} \quad (13)$$

kde platí

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= e^{\mathbf{A}T} \\ \mathbf{g} &= \left(\int_{kT}^{(k+1)T} e^{\mathbf{A}\tau} d\tau \right) \mathbf{b} \end{aligned} \quad (14)$$

Po zavedení substituce $v = \tau - kT$ je diskretní vektor vstupu sestaven podle vzorce 15.

$$\mathbf{g} = \left(\int_0^T e^{A v} dv \right) \mathbf{b} \quad (15)$$

Pro rozklad maticové exponenciály a jejího integrálu byl použit rozklad exponenciály na Taylorovu řadu.

$$\mathbf{V} = \int_0^T e^{A v} dv = \mathbf{I}T + \frac{A T^2}{2!} + \frac{A^2 T^3}{3!} + \dots + \frac{A^i T^{i+1}}{(i+1)!} \quad (16)$$

Po dosazení platí:

$$\mathbf{F} = \mathbf{I} + \mathbf{A}\mathbf{V} \quad (17)$$

$$\mathbf{g} = \mathbf{V}\mathbf{b} \quad (18)$$

k tomuto rozkladu jsem v algoritmu použil cyklus WHILE s podmínkou na začátku, která vychází z Eukleidovské normy a konstanta 0.0001 byla zjištěna experimentálně při porovnávání výsledků diskretizace s hodnotami vypočtenými v MATLABu.

$$\left\| \frac{A^i T^{i+1}}{(i+1)!} \right\| = \sqrt{\sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^m a_{kl}^2} \quad (19)$$

$$\left\| \frac{A^i T^{i+1}}{(i+1)!} \right\| > 0.0001$$

Po diskretizaci stavového modelu mají jeho matice a vektory následující tvar.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{c}^T = [1 \quad 0 \quad 0]$$

Dalším požadavkem na mou aplikaci byla také možnost vložení přenosu s dopravním zpožděním T_d .

$$G(s) = \frac{\frac{b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{a_0}}{s^3 + \frac{a_1 s^2 + a_2 s + a_3}{a_0}} e^{-T_d s} \quad (21)$$

Toto by se dalo vyřešit například tím, že by se dopravní zpoždění aproximovalo přenosem x . řádu pomocí Padého rozvoje a počítalo by se s takto upravenou soustavou. Dalším řešením bylo přímo v aplikaci, aproximovat zadané dopravní zpoždění, kdy při známé velikosti dopravního zpoždění T_d a známé periodě vzorkování T , byla soustava, jelikož výpočet probíhá v diskretním tvaru, zpožděna o z - k kroků a k by muselo být celé číslo. Druhá možnost byla realizována podle [6] a diskretní stavový popis se změnil na tvar

$$\begin{aligned} \mathbf{x}[(k+1)T] &= \mathbf{F}\mathbf{x}(kT) + \mathbf{g}u[(k-d)T] \\ y[kT] &= \mathbf{c}^T \mathbf{x}(kT) \end{aligned} \quad (22)$$

kde d je výsledek po dělení dopravního zpoždění a vzorkovací periody viz vzorec 23.

$$d = \frac{T_d}{T} \quad (23)$$

Pro názornost uvádím příklad pro $d=3$, kde je vidět, jak aproximace funguje.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & \mathbf{g}_1 & 0 & 0 \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & \mathbf{g}_2 & 0 & 0 \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & \mathbf{g}_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{c}^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Tímto způsobem je pracováno s každým přenosem v matici \mathbf{G} a je převeden na diskretní stavový popis. Vytvořenou dílčí matici \mathbf{F} a vektory \mathbf{g} , \mathbf{c}^T stavových popisů archivuji v paměti a následně sestavuji výsledný stavový popis systému na začátku popsaného přenosovou maticí \mathbf{G} mnohorozměrného systému. Postup sestavení výsledných matic \mathbf{A}_c , \mathbf{B}_c a \mathbf{C}_c je patrný v následujících vzorcích.

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11} & & & & & & \\ & \ddots & & & & & \\ & & \mathbf{F}_{1m} & & & & \\ & & & \mathbf{F}_{21} & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & & \mathbf{F}_{pm} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{11} & & & & & & \\ & \ddots & & & & & \\ & & & & \mathbf{g}_{1m} & & \\ \mathbf{g}_{21} & & & & & & \\ & & \ddots & & & & \\ & & & & & & \mathbf{g}_{pm} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_c^T = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{11}^T \cdots \mathbf{c}_{1m}^T & & & & & & \\ & & \mathbf{c}_{21}^T \cdots \mathbf{c}_{2m}^T & & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & & \mathbf{c}_{p1}^T \cdots \mathbf{c}_{pm}^T \end{bmatrix}$$

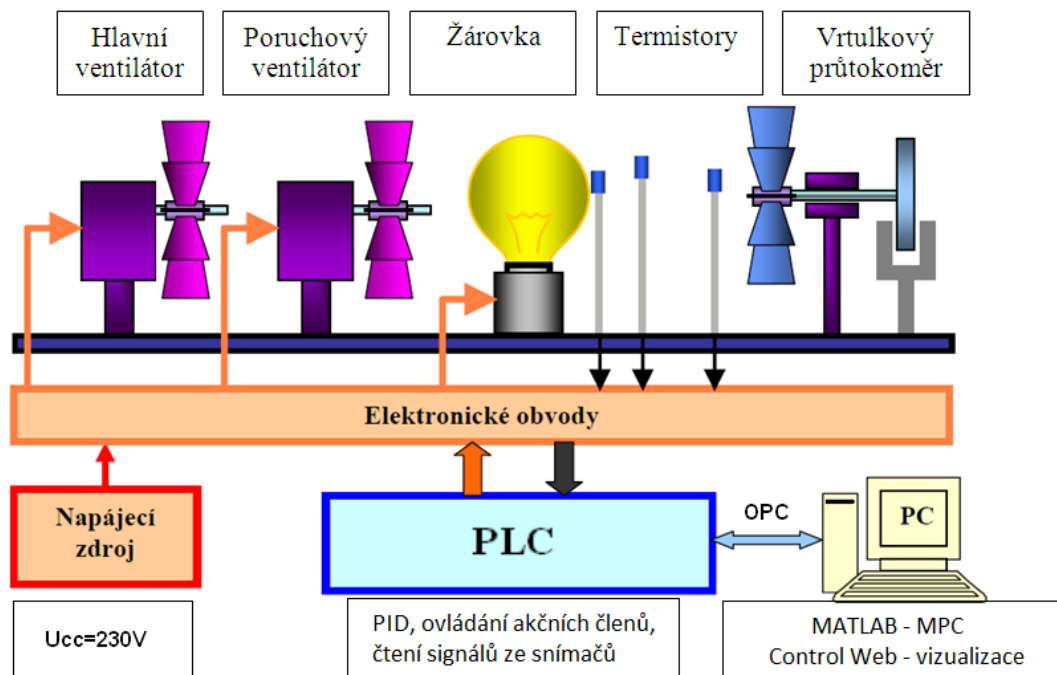
Celkový diskretní stavový popis řízeného mnohorozměrného systému je pak ve tvaru:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}[(k+1)T] &= \mathbf{A}_c \mathbf{x}(kT) + \mathbf{B}_c \mathbf{u}(kT) \\ \mathbf{y}[kT] &= \mathbf{C}_c^T \mathbf{x}(kT) \end{aligned} \quad (26)$$

5 Popis inovované laboratorní úlohy

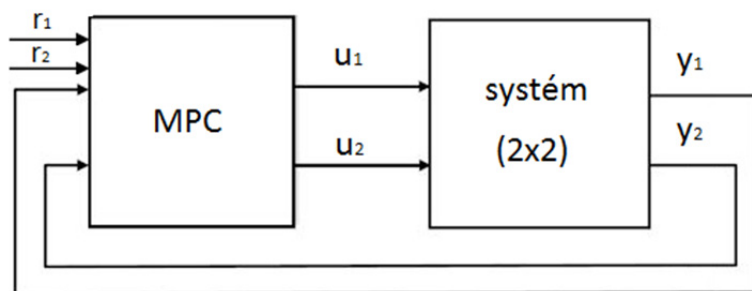
Pro ověření realizovaného řízení byl použit laboratorní model vytvořený na katedře ATŘ nazývaný jako teplovzdušný model. Je tvořen žárovkou napájenou z ovladatelného zdroje napětí. Žárovka je tepelným i světelným zdrojem a je umístěná v krytém tunelu, kterým je nasáván či vytlačován vzduch pomocí hlavního a případně poruchového (vedlejšího) ventilátoru (ten je rovněž napájen pomocí říditelného zdroje napětí). Popisovaný model

umožňuje realizovat jak jednorozměrové, tak mnohorozměrové regulační úlohy. Model teplovzdušného obvodu můžeme ovládat dvěma akčními členy tj. zdroj tepla – žárovka a hlavní ventilátor. Obsluha má možnost volby výstupní (měřené) veličiny, kterou může být teplota měřená snímači umístěnými v různých vzdálenostech od žárovky, nebo průtok vzduchu v tunelu měřený vrtulkovým průtokoměrem. V tunelu je umístěno několik termistorových snímačů teploty a jeden snímač průtočného množství vzduchu, což je již výše zmíněný vrtulkový průtokoměr. Pro ovládání a řízení modelu bylo použito PLC od firmy ABB. Schéma úlohy můžete vidět na obrázku 1.



Obrázek 4 Schéma propojení laboratorní úlohy

S modelem je propojeno PLC z řady AC500 od firmy ABB a je připojeno do sítě v laboratoři. Realizovanou laboratorní úlohu lze řídit z počítače umístěného v dané síti, na kterém je spuštěna řídicí aplikace vytvořena v programu Control Web 6. Hodnoty proměnných si PLC a Control Web vyměňují pomocí OPC serveru. Pokud při řízení laboratorní úlohy s teplovzdušným modelem přepneme do režimu MPC a na daném počítači spustíme také MATLAB a m-soubory realizující prediktivní regulátor, tak v úloze s teplovzdušným modelem je možné realizovat také prediktivní řízení mnohorozměrové soustavy. Nejprve ale musíme znát, případně určit, matematický popis řízené soustavy a zadat jej přes vstupní obrazovky do tohoto regulátoru. Stejně tak musíme zadat parametry prediktivního regulátoru.



Obrázek 5 Propojení modelu s MPC regulátorem

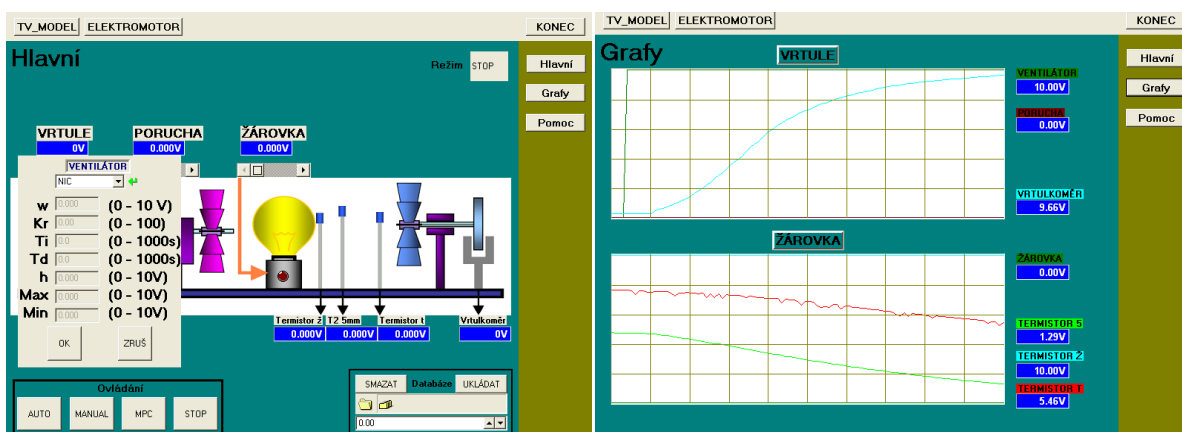
Uvažovanou matici vstupů a výstupů pro náš laboratorní model popisuje tabulka 1.

Tabulka 1 Akční (výstupní) a regulované (výstupní) veličiny použitého TVM

Výstupní veličiny	Vstupní veličiny
Napětí na žárovce	Teplota
Napětí na hlavním ventilátoru	Napětí na snímači otáček

6 Softwarová podpora řízení a parametrizace regulátorů

Vizualizace laboratorního modelu byla vytvořena ve SCADA/MMI softwaru Control Web 6 a je zobrazena na obrázku 6. Umožňuje ovládání modelu a zobrazuje všechny regulované a měřené veličiny a jejich trendy. Její součástí je i krátká nápověda. Ve vizualizaci lze zvolit typ regulátoru pro řízení laboratorního modelu od dvupolohového, přes PID, MPC a PID s MPC v nadřazené vrstvě. Pokud chceme nastavit parametry PID regulátoru nebo dvupolohové regulace, klikneme na daný prvek, který bude reprezentovat akční zásah a zobrazí se okno pro vložení parametrů. Nadřazený MPC regulátor může být připojen bez přerušení řízení PID regulátorem. Nejdůležitější funkcí pro identifikaci modelu je manuální režim, kde lze nastavit skokovou změnu žádané veličiny a všechna naměřená data lze uložit do textových souborů. Poruchovou veličinu (napětí na poruchovém ventilátoru) můžeme nastavovat manuálně nebo jako trojúhelníkový či obdélníkový signál.

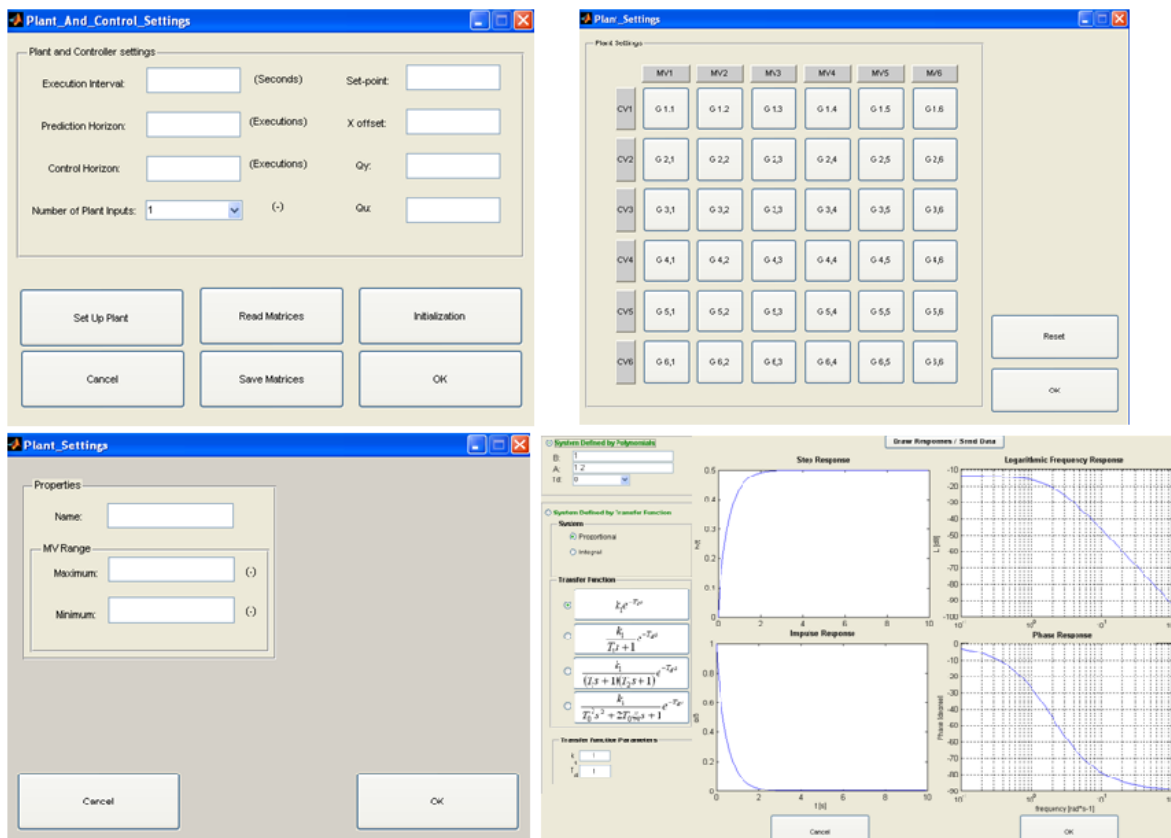


Obrázek 6 Vizualizace vytvořená v Control Web 6

Pro změnu parametrů MPC regulátoru a vkládání interního modelu byla navržena a realizována aplikace vytvořená v graphical user interface (GUI) softwaru MATLAB, která je patrná na obrázku 7. Nejprve bylo nutné model identifikovat a zjištěné přenosové funkce popisuje tabulka 2. Dalším krokem je určení periody vzorkování T . Musí být správně zvolena s ohledem na dynamiku systému a typ řízení, např. nadřazené nebo přímé řízení. Následně získané přenosové funkce pomocí aplikace vložit do MPC regulátoru. Nyní lze přistoupit k samotné parametrizaci regulátoru. Podle [1] hlavní parametry ladění jsou váhové matice $Q_{\Delta u}$ a Q_y . V případě neznámého systému se doporučuje volit nižší hodnoty Q_y a vyšší hodnoty $Q_{\Delta u}$. Pokud chování interního identifikovaného modelu se blíží chování reálnému, je možno přistoupit k agresivnější volbě parametrů (malé hodnoty $Q_{\Delta u}$ a vysoké Q_y). Dalšími volitelnými parametry regulátoru jsou ještě horizont predikce N_p a horizont řízení N_c .

Tabulka 2 Identifikovaná přenosová matice (sloupec 1 – napětí na žárovce, sloupec 2 – napětí na ventilátoru, řádek 1 – napětí na termistoru, řádek 2 – napětí na snímači otáček)

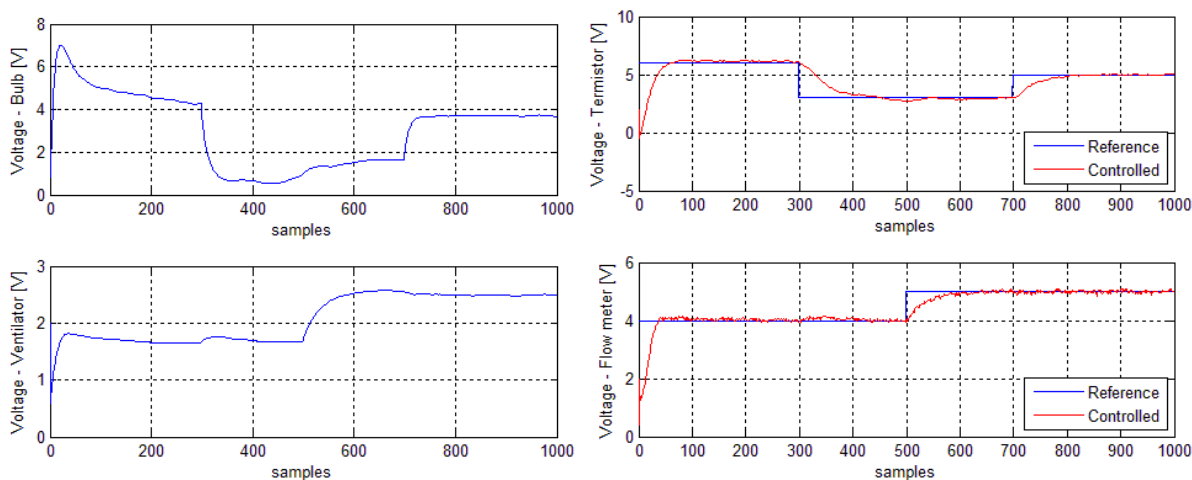
$\frac{2,1}{34,5s + 1} e^{-2s}$	$\frac{-1}{22,3s + 1} e^{-4s}$
-	$\frac{2,3}{3,9s + 1} e^{-2s}$



Obrázek 7 GUI aplikace pro parametrizaci MPC regulátoru

7 Výsledky prediktivního řízení

Pro prezentaci funkčnosti MPC regulátoru jsem použil jeho přímé zapojení k řízenému modelu, kdy vypočtené výstupy MPC regulátoru jsou přímo nastaveny na akční členy laboratorního modelu. Vektor žádaných veličin r byl navržen pro 1000 vzorků a zvolená vzorkovací perioda T byla 1 sekunda. V tomto případě to znamená, že 1 vzorek odpovídá každé 1 sekundě řízení. Horizont predikce N_p byl nastaven na 100 sekund a horizont řízení N_c na 50 sekund. Diagonální váhová matice Q_y měla na diagonále samé jedničky a váhový vektor $q_{\Delta u}$ měl před sestavením váhové matice tvar $[100 \ 1000]$. Obrázek 8 ukazuje průběhy požadovaných a regulovaných veličin (vpravo) a průběhy akčních veličin (vlevo).



Obrázek 8 Průběhy akčních a žádaných veličin

Z naměřených průběhů je patrné, že odchylky průběhů regulovaných veličin od žádaných jsou minimální a v průbězích akčních veličin nejsou patrné výrazné špičky, což v případě řízení spalovacího procesu šetří výrazné množství paliva.

8 Závěr

Výsledkem práce je realizace pokročilého řízení laboratorního modelu pomocí programovatelného logického automatu a MPC regulátoru s penalizací akčního zásahu. Byla vytvořena vizualizace v programu Control Web 6.1, ve které lze zvolit typ regulátoru pro řízení laboratorního modelu od dvupolohového, přes PID, MPC a PID s MPC v nadřazené vrstvě. Je z ní možno ovládat laboratorní úlohu, sledovat měřené veličiny, archivovat naměřená data a obsahuje i krátkou nápovědu. Dále v programu MATLAB byla vytvořena GUI aplikace, přes kterou se vkládají data pro prediktivní řízení. Algoritmus prediktivního řízení běží v programu MATLAB a vypočtené optimální akční zásahy jsou pomocí PLC nastavovány na akční členy teplovzdušného modelu. Pro výpočet optimálních akčních zásahů byla použita místo funkce quadprog z Optimization Toolbox funkce qpOASES ze stejnojmenného volně šiřitelného softwarového balíčku. Ověřením na laboratorním modelu bylo zjištěno, že tento softwarový balíček, lze bez obav nasadit i v průmyslu v embedded regulátorech.

Cílem budoucího výzkumu je prediktivní řízení implementovat do PLC. V programu CoDeSys již byla vytvořena aplikace pro PLC ve standardu IEC 1131 určená pro převod matice přenosů mnohorozměrného systému s maximálním počtem šesti vstupních a šesti výstupních veličin na stavový popis s následnou diskretizací tohoto stavového popisu.

9 Použitá literatura

- [1] AGACHI, P. S., NAGY Z. K., et al., Model Based Control: Case Studies in Process Engineering, New York: John Wiley Sons, 2007. ISBN 9783527315451
- [2] CAMACHO, E. F, BORDONS, C., Model Predictive Control, London: Springer, 2007. ISBN 978-0-85729-398-5
- [3] HAFFNER, L., VOIGT, A., High dynamic process control of a large scale industrial incineration power plant, IASTED Software Engineering: Control Applications, Greece, 2012.
- [4] FERREAU, H. J., qpOASES User's Manual, Optimization in Engineering Center (OPTEC) and Department of Electrical Engineering, KU Leuven, 2012.
- [5] FERREAU, H. J., ORTNER, P., LANGTHALER, P., DEL RE, L., DIEHL, M., Predictive Control of Real-World Diesel Engine using an Extended Online Active Set Strategy, Annual Reviews in Control, 2007, 293 – 301s.
- [6] KUPKA, Libor, Nelineární model vibroizolačního podstavce sedadla řidiče s nůžkovým vodicím mechanismem a jeho linearizme, Univerzita Pardubice, 2011.
Dostupné z http://pernerscontacts.upce.cz/23_2011/Kupka.pdf
- [7] LESKENS M., VAN KESSEL, L. B. M., et al., MIMO closed-loop identification of an MSW incinerator, Int. J. Of Control Engineering Practice, 2002, 315-326.
- [8] PEHRSON, Havard, Modelling and Control of Brobekk Waste Incineration Plant, Norwegian University of Science and Technology, 2010.

Dostupné z: <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/diplom/diplom10/pehrson/rapport.pdf>

[9] ŠVARC, I., ŠEDA, M., VÍTEČKOVÁ, M., Automatické řízení, 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3491-2





[10] VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A., Základy automatické regulace. 1. vyd. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB – TU Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1068-9

[11] VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A., Optimální systémy řízení. 1. vyd. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB – TU Ostrava, 2002. ISBN: 80-7078-736-8

[12] WANG, Liuping, Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB, RMIT University Melbourne, London: Springer, 2009. ISBN 978-1-84882-330-3

Zpracování zvukových signálů využitím ADSP-21469 EZ-KIT Lite

JANEČKA, Patrik¹

¹ Ing.,  Katedra ATR-352, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu, Ostrava - Poruba, 708 33 , 
 patrikjanecka@seznam.cz,  www.vsb.cz

Abstrakt: Tento článek popisuje možnost využití digitálních signálových procesorů k zpracování zvukových signálů. V článku je zaměřeno na vývojový kit ADSP-21469 EZ Board poskytující velice užitečné a efektivní metody pro zpracování zvuku. Tato deska obsahuje dva hlavní komponenty, využívané ve zpracování zvuku, procesor ADSP-21469 a sigma delta kodek AD1939. Dva stereo vstupy a čtyři stereo výstupy do kodeku jsou realizovány přes RCA jack a DB25 konektory. Počet vstupů a výstupů lze rošířit pomocí přídavné desky SHARC Audio-Extender a to až na šest stereo vstupů a dvanáct stereo výstupů. Díky tomuto lze realizovat různá měření v oblasti zpracování zvuku..

Klíčová slova: ADSP-21469, AD 1939, DSP, zpracování zvuku

1 Úvod

Digitální signálové procesory lze považovat za velice mocný inženýrský nástroj dvacátého prvního století. Tato pokroková technologie se stále rozšiřuje do mnoha oblastí a odvětví, která dříve patřila standartním mikroprocesorům nebo osobním počítačům. Mezi tyto oblasti například patří:

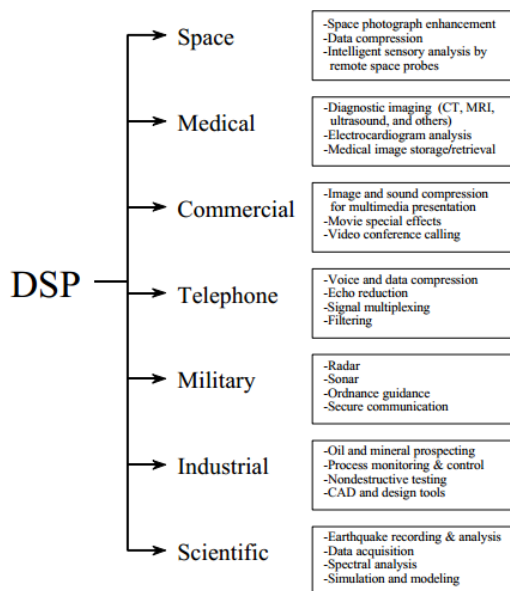
- komunikace,
- medicína,
- lokalizace,
- těžba nerostných surovin
- hudba,

Každá z těchto technologických oblastí rozvíjí DSP technologii pomocí vlastních algoritmů, matematických rovnic a specifických požadavků dané oblasti. Existuje spousta flexibilních zařízení vybavena digitálním procesorem a tyto zařízení jsou navrženy a konstruovány tak, aby mohly být co nejlépe aplikovány v dané technologické oblasti.

Jak již samotný název napovídá, digitální signálové procesory jsou zaměřeny na specifickou oblast dat, a tou oblastí jsou signály. Pomocí senzorů jsou získávány signály z reálného světa, jako například seizmické vibrace, obrazové a zvukové signály a mnohé další. Tyto signály jsou následně zpracovány analogově digitálními převodníky a pomocí algoritmů, matematických operací a různých technik jsou dosaženy požadované výsledky. V určitých oblastech, především pak v audio technice, jsou zvukové signály po digitálním zpracování převedeny zpět jako analogové signály, které jsou pomocí reproduktorů šířeny v požadovaném směru nebo s požadovaným zpožděním. Takto vybavena jsou například všechna moderní kina, která nabízejí 3D ozvučení.

Počátky digitálních signálových procesorů jsou datovány v šedesátých a sedmdesátých letech devatenáctého století s příchodem digitálních počítačů. V té době byly počítače velice drahé a digitální signálové procesory byly určeny pouze pro úzkou oblast použití v klíčových oblastech, jako například bezpečnost země reprezentovaná radary a sonary, dále pak v oblasti hledání nerostného bohatství, především pak ropy. Samostatná kapitola je potom medicína. Taktéž s rozvojem vesmírných cest došlo k rozvoji digitálních signálových procesorů (DSP).

Revoluce v oblasti dostupnosti osobních počítačů, v osmdesátých letech, pomohla rozvoji DSP v mnoha oblastech, kromě armádní oblasti se jednalo především o komerční využití.

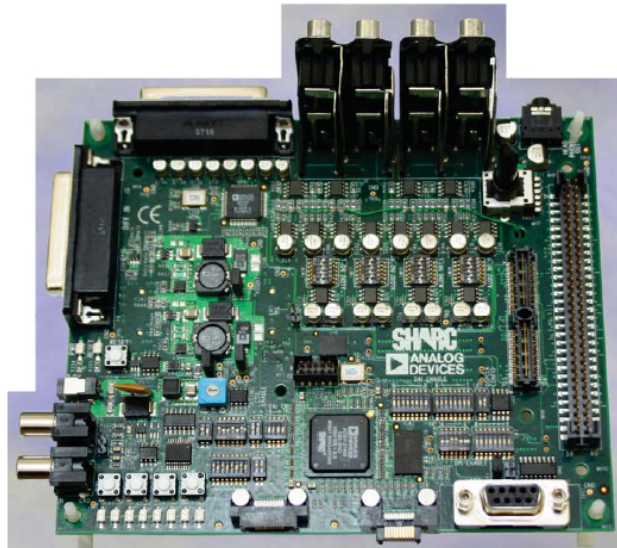


Obrázek 1 Oblasti využití DSP (www.analog.com)

2 SHARC 21469 EZ-LITE

V této práci je zaměřeno na digitální signálový procesor ADSP-21469 osazený na vývojovém kitu SHARC 21469 EZ-LITE. Tento vývojový kit obsahuje toto vybavení:

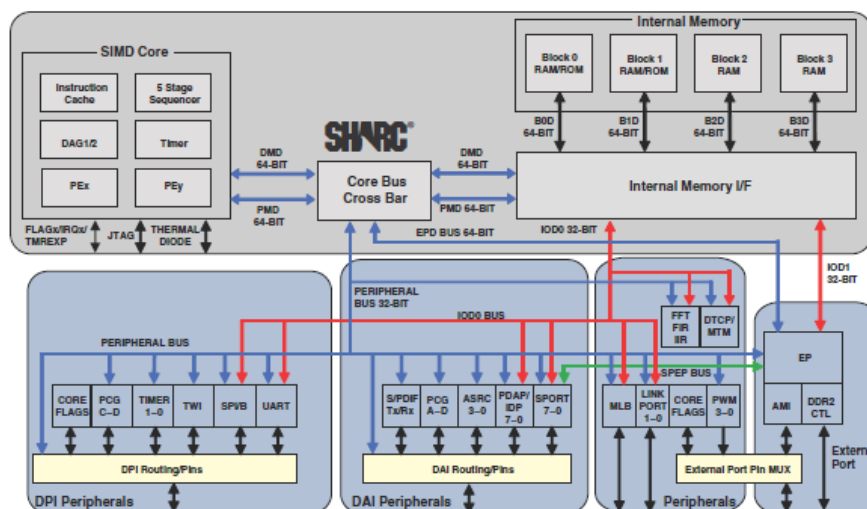
- procesor ADSP-21469 450MHz
- paměť typu flash 4M
- SDRAM paměť 16Mb
- asynchronní SRAM 1M
- SPI paměť 16Mb
- analogový audio kodec AD1939
- RS-232 UART komunikační rozhraní
- 2 stereo vstupy a 4 stereo výstup



Obrázek 2 SHARC 21469 EZ-LITE (www.analog.com)

2.1 ADSP-21469 procesor

Jedná se o vysoce výkonný 32-bit/40-bit procesor s pohyblivou řádovou čárkou (Floating-Point DSP) optimalizovaný pro audio procesy. Tento procesor je vybaven 5-Mbit Ram pamětí a 4-Mbits ROM pamětí umístěné přímo na chipu procesoru. Frekvence procesoru dosahuje až 450MHz. Velice užiteční se jeví akcelerátory pro FIR, IIR a FFT procesy. Ke komunikaci procesoru s okolím slouží tzv. DPI a DAI rozhraní, 8 sériových portů, 2 SPI porty, UART komunikace a PWM modulace.

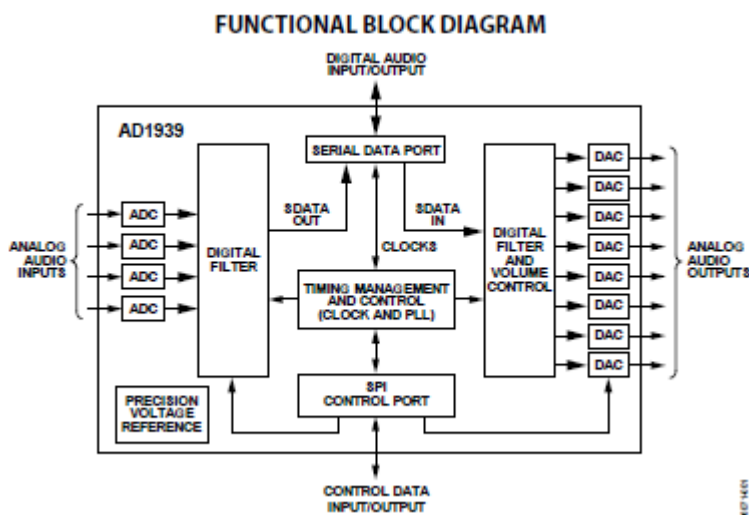


Obrázek 3 Funkční blokový diagram (www.analog.com)

ADSP-21469 procesor je založen na tzv. SHARC architektuře. Anglická zkratka SHARC representuje slovosled Sharc Harvard Architecture, která je navržena tak, aby co nejlépe dokázala využít kombinace procesoru a paměti s okolními I/O zařízeními. Tato Super Harvard architektura rozšiřuje původní koncept oddělené datové a programové části paměti pomocí přídatných I/O sběrnic. Tímto je dosaženo nejrychlejšího možného zpracování dat v reálném čase.

2.2 ADC/DAC audio kodek AD1939

Jedná se o vysoce výkonný jedno-čipový kodek, který poskytuje 4 analogově-digitální převodníky s oddělenými vstupy a 8 digitálně-analogové převodníky s oddělenými výstupy. Podporuje 24-bitové a od 8kHz do 192kHz vzorkovací frekvence. Pro komunikaci mezi kodekem a procesorem je kodek vybaven SPI rozhraním. Toto rozhraní se používá pro inicializaci kodeku a jeho nastavení. Je možné nastavit spoustu možností, jako například hlasitost výstupů nebo délku naměřených vzorků. Kodek je napájen 3.3V.



Obrázek 4 Funkční diagram AD 1939 (www.analog.com)

2.3 Audio EZ-Extender

Jedná se o tzv. „Daughter board“, což lze interpretovat jako vývojovou desku, kterou lze aplikovat na vývojový kit SHARC 21469 EZ-LITE a rozšířit tím počet audio vstupů a výstupů. Tato deska je primárně určená pro audio aplikace a je osazena třemi audio kodeky AD1939. pomocí těchto kodeků je získáno 24 výstupů a 12 vstupů.

3 Využití SHARC 21469 v audio procesech

Tento vývojový kit nabízí širokou škálu aplikací, které lze vytvořit za účelem zpracování zvukových signálů v reálném čase. V tomto článku je zaměřeno na testování jednotlivých kanálů, jejich nastavení a porovnání.

Vývojová deska SHARC 21469 je rozšířena a Audio EZ-Extender, který dovoluje pracovat s 12 analogovými vstupy a 24 digitálními výstupy. Typická aplikace je zapojení jednoho stereo vstupu a několika výstupů. V tomto případě je převeden jeden stereo analogový signál do vývojového kitu, tento signál je nejprve zpracován analogově-digitálním převodníkem AD1939. Takto digitalizovaný signál přichází do procesoru ADSP 21469, který ho zpracuje a dále pošle do digitálně-analogového převodníku, který signál zpracuje a pomocí připojených reproduktorů je digitální signál převeden na zvukový signál. Takto lze ověřit všechny vstupy a výstupy na vývojové desce. Další zajímavou možností je digitalizovaný signál upravovat přímo v procesoru ADSP 21469 a pomocí digitálně-analogového převodníku takto upravený signál pouštět v reproduktorech. Lze tak vyzkoušet různé digitální filtry anebo zpoždovací linky.



Obrázek 5 Typická testovací úloha vstupů a výstupů (www.analog.com)

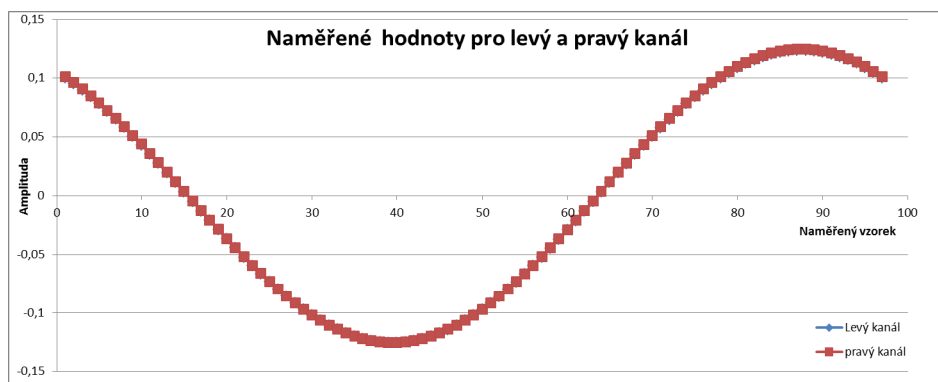
3.2 Testování analogových vstupů a AD převodníků

Je velice důležité popsat vlastnosti jednotlivých vstupů, při stejných počátečních podmínkách, a porovnat tyto vlastnosti mezi nimi. Výsledkem tohoto měření odchylky, které popisují jednotlivé vstupy z hlediska jejich kvality a přesnosti měření.

V následujícím měření byla použita nejvyšší možná nastavitelná vzorkovací frekvence vstupního signálu pro všechny vstupy. Každý jednotlivý stereo vstup se skládá z 2 analogových vstupů, označených jako levý a pravý kanál. Tyto dva kanály lze nazvat jako stereo vstupem. Každý ze tří AD převodníků obsahuje dva stereo vstupy.

V osobním PC je generovaný analogový signál o frekvenci 1000Hz, který je pro všechny jednotlivé vstupy stejný. Spojení mezi PC a DSP je realizován pomocí CINCH kabelů. Takto jsou zajištěny stejné počáteční podmínky pro všechny testované analogové vstupy.

Použité zařízení:	SHARC 21460 EZ-KIT + Audio Extender
Počet testovaných vstupů:	6 stereo vstupů na Audio Extender desce
Signál	Sinus generovaný
Frekvence signálu:	1kHz
Vzorkovací frekvence:	192kHz
Počet naměřených vzorků:	256

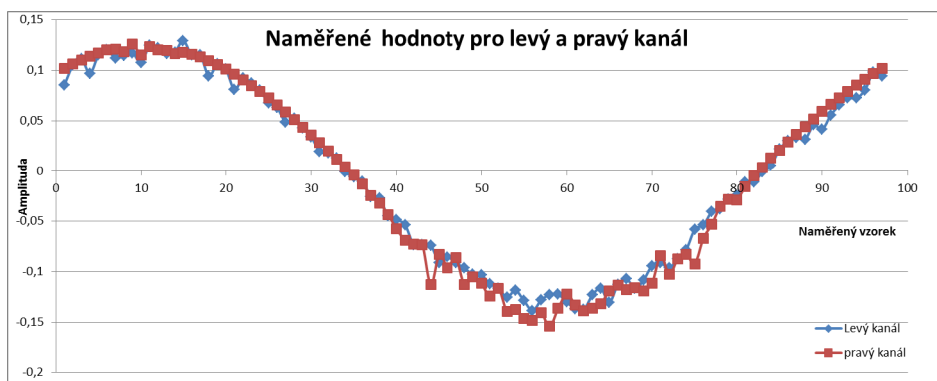


Obrázek 6 Naměřené hodnoty prvního stereo vstupu na prvním AD 1939 převodníku



Obrázek 7 Odchylky mezi dvěma naměřenými kanály prvního AD 1939 převodníku

Obrázek 6 prezentuje naměřená data pro dva vstupní kanály AD převodníku, tzv. stereo vstup. Pro přesnost měření zvukových signálu jsou očekávány hodnoty s minimální vzájemnou odchylkou. Jak je patrné z obrázku 7 odchylky mezi levým a pravým kanálem jsou v řádech 10^{-4} , vyjádřeno v procentech se jedná o maximální odchylku 1%.



Obrázek 8 Naměřené hodnoty prvního stereo vstupu na druhém AD 1939 převodníku



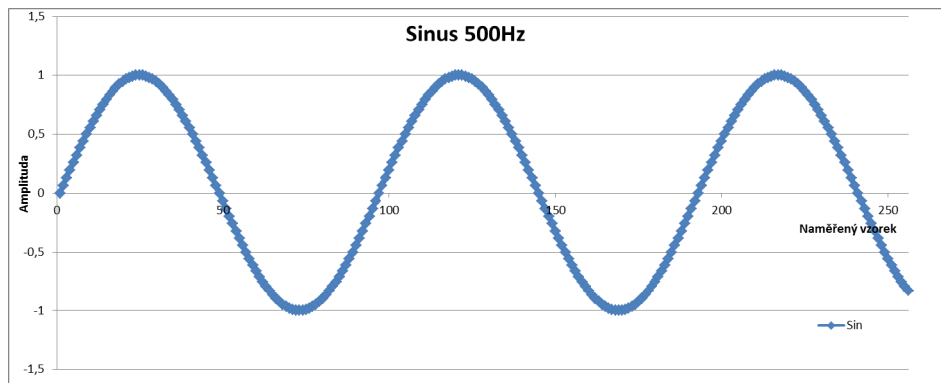
Obrázek 9 Odchylky mezi dvěma naměřenými kanály druhého AD 1939 převodníku

Postupně byly zkontrolovány všechny kanály všech AD 1939 převodníků osazených na Audio Extender desce. Naměřená data na obrázku číslo 8 vykazují odchylky mezi dvěma kanály. Tyto odchylky jsou až 10%. Při úvaze, že by všechny vstupní kanály byly využity pro kontinuální měření dat, bude potřeba počítat s touto nepřesností a buď ji kompenzovat a nebo rovnou nepřesný kanál vyloučit s měřicí soustavy.

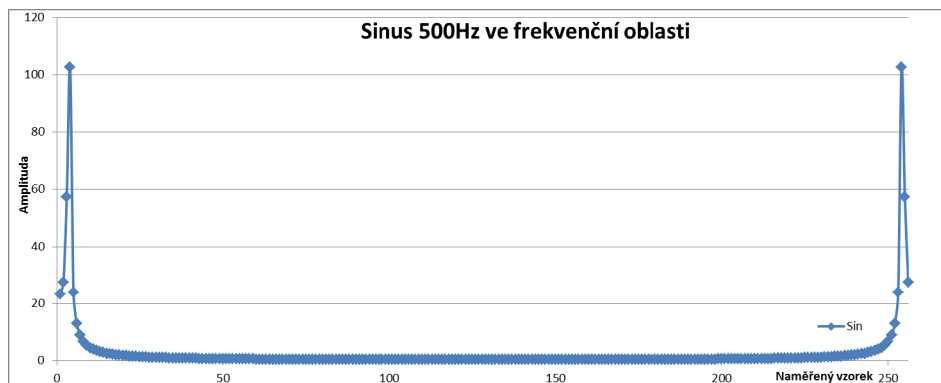
3.3 Využití FFT akcelerátoru pro analýzu signálu ve frekvenční oblasti

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1 samotný procesor SHARC 21469 obsahuje akcelerátor pro FFT výpočet. Zde je několik možností jak a kde využít tohoto doplňku. Především se nabízí možnost rychlé transformace signálu naměřeného v časové oblasti do frekvenční a jeho následné analýzy. Pro další test byl generovaný jednoduchý signál sinus.

Použité zařízení:	SHARC 21460 EZ-KIT
Signál:	Sinus
Frekvence signálu:	500Hz
Vzorkovací frekvence:	48kHz
Počet naměřených vzorků:	256



Obrázek 10 Generovaný signál pro následnou analýzu s využitím FFT akcelerátoru



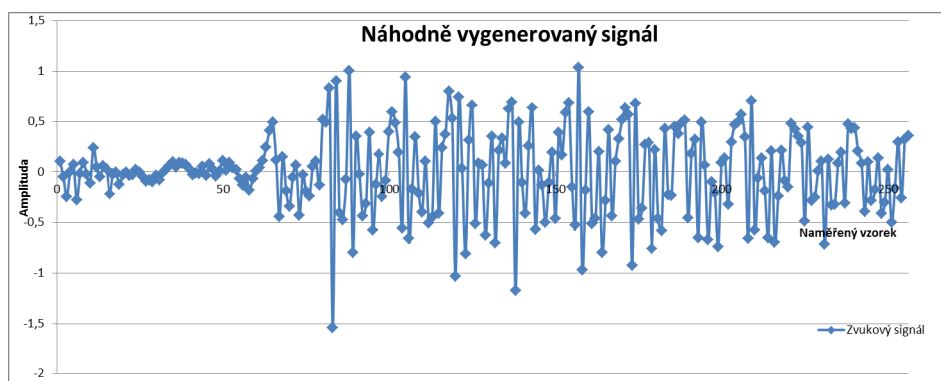
Obrázek 11 Frekvenční oblast sinusového signálu vypočtená pomocí FFT akcelerátoru

Generovaný sinusový signál o frekvenci 500Hz je vyobrazen na obrázku 10. Jeho transformace do frekvenční oblasti byla provedena za pomoci FFT akcelerátoru, který je součástí procesoru SHARC 21469. Výsledek po výpočtu je vyjádřen reálnou a imaginární složkou. Z těchto složek je pak jednoduché vypočítat amplitudu a fázi.

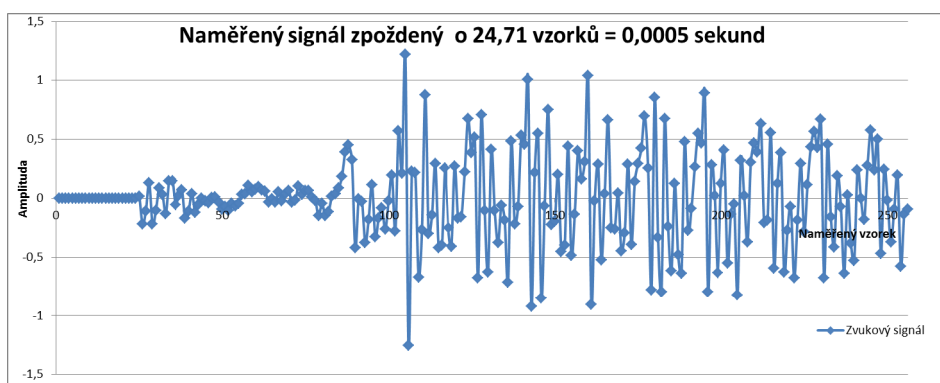
3.3 Využití FIR akcelerátoru

Samotný FIR filtr lze použít například při zjištění hodnot, které se nacházejí mezi dvěma naměřenými vzorky. Pokud je například potřeba zpozdít naměřený signál o celé vzorky, není to problém. Pokud je však žádoucí zpozdít signál o hodnotu odpovídající zlomku celého vzorkovaného signálu, je FIR filtr ideálním nástrojem.

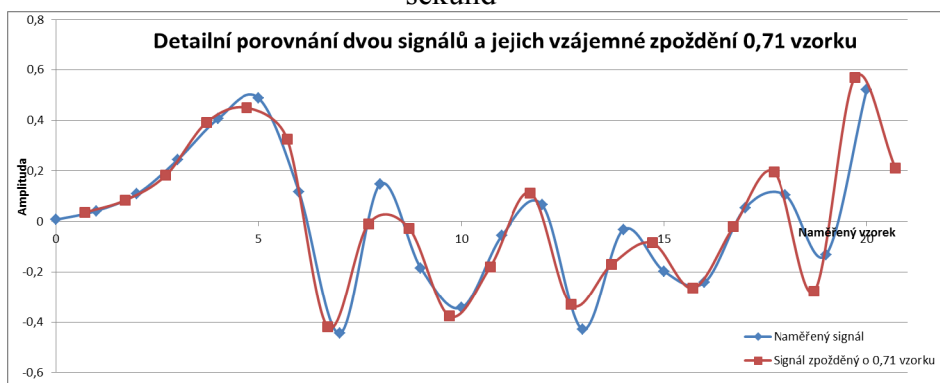
Použité zařízení:	SHARC 21460 EZ-KIT
Signál:	Měřený mikrofonem
Vzorkovací frekvence:	48kHz
Počet naměřených vzorků:	256



Obrázek 12 Naměřený signál



Obrázek 13 Naměřený signál – zpožděný užitím FIR akcelérátoru funkce o 0,0005 sekund



Obrázek 14 Detailní porovnání dvou signálů, z nichž jeden je oproti druhému zpožděn o 0,71 vzorku

4 Závěr

Tento článek je velice stručně zaměřen na popis a využití vývojového kitu SHARC 21469 EZ-LIT. Jedná se o vývojový kit firmy Analog Devices, který je určen pro práci se signály. Rozšíření toho základního kitu o přídatnou desku, obsahující 6 analogových stereo vstupů a 12 analogových stereo výstupů, dostaneme komplexní měřicí nástroj, kterým lze zpracovávat audio signály. Měřené úlohy jsou krátce popsány a naměřené výsledky prezentovány ve formě grafů. Samotné hardwarové a softwarové řešení pro jednotlivé úlohy v tomto článku není, z důvodu velkého rozsahu, možné rozebrat.

5 Použitá literatura

ANALOG DEVICES WEB SITE, [online]. 2014 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.analog.com>

Ověření nové technologie vozby vlaků simulačním modelem

LORENZ, Filip

Ing., 17. listopadu 15, Ostrava, VŠB – TUO, filip.lorenz.st1@vsb.cz

Abstrakt: Článek se zabývá tvorbou simulačního modelu, který slouží k ověření nově navrhované vozby vlaků na vybraném úseku. V části první je charakterizována řešená problematika zabývající se oběhy lokomotiv podílejících se na přepravách v rámci celostátní železniční sítě. V následující kapitole je uveden simulační software, který byl pro řešení dané problematiky vybrán a nutné vstupní údaje, které jsou nezbytné pro tvorbu simulačního modelu. Následuje kapitola zabývající se vlastní tvorbou modelu pro konkrétní případ z praxe. Závěrečná kapitola shrnuje výsledky dosažené simulačními experimenty.

Klíčová slova: *simulační software, simulační experiment, model, hnací kolejové vozidlo, oběhy vozidel.*

1 Úvod

Železniční doprava je určena zejména k přepravě větších objemů zboží na delší vzdálenosti. Těmto vyšším dopravním výkonům odpovídá i technicky náročnější a vyspělejší technická základna, která je využívána. Této skutečnosti odpovídá i vyšší pořizovací cena této techniky. Proto je nutno, aby tato technika byla využívána maximálně efektivně, byla co nejvíce v provozu a měla co nejméně prostojů.

Při plánování přeprav je tedy vhodné, aby byly tyto přepravy realizovány s co nejnižším počtem vozidel, která jsou schopna předpokládaný objem výkonů v požadované kvalitě zabezpečit. To se týká zejména lokomotiv, které představují nejnákladnější část železniční dopravy, a proto je u nich kladen největší důraz na jejich efektivní využití.

Jedním z možných a v současnosti stále častěji využívaným způsobem ověřování navržených řešení je využití simulačního softwaru. Simulační software umožňuje ověřit, zda navržený způsob organizace a řízení systému je za daných vstupních podmínek schopen naplnit požadavky od něj očekávané. Můžeme zmínit některé články zaměřené na užití simulace v dopravě – viz. články [1] až [4]. Pro železniční dopravu je typickým případem ověření, zda uvažovaný počet lokomotiv je schopen zabezpečit odvoz požadovaného množství vlaků.

Moderní způsob ověřování navržených řešení pomocí simulačních technologií využívá i společnost Advanced World Transport (dále jen AWT). Jeden z řešených případů bude představen v tomto článku.

2 Popis řešené problematiky

V rámci železničních přeprav na síti celostátní dráhy SŽDC, které realizuje společnost Advanced World Transport a.s., bylo u jedné z relací, na které se realizuje větší objem přeprav, navržena možnost změny v technologii vozby. V současnosti totiž každý vlak z této relace má přidělenou lokomotivu, která odveze vlak na této relaci, a dále mohou následovat výkony na jiných tratích. Nově je navržena technologie odvozu zátěže, v níž je zásadní změnou alokace lokomotivy na výkony na konkrétní železniční trati nebo jejím úseku. Lokomotiva zde může realizovat přepravu vlaků různých přepravních relací.

Cílem je tedy stav, kdy vlaky nebudou muset čekat na přidělení lokomotivy pro přepravu, ale budou použity lokomotivy speciálně vyhrazené pro přepravy na této trati, které budou neustále operovat výhradně na této trati. Vzhledem k proměnlivému počtu vlaků, které jsou na této trati přepravovány, jsou v tomto případě obavy, zda bude pro určené lokomotivy dostatek práce.

Úlohou simulačního software je prověření, jaký počet lokomotiv je vhodné pro tyto oběhy vyčlenit, aby byl k dispozici dostatečný počet lokomotiv pro odvoz předpokládaného objemu přeprav a počet lokomotiv nebyl naddimenzovaný a aby nedocházelo ke zbytečným prostojeům.

Simulační model byl sestaven v software Witness společnosti Lanner Group. Tento software původně pořídila společnost AWT pro ověřování kapacitních možností vleček, ale díky jeho univerzálnosti je možno jej využít pro široké spektrum aplikací nejen z železniční dopravy.

K sestavě simulačního modelu je potřeba mít k dispozici několik vstupních údajů. Mezi ně patří zejména:

- Počty vlaků přepravovaných na dané relaci za zvolené časové období,
- jízdní doby,
- doby trvání technologických operací (zkouška brzdy, technická/přepravní prohlídka),
- počet lokomotiv, které mají být na danou relaci nasazeny,
- další časové údaje v závislosti na požadovaných rozšířených variantách modelu.

Jako vstupní data byly použity skutečné údaje zjištěné v reálném železničním provozu. Počty vlaků byly zjištěny analýzou realizovaných zakázek za období jednoho měsíce bezprostředně předcházejícího před datem sestavení modelu tak, aby byly k dispozici nejaktuálnější údaje. V rámci počtů vlaků byly sestaveny dvě varianty modelu, přičemž v první variantě bylo uvažováno pouze s počty vlaků pravidelných a ve druhé variantě se uvažovalo kromě vlaků pravidelných i s vlaky spotovými (vlaky, které jezdí dle potřeby, bez pravidelného harmonogramu).

Jízdní doby byly v první fázi pro zjednodušení uvažovány konstantní, stejně jako doby technologických operací. Co se týče počtu lokomotiv, zatím bylo uvažováno pouze s jednou lokomotivou a až na základě úrovně využití této lokomotivy bude rozhodnuto o navýšení tohoto počtu.

Na základní simulační model poté navazují rozšířené varianty, jejichž cílem je přiblížit se více realitě. Tyto „nástavby“ základního modelu jsou popsány podrobněji v následující kapitole, která bude popisovat řešení konkrétního případu a jeho postupné rozšiřování.

Validace a verifikace simulačního modelu vychází ze splnění podmínek jízdních dob a technologických operací, které jsou pro železniční dopravu nutné. Vzhledem k tomu, že simulační model je vytvořen pro modelování nově navržené technologie vozby vlaků nelze jej dalším způsobem validovat a verifikovat.

3 Řešení příkladu z praxe

V rámci první fáze bylo rozhodnuto o sestavě základního modelu, který bude obsahovat pouze základní činnosti týkající se železniční dopravy. V rámci modelované relace je uvažováno s počty vlaků, uvedených v tabulce 1 – tyto počty vycházejí z evidence za zvolený kalendářní měsíc.

Tabulka 1: Počty přepravovaných vlaků

Směr	Počet vlaků	
	Pravidelné	Pravidelné + Spotové
Stanice 1 > Stanice 2	62	71
Stanice 2 > Stanice 1	56	63

V rámci procesu bylo uvažováno s variantou, kdy před odjezdem se provedou technologické operace, jejichž celkové trvání bylo vždy stanoveno na 120 minut. Poté následuje jízda vlaku, jejíž doba byla pro řešený úsek stanovena na 240 minut (v praxi je obvykle dosahováno hodnot nižších, ale z hlediska možných nepravidelností v dopravě je vhodnější tento čas nadhodnotit, aby byla simulována pesimističtější varianta). Po dojezdu do koncové stanice nastávají pouze tři možnosti:

- 1) Lokomotiva je přiřazena k technologickým operacím před odjezdem vlaku s následnou realizací jízdy (v této koncové stanici je vlak, který je možno odvést),
- 2) lokomotiva se vrací strojně do výchozí stanice (v koncové stanici není k dispozici vlak, který by bylo možno odvést, ale vlak je k dispozici opět ve stanici, ze které byl dovezen předchozí vlak),
- 3) lokomotiva má prostoj (v relaci není k dispozici žádný vlak, který by bylo možno odvést).

Model sestavený za výše uvedených možností je základním modelem, na který budou následovat rozšířené varianty. Již po sestavení a provedených experimentech s tímto modelem je však možno vyhodnotit získané využití lokomotivy.

Jednou z možností, jak dále rozvíjet již představený model je sestavení varianty, ve které bude zvýšen počet lokomotiv. Byl však upřednostněn rozvoj stávajícího modelu do podoby, která bude ještě lépe odrážet skutečné fungování železniční dopravy. Pozornost v dalším rozvoji simulačního modelu byla zaměřena na zdokonalení modelu do podoby lépe odrážející reálný provoz. Pozornost byla postupně zaměřena na dvě problematiky:

- a) Zohlednění čekání lokomotiv na následující vlak (eliminace strojních jízd),
- b) zohlednění dodržování FPD (fondu pracovní doby) strojvůdců.

ad a)

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, při dojezdu do koncové stanice mohly nastat 3 základní stavy označené 1) – 3). Obecně platilo, že lokomotiva nikdy nečekala na potenciální vlak, který se mohl objevit ve stanici, v níž se lokomotiva aktuálně nachází. Namísto čekání okamžitě, když byl k dispozici požadavek (i ve druhé koncové stanici), byl k vlaku přiřazen. Toto není vhodný stav, pokud byl požadavek v druhé koncové stanici, protože u tohoto požadavku vznikají neefektivní strojní jízdy. Cílem první úpravy bylo doplnění modelu o možnost vyčkání lokomotivy ve stanici, i když je v opačné koncové stanici požadavek, za předpokladu, že je známo, že ve stanici, ve které se aktuálně lokomotiva nachází, bude ve zvoleném časovém období k dispozici vlak, který bude možno odvést. Díky této úpravě je možno dosáhnout snížení počtu strojních jízd. Lokomotiva totiž nejprve vyčká (v rámci stanoveného intervalu) na nový požadavek ve stanici, ve které se nachází, a splnění požadavku v druhé koncové stanici nebude tedy předcházet strojní jízdou, ale jízdou s vlakem. Přestože narostou u lokomotivy čekací doby, budou eliminovány strojní jízdy, což je daleko důležitější skutečnost, neboť při čekání je čerpán pouze FPD strojvedoucího (a lokomotivy) kdežto při strojní jízdě se jedná o spotřebu energií a platbu za dopravní cestu.

ad b)

Následující varianta se zaměřuje na řízení oběhů lokomotiv s přihlédnutím ke směnám strojvedoucích. Předchozí varianty totiž přihlížely pouze k oběhům lokomotiv ve vztahu k požadavkům na přepravy. Důležitým faktorem ovlivňujícím oběhy lokomotiv je však i pracovní doba strojvedoucích.

V této modifikaci úlohy byl simulační model doplněn i o sledování průběhu směny strojvedoucího. Cílem bylo zajistit oběh lokomotiv tak, aby strojvedoucí vykonávali co nejnižší přesčasovou práci. V předchozích modelech, kdy tento problém nebyl řešen, totiž velmi často docházelo k situaci, že FPD byl vyčerpán v průběhu jízdy na trati. Zde však obvykle nemůže dojít ke střídání strojvedoucích. Střídání je zajištěno až v koncové stanici, takže do doby dojezdu se strojvedoucímu načítají přesčasová práce.

Nyní je situace vyřešena tak, že pokud před odjezdem vlaku ze stanice je zůstatek FPD nižší, než je stanovený limit (nejlépe jízdní doba mezi stanicemi), jízda lokomotivy se nerealizuje a vyčká se na doběhnutí FPD současného strojvedoucího. Střídání se tedy realizuje ve stanici, aniž by strojvedoucí plynul přesčas.

Zde je samozřejmě otázkou, zda je výhodnější, aby vlak nevyjel a čekal ve stanici na střídání strojvedoucího, nebo je ekonomicky výhodnější, aby vlak vyjel ze stanice neprodleně po odbavení, strojvedoucí pracoval přesčas (pokud již není vyčerpán zákonný limit objemů přesčasů) a vlak byl odvezen co nejrychleji. Tím eliminujeme prostoje lokomotiv.

Po sestavení simulačního modelu a provedených simulačních experimentech byly získány výsledky uvedené v tabulce 2.

Varianty modelu:

1x: Simulační modely, u kterých se uvažuje pouze s pravidelnými vlaky,

2x: simulační modely, u kterých se uvažuje s pravidelnými + spotovými vlaky,

xa: základní simulační modely, bez zohlednění čekání lokomotiv na následující vlak,

xb: simulační modely zohledňující možnost čekání lokomotiv na následující vlak ve stejné stanici,

xc: simulační modely zohledňující dodržování FPD strojvedců.

Tabulka 2: Přehled získaných výsledků

Přehled získaných výstupů simulačních modelů							
		Model 1a	Model 1b	Model 1c	Model 2a	Model 2b	Model 2c
Využití lokomotivy	%	96,9	95,3	98	100	99,7	99,9
Prostoj lokomotivy	%	3,1	4,7	2	0	0,3	0,1
Podíl činnosti – technologické operace	%	29,2	29,2	28,9	32,3	32	32
Podíl činnosti – vozba vlaku	%	58,3	58,3	57,3	64,6	64,1	63,5
Podíl činnosti – strojní jízdy	%	9,4	7,8	8,9	3,1	3,6	3,1
Podíl činnosti – čekání na střídání	%	0	0	2,9	0	0	1,3
Počet strojních jízd	-	18	15	17	6	7	6
Maximální počet vlaků ve frontě – Stanice 1	-	3	3	4	7	7	7
Maximální počet vlaků ve frontě – Stanice 2	-	1	3	2	4	4	4

Z dosažených výsledků je možno vidět, že i pro základní variantu, která uvažovala pouze s pravidelnými vlaky, dosahuje využití lokomotivy více než 96%, což lze považovat za velmi přetížený systém, neboť za optimální využití prostředků se v železniční dopravě uvažuje s hodnotou cca 70%. Pro variantu modelu, ve kterém jsou kromě pravidelných vlaků zahrnuty i spotové přepravy, je využití lokomotivy 100%, což již zcela jednoznačně znamená, že jedna lokomotiva je pro plánovaný objem přeprav nedostačující. Díky tomu, že se jedná o přetížený systém, nelze ani výsledky 2. varianty modelu považovat za relevantní a pozornost je možno zaměřit pouze na výsledky modelů 1a – 1c.

Je možno vidět, že díky sestavení varianty modelu 1b se podařilo oproti základní variantě snížit počet strojních jízd a tím i nepatrně snížit využití lokomotivy (ovšem za cenu vyšších počtů vlaků hromadících se v koncových stanicích). Varianta modelu 1c zase ukazuje, že úpravou modelu je možno vyřešit také překračování FPD. Získané hodnoty u modelů 1b a 1c jsou však variabilní a závisí na výši tolerance, která se u simulačního modelu stanoví jako rozhodná hodnota (čas po který se čeká na další vlak ve stejné stanici/ čas na doběhnutí FPD a vystřídání strojvedoucího ve stanici).

4 Závěr

Problematika představená v tomto článku může být považována za ukázkový příklad efektivního využití simulačních metod. Simulační model sestavený na základě skutečných údajů z provozu dokázal dopředu ověřit reálnost návrhu nové technologie vozby vlaků společnosti AWT. Ukázalo se, že navrhovaný způsob organizace vlakové dopravy je reálný. Díky simulačnímu modelu bylo navíc ověřeno, že navrhovaný počet lokomotiv nebude pro daný objem dopravy dostatečný a bude potřeba navýšit počet lokomotiv. Díky ověření pomocí situačního modelu byl problém nedostatku lokomotiv odhalen ještě před ostrým provozem, takže je možno na situaci reagovat s předstihem a nikoliv až v okamžiku, kdy se nedostatek lokomotiv projeví až v reálném provozu.

Díky univerzálnosti použitého simulačního software bylo možno navíc využít nástroj, který byl původně společností AWT pořízen ke zcela jiným účelům a který je schopen řešit široké spektrum problémů nejen v oblasti železniční dopravy.

S podporou provedených simulačních experimentů byl navržený způsob technologie odvozu vlaků zaveden do běžné praxe. Vždy je třeba kalkulovat s jistou dobou, než se výhody nové technologie naplno projeví, protože řízení provozu (alokace kapacitních zdrojů: lokomotiv, vozů a personálu) je prováděna lidským činitelem, který si musí nový způsob práce a uvažování nejprve osvojit. Přesto bylo ihned po zahájení realizace dosaženo navýšení průměrného denního kilometrického proběhu lokomotiv o 20-30%, přičemž potenciál je ještě vyšší.

4 Použitá literatura

N. Adamko and P. Marton, "Villon – Simulation Based Design for a Railway Logistics Re-Engineering Project," in Communications - Scientific Letters of the University of Žilina, roč. 10, č. 2, str. 10 – 14, 2008.


M. Dorda and D. Teichmann, "Modelling of Freight Trains Classification Using Queueing System Subject to Breakdowns," Mathematical Problems in Engineering, Article ID 307652, 11 str., 2013. doi:10.1155/2013/307652.

N. Adamko and V. Klima, "Optimisation of Railway Terminal Design and Operations Using Villon Generic Simulation Model," in Transport, roč. 23, č. 4, str. 335 – 340, 2008.

A. Kavicka and M. Bazant, "M. Simulation as a Support for Planning Infrastructure Within Prague Masaryk Station," In Proceedings 21st European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2007). Pontypridd: European Council for Modelling and Simulation, str. 363 – 367, 2007.

Multi Agent Distributed Control System for Coordination of Heating Plants

MARIŠKA, Martin¹, DUŠEK, František¹, LIGUŠOVÁ, Jana² & LIGUŠ, Ján²

¹  Department of Process Control, Faculty of Electrical Engineering, University of Pardubice, Pardubice

 e-mail: mariska.martin@gmail.com, frantisek.dusek@upce.cz

²  Department of Cybernetics and Artificial Intelligence, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical University, Kosice

 e-mail: jana.ligusova@tuke.sk, jan.ligus@tuke.sk

Abstract: *This article presents an approach to multi agent distributed control and heating system coordination. This heating system is composed of heterogeneous heating plant subsystems. The demand on the whole system is to provide the total heat output. The multi agent distributed control system is designed to optimize the plant configuration and operative strategies and to minimize chosen operating costs. The automated control using multi agent approach increases the speed of global optimization and system reconfiguration time. It helps to make the system less dependent on human factor and more resilient for human errors. The group of heating plants is fully automated and coordinated on the basis of total heat output requirement and local plant criteria. In advance, the presented solution provides the intelligent reconfiguration of the heating system in the case of exclusion, inclusion or failure of a subsystem.*

Keywords: *multi agent systems, coordination of PLC, plant control*

1 Introduction

Heating a place we live in has always been and still is a basic human necessity for living. This requirement enables us to live and work in locations with low temperature. In the past the heating solutions were simple. An open fire on the floor of a tent or a simple shelter, made it possible to survive in a hostile environment. However, as civilisation developed there was migration from the countryside to the towns and cities and into bigger and bigger houses, creating a requirement for more elaborate heating systems.

The purpose of a good heating system is to create the best environment as possible. The construction of the building with a well designed heating system, associated with good automatic controls, minimises the heating requirements and emissions radically. This article aims on optimising the larger heterogenic heating systems where collaboration between subsystems gives the appropriate advantage.

The idea of autonomous agents collaboration in proposed problems solving is a strong analogy for the engineering of distributed and interoperable software systems. This multi agent approach presents an innovative level of abstraction of knowledge level cooperation between autonomous systems that improves distributed systems scalability, interoperability and enhance configuration options. However, the promise of the agent approach has been largely unrealised in the distributed software engineering community. This is primarily due to the inherent complexity of constructing collaborative agent systems. Moreover, next factor is

the current lack of standards for agent technology. More information about multi agent systems is in Brooks, Durfee, 2003 or Wooldridge, 2009.

One of possible approaches for coordination in agent based system is negotiation which is used in this paper. With negotiation, the agents engage in dialogue, exchange proposals with each other, evaluate other agents' proposals and then modify their own proposals until a state is reached and all agents are satisfied with the set of proposals. Typical negotiation mechanisms are based on game theory, some form of planning or human-inspired negotiations. Further information are in Nwana, Lee, Jennings, 1996.

2 System Description

The controlled system is composed of heterogeneous heating plants. Individual heating plant is considered as a subsystem that can be controlled separately by the programmable logic controller (PLC). PLC can be handled manually by operator or automatically by Ethernet packets. All subsystems are connected to the same private local area network infrastructure in order to enable the internal communication in the system.

The system consists of different types of heating plants which can originate from different manufacturers, can be fuelled by various substances and can produce various heat power. However, some restrictions can also exist in particular cases. For example, the output heat power of several particular subsystems has to be equal. This is the typical case of gas-fired heating plants which are connected to the same source of gas supply. Thenceforward, we will refer to all these restrictions or requirements as local criteria of subsystem.

The main demand on the whole system is to provide the desired total heat output. Thus, the control system divides the power optimally into chosen subsystems in order to minimize the operating costs of the entire system. The system configurations still comply with all local criteria. The change of total heat output or system capabilities is also possible, but this change induces an automatic reconfiguration of the system with a view to find new optimal solution. Events generated by PLC are also considered as a reason for new optimisation start up. The automatic reconfiguration is typical in cases of inclusion, exclusion or failure of subsystem.

The main motivation of this approach is to eliminate the manual control due to the complexity of problem. The more number of heating subsystems and local criteria, the more complex problem and the faster reconfiguration is required. Moreover, a small change can lead to extensive reconfiguration.

3 System infrastructure and Solution

We present the multi agent approach as one of possible solutions for defined problem. The multi agent control system (MACS) runs on computers and it is based on java platform. The multi agent part of system is implemented in JADE framework and its communication with PLC is realised directly with using the socket connection. Agents use standardised *agent communication language* (ACL) and in our approach, the FIPA ACL implementation is used, more in FIPA Specification, 1998. Therefore, the further multi agent system can be easily connected and integrated to this MACS. Extensibility, standardisation and distribution of agents are the main advantages of this solution.

MACS is designed in such way that each of subsystems has its own agent (the representative agent). This agent is the representative of its subsystem's local criteria and it presents the main communication point between its subsystem and the other agents of MACS subsystems and its specific PLC. Therefore, the implementation of this agent contains extra communication protocol and interface to communicate with the appropriate PLC.

MACS also contains an agent to coordinate and optimize the entire system (the coordination agent). The coordination agent communicates with the human operator by using the graphical user interface (GUI) on the PC or tablet. The agent takes over new requirements from the operator or responds to changes in the system. The changes are typically registered

by the representative agents and they alert other agents in the MACS. When a claim to the system configuration change appears, the coordination agent will require current local information from all available subsystems and subsequently carries out multi-criteria optimization to find the optimal configuration for the desired output.

The simple ad-hoc integration of the new subsystem, change configuration of existing subsystem, temporary or complete shutdown of the subsystem are the benefits of the MACS solution. The system does not need to be shut down or restarted in the case of subsystem changes. The only necessity is to configure the appropriate agent for changed subsystem. Everything can be done dynamically while the system is running. Moreover, the indisputable advantage is that the multi agent approach is implicitly a distributed system. This characteristic can be utilised for increasing system reliability and robustness. For example, we can add an agent backup strategy which makes a copy of each agent on various computers in case that a computer node is unexpectedly shut down or has an unexpected failure. The backup agents cyclically control their accessibility to their originals and they replace the original agent's functionality in case of the original one is unreachable.

4 Conclusion

This article is focused on multi agent distributed control system. This multi agent control system consists of heterogeneous group of heating subsystems. The proposed control system is able to coordinate all subsystems and achieve optimal total operating costs with regard to local criteria of subsystems. Furthermore, the system is designed for ad-hoc reconfiguration of subsystems and their dynamic changes. Each change can start the optimisation process. The system can also dynamically add or remove a heating subsystem or it can effectively react on its failure.

The first part of the article describes the controlled system and the architecture of multi agent control system is characterized in the second part of the contribution.

Acknowledgments. The work has been partially supported by project *Support of short term attachments and skilful activities for innovation of tertiary education* at the Jan Perner Transport Faculty and Faculty of Electrical Engineering and Informatics – University of Pardubice, CZ.1.07/2.4.00/17.0107 and partially by the funds of the IGA, University of Pardubice, Czech Republic. This support is very gratefully acknowledged.

References

BROOKS, C. H., DURFEE, E. H. Congregation Formation in Multiagent Systems. In: *Autonomous Agents and Multiagent Systems*. Vol. 7., 2003, pp. 145-170.

NWANA, H., L. LEE a N. JENNINGS. Coordination in Software Agent Systems. In: *BT Technology Journal*. 14(4), 1996.

The Foundation for Intelligent Physical Agents: The FIPA '97 Specification. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://leonardo.chiariglione.org/standards/fipa/spec/fipa97/fipa97.htm>

WOOLDRIDGE, M. J. *An introduction to multiagent systems*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2009, xviii, 348 s. ISBN 978-0-470-51946-2.

Porovnanie výsledkov experimentu na základe použitia štatistických metód a využitím neurónových sietí Comparison of Experiment Evaluation by Statistical Methods and by Using Neural Networks

MICHAL, Peter

Ing., ✉ Department of Mathematics, Informatics and Cybernetics, FMT TU of Košice,
Bayerova 1, Prešov 080 01, Slovakia, 🖨 peter.michal@tuke.sk

Abstrakt: Príspevok porovnáva predikčné modely hrúbky vytvoreného zinkového povlaku, ktoré boli zostavené pomocou klasických štatistických metód a pomocou princípov neurónových sietí. Pri predikčnom modeli, ktorý bol zostavený s využitím princípov umelej inteligencie, bola použitá neurónová jednotka využívajúca adaptívny optimalizačný algoritmus Levenberg-Marquardt. Hrúbka zinkového povlaku, ktorá sa vytvorí na povrchu vzorky zliatiny S355 EN 1025, bola sledovaná pre povrchovú prúdovú hustotu $3 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$. Pre predikčný model zostavený pomocou neurónovej jednotky sa navyše sledoval aj vplyv počtu tréningových dát na výslednú presnosť zostaveného predikčného modelu.

KLúčová slová: neurónové siete, povlaky, výsledky experimentu, zinkovanie

1 Úvod

Galvanické zinkovanie je značne rozšírená protikorózna ochrana ocele, neželezných kovových zliatin ako aj nekovových vodivých materiálov, pre svoju jednoduchosť a cenovú dostupnosť [Vita a kol. 2011], [Ballesteros a kol. 2007]. Jedná sa o elektrolytický proces vylučovania zinkového povlaku na povrchu katódy. Takýto povlak, katodicky a bariérový [Yadav a kol. 2007], chráni povrch súčiastky pred nežiaducim vplyvom, prostredia [Jong-Min a kol. 2006], [Zhang a kol. 1993]. Povrchová textúra, ako aj morfológia povlaku je silne závislá na prevádzkových podmienkach [Xia a kol. 2009], medzi ktoré patrí povrchová prúdová hustota [Mackinnon a kol. 1986], pH [Alfantzai a kol. 2001], a teplota elektrolytu [Gombár a kol. 2014], chemické zloženie elektrolytu [Badida a kol. 2013], aditíva [Michal a kol. 2013] a nečistoty [Vagaská a kol. 2013]. Aby sa dosiahla požadovaná kvalita povlaku, je potrebné tieto faktory udržiavať na optimálnej úrovni [Gombár a kol. 2013]. Určiť optimálne prevádzkové parametre je pomocou matematicko–štatistických procesov náročné [Hrehová a kol. 2012], [Evin a kol. 2013], pretože už aj uvažovanie niekoľkých parametrov vedie k zložitému analytickému riešeniu. Na druhej strane, použitie umelej inteligencie k vyhodnoteniu experimentálne získaných dát predstavuje svoje výhody, hlavne pre ich schopnosť zostaviť presnejší predikčný model za kratší čas [Bukovsky a kol. 2010], [Gupta a kol. 2012].

2 Realizácia experimentu

Pre účely experimentu boli použité vzorky materiálu S355 EN 10025 s rozmermi $100,00 \times 70,00 \times 0,50$ mm. Pred nanosením zinkového povlaku bola každá vzorka ošetrená nasledovným spôsobom:

1. Odmastenie vo vodnom roztoku 0,6 % uhličitan sodný; 0,06 % amín c 18-primárny etoxylovaný; 0,15 % mastný aminethoxylát; 0,6 % metakremičitan sodný pentahydrát; 0,6 % hydroxid sodný $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=3\text{ min}$.
2. Opláchnutie v destilovanej vode.
3. Morenie vodnom roztoku HCl 18 %, $T=18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=1\text{ min}$.
4. Opláchnutie v destilovanej vode.
5. Vysušenie stlačeným vzduchom.

Po vysušení bola vzorka okamžite ponorená do pripraveného elektrolytu a následne bol spustený proces kyslého galvanického zinkovania.

K identifikácii vzťahu medzi hrúbkou vylúčeného zinkového povlaku a faktormi, ktoré ovplyvňujú proces galvanického zinkovania bol realizovaný plánovaný experiment. Jadro plánovaného experimentu tvoril centrálny kompozitný plán pre šesť faktorov, ktoré ovplyvňujú proces galvanického zinkovania. Podľa tohto plánu experimentu bolo riadené chemické zloženie použitých elektrolytov a prevádzkové podmienky technologického procesu galvanického zinkovania. Okrem hlavných zložiek boli do elektrolytu pridané aj aditíva, ktorých množstvo bolo vždy konštantné a preto sa s nimi neuvažovalo ako so samostatnými faktormi. Po nanosení zinkového povlaku na jednotlivé vzorky bola meraná jeho hrúbka v oblasti s povrchovou prúdovou hustotou $3\text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$. Tabuľka 1 zobrazuje prevody medzi prirodzenou a kódovanou mierkou. Kódovaná mierka bola použitá za účelom odstránenia vplyvu absolútnych hodnôt na presnosť zostaveného predikčného modelu.

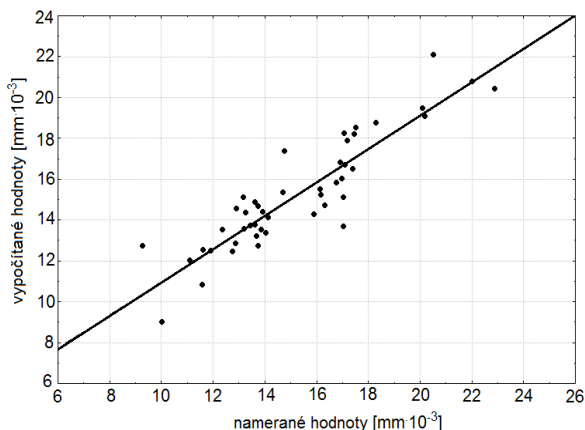
Tabuľka 1: Prevod medzi prirodzenou a kódovanou mierkou

Faktor		Faktorová úroveň				
Kódovaná mierka	Prirodzená mierka	-2,37	-1,00	0,00	+1,00	+2,37
x_1	Zn[mol.l ⁻¹]	0,06	0,34	0,54	0,73	1,01
x_2	Cl ⁻ [mol.l ⁻¹]	0,70	2,26	3,39	4,51	6,07
x_3	H ₃ BO ₃ [mol.l ⁻¹]	0,10	0,32	0,49	0,65	0,87
x_4	U[V]	1,62	3,00	4,00	5,00	6,38
x_5	T[°C]	-3,78	10,00	20,00	30,00	43,78
x_6	T[min]	3,11	10,00	15,00	20,00	26,89

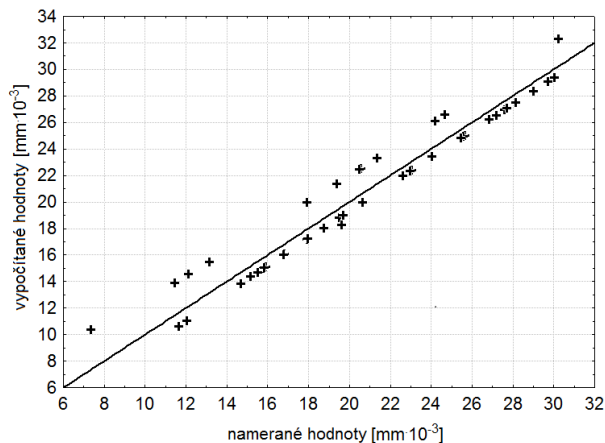
4 Výsledky a diskusia

Na základe nameraných hrúbok zinkového povlaku a podmienok galvanického zinkovania, určených plánovaným experimentom, boli zostavené predikčné modely popisujúce výslednú hrúbku nanoseného zinkového povlaku. Predikčné modely boli zostavené na základe matematicko-štatistických procesov a na základe princípov umelej inteligencie, konkrétne bola použitá kubická neurónová jednotka využívajúca adaptívny optimalizačný algoritmus Levenberg-Marquardt [Bukovsky a kol. 2010], [Hošovský a kol. 2012], [Hrehová a kol. 2013] [Piteľ a kol. 2013]. Okrem zostavenia predikčného modelu, bolo cieľom výskumu určiť a vplyv množstva tréningových dát na presnosť zostaveného modelu. Konkrétne sa po zostavení modelu, z celého súboru tréningových dát, odobrala jedna vzorka (hrúbka vylúčeného povlaku a prevádzkové parametre zinkovania pre danú vzorku) a bol zostavený nový predikčný model. Na obrázku 1 a 2 je zobrazený výsledok po zostavení predikčných modelov pomocou štatistických metód (obrázok 1) a pomocou neurónovej jednotky (obrázok 2) pri použití všetkých 46 dostupných vzoriek hrúbok vylúčeného zinkového povlaku. Oba obrázky porovnávajú rozdiely medzi nameranou a vypočítanou hrúbkou zinkového povlaku. V prípade predikčného modelu, ktorý bol zostavený pomocou matematicko-štatistických vyhodnocovacích metód (obrázok 1), je vidieť značné odchýlky vypočítaných hodnôt od priamky ideálnej predikcie. Tieto rozdiely medzi nameranou a vypočítanou hrúbkou zinkového povlaku do značnej miery znižujú spoľahlivosť zostaveného modelu. Na druhej strane predikčný model zostavený

pomocou neurónovej jednotky (obrázok 2) vykazuje podstatne menšie rozdiely medzi nameranou a vypočítanou hodnotou vylúčeného zinkového povlaku. Je potrebné brať na vedomie, že spoľahlivosť zostaveného modelu je do určitej miery znížená zápornými rozdielmi medzi nameranou a vypočítanou hodnotou hrúbky vylúčeného zinkového povlaku. Záporné rozdiely v hrúbke povlaku môžu spôsobiť zníženie koróznej odolnosti povrchu v prípade optimalizácie technologického procesu na základe tohto predikčného modelu.



Obrázok 1: “Štatistický” predikčný model pre súbor 46 tréningových dát

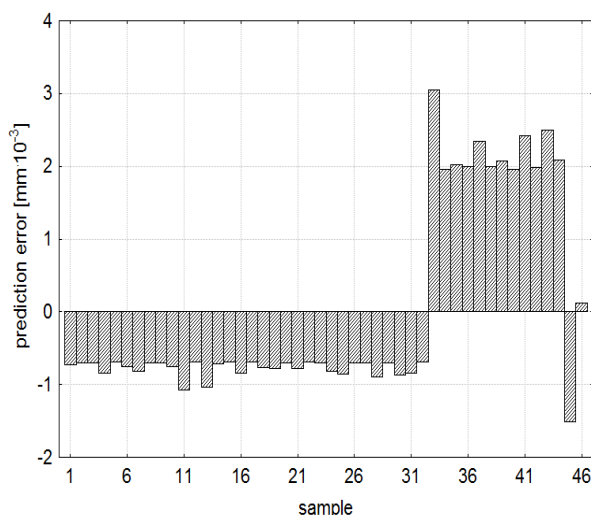


Obrázok 2: “Neurónový” predikčný model pre súbor 46 tréningových dát

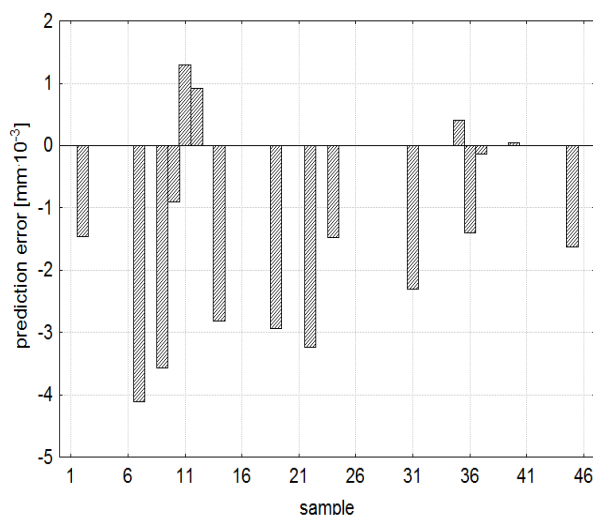
V tabuľke 2 sú uvedené vypočítané hodnoty spoľahlivostí (Adj.) pre matematicko-štatistické predikčné modely (S.P.M) a predikčné modely zostavené pomocou neurónovej jednotky (N.P.M) pre rôzne veľké súbory tréningových dát. Spoľahlivosť štatistického predikčného modelu sa pohybuje v rozmedzí od 30 % do 60 %, pričom najvyššiu spoľahlivosť 58,75 % dosahuje tento model len pri použití celého súboru tréningových dát, t.j. 46 nameraných hrúbok zinkového povlaku. Postupným znižovaním množstva hodnôt v súbore tréningových dát dochádza k rýchlemu poklesu spoľahlivosti zostaveného modelu. V prípade použitia tréningového súboru, ktorý obsahoval menej ako 38 nameraných hodnôt hrúbok zinkového povlaku, klesá spoľahlivosť zostaveného predikčného modelu pod úroveň 25 %, čo neumožňuje použitie v technickej praxi. Oproti tomu predikčný model, ktorý bol zostavený pomocou neurónovej jednotky vykazuje spoľahlivosť predikcie hrúbky vylúčeného zinkového povlaku v rozmedzí od 90 do 100 % a to aj v prípade, kedy bol na zostavenie predikčného modelu použitý tréningový súbor dát obsahujúci 30 hodnôt nameraných hrúbok vylúčeného zinkového povlaku. Takáto vysoká schopnosť predikcie umožňuje použitie zostaveného predikčného modelu k optimalizácii technologického procesu galvanického zinkovania z hľadiska časových a finančných aspektov, vrátane množstva spotrebovaných zložiek používaných elektrolytov.

Tabuľka 2: Spoľahlivosť zostavených predikčných modelov

Počet tréningových dát		46	45	44	43	42	41	40	39	38
Adj. [%]	S.P.M	58,75	53,8	45,58	46,26	45,6	44,64	38,73	32,88	32,86
	N.P.M	94,61	94,34	99,82	99,82	98,41	97,88	96,48	95,2	95
Počet tréningových dát		37	36	35	34	33	32	31	30	
Adj. [%]	S.P.M	24,98	-	-	-	-	-	-	-	
	N.P.M	95,53	95,78	96,14	95,66	94,06	94,31	94,5	93,6	



Obrázok 3: Overenie predikčného modelu pre súbor 46 tréningových a 46 overovacích dát



Obrázok 4: Overenie predikčného modelu pre súbor 30 tréningových a 46 overovacích dát

Obrázok 3 a 4 zobrazujú výsledok overovania zostavených predikčných modelov, ktoré boli zostavené pomocou neurónovej jednotky. Predikčný model na obrázku 3 bol zostavený na základe tréningového súboru obsahujúceho 46 hodnôt, na obrázku 4 na základe tréningového súboru obsahujúceho 30 hodnôt. Oba predikčné modely boli overené pomocou súboru 46 overovacích dát. Ako je možné vidieť z obrázku 3 chyba predikcie sa pohybuje v rozmedzí od -1 do $2,5 \cdot 10^{-6}$. Je možné konštatovať, že takáto predikčná chyba je veľmi malá a použitie takéhoto predikčného modelu by bolo vhodné k optimalizácii sledovaného technologického procesu. Vzhľadom na fakt, že súbor hodnôt určený na zostavenie a overenie modelu je totožný, nie je možné presne určiť všeobecnú spoľahlivosť predikcie. Oproti tomu pri použití menšieho množstva hodnôt v súbore dát určenom na zostavenie predikčného modelu sa chyba predikcie pohybuje v rozmedzí od -4 do $1 \cdot 10^{-6}$. Avšak rozdiel v množstve hodnôt, ktoré boli určené na zostavenie a na overenie modelu umožňuje považovať hodnotu 95,2 % za všeobecnú spoľahlivosť predikcie.

5 Záver

Ako bolo prezentované v príspevku, použitie princípov neurónových sietí má pri vyhodnocovaní výsledkov experiment veľký potenciál. Použitie neurónovej jednotky využívajúcej adaptívny algoritmus Levenberg-Marquardt umožnilo zostaviť viacero predikčných modelov hrúbky vylúčeného zinkového povlaku, pre povrchovú prúdovú hustotu $3 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$, s rôzne veľkou spoľahlivosťou pre rôzne množstvo použitých tréningových dát. Konkrétne boli zostavené predikčné modely so spoľahlivosťou 93,6 % až 96,14 % v prípade použitia súborov tréningových dát, ktoré obsahovali 30 až 35 hodnôt. V prípade predikčných modelov s tak vysokou spoľahlivosťou predikcie, je možné ich použitie v technickej praxi v oblasti optimalizácie procesu galvanického zinkovania z hľadiska časových a ekonomických aspektov. Na druhej strane je ale potrebný ďalší výskum v danej oblasti z dôvodu spresnenia spoľahlivosti predikčných modelov, ako aj začlenenia ich použitia pre širšiu škálu povrchových prúdových hodnôt.

6 PodĎakovanie

Príspevok bol pripravený s podporou Štrukturálnych fondov Európskej únie, operačný program Výskum a vývoj, opatrenie 2.2 Prenos poznatkov a technológií získaných výskumom a vývojom do praxe, projekt „Výskum a vývoj inteligentných systémov riadenia výroby

a dodávky tepla na báze biomasy“, ITMS projektu 26220220030 a projekt „Výskum a vývoj inteligentných nekonvenčných aktuátorov na báze umelých svalov“, ITMS projektu 26220220103.



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov ES.

7 Použitá literatúra

VITA, V., VITAS, A., CHATZARAKIS, G.E. Design, implementation and evaluation of an optimal iterative learning control algorithm. WSEAS Transactions on circuits and Systems, Vol. 10, No. 2, 2011, pp. 39-48.

BALLESTEROS, J. C., DÍAZ-ARISTA, P., MEAS. Y., ORTEGA, R., TREJO, G. Zinc electrodeposition in the presence of polyethylene glycol 20000. Electrochimica Acta, Vol. 52, 2007, pp. 3686-3696.

YADAV, A. P., KATAZAMA, H., NODA, K., MASUDA, H., NISHIKATA, A., TSURU, T. Surface potential distribution over a zinc/steel galvanic couple corroding under thin layer of electrolyte. Electrochimica Acta, Vol. 52, 2007, pp. 3121–3129.

JONG-MIN, L. Numerical analysis of galvanic corrosion of Zn/Fe interface beneath a thin electrolyte. Electrochimica Acta, Vol. 51, 2006, pp. 3256–3260.

ZHANG, X. G., VALERIOTEM E. M. Galvanic protection of steel and galvanic corrosion of zinc under thin layer electrolytes. Corrosion Science, Vol. 34, 1993, pp. 1957-1972.

XIA, X., ZHITOMIRSKY, I., MCDERMID, J.R. Zinc and Zn-PSZ coatings by electrophoretic deposition. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, 2009, pp.2632–2640.

ALFANTZAI A. M. , DREISINGER, D. B. The role of zinc and sulfuric acid concentrations on zinc electrowinning from industrial sulfate based electrolyte. Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 31, 2001, pp. 641-646.

MACKINNON D. J. , MORRISON, R. , BRANNEN J. The effect of nickel and cobalt and their interaction with antimony on zinc electrowinning from industrial acid sulfate electrolyte. Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 16, 1986, pp. 54-61.

GOMBÁR, M., KMEC, J., BADIDA, M., SOBOTOVÁ, L., VAGASKÁ, A., MICHAL, P. The simulation of the temperature effects on the microhardness of anodic alumina oxide layers. Metalurgija, Vol. 53, 2014, pp. 59-62.

BADIDA, M., GOMBÁR, M., KMEC, J., SOBOTOVÁ, L., VAGASKÁ, A., MICHAL, P. Štúdium vplyvu chemického zloženia elektrolytu na mikrotvrdosť vrstvy vytvorenej anodickou oxidáciou hliníka. Chemické Listy, Vol. 107, 2013, pp. 973-977.

MICHAL, P., GOMBÁR, M., VAGASKÁ, A., PITEĽ, J., KMEC, J. Experimental study and modeling of the zinc coating thickness. Advanced Materials Research, Vol. 712-715, 2013, pp. 382-386.

VAGASKÁ, A., GOMBÁR, M., KMEC, J., MICHAL, P. Statistical analysis of the factors effect on the zinc coating thickness. *Applied Mechanics and Materials*, Vol.378, 2013, pp. 184-189.

BADIDA, M., GOMBAR, M., SOBOTOVA, L., KMEC, J., VAGASKÁ, A., MICHAL P. The influence of sodium chloride on the resulting AAO film thickness. *Advanced Materials Research*, Vol. 816-817, 2013, pp. 18-22.

GOMBÁR, M., VAGASKÁ, A., KMEC, J., MICHAL, P. Microhardness of the coatings created by anodic oxidation of aluminium. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 308, 2013, pp. 95-100.

HREHOVÁ, S., VAGASKÁ, A. Application of fuzzy principles in evaluating quality of manufacturing process. *WSEAS Transaction on Power Systems*, Vol. 7, No. 2, 2012, pp 50-59.

EVIN, E., KMEC, J., FECHOVÁ, E. Optimizing of Electric Discharge Texturing Parameters of Rolls of the Rolling Mill of Steel Sheets. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 420, 2013, pp. 78-84.

VAGASKÁ, A., KMEC, J., FECHOVÁ, E. The influence of strain rate on the curves of natural strain resistance. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 378, 2013, pp. 589-593.

BUKOVSKY, I., ICHIJI, K., HOMMA, N., YOSHIZAWA, M. Testing potentials of dynamic quadratic neural unit for prediction of lung motion during respiration for tracking radiation therapy. In: *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, July 18-23, 2010, Barcelona: IEEE, pp. 1-6.

GUPTA, M. M., BUKOVSKÝ, I., HOMMA, N., SOLO, A. M. G., HOU, Z. G. Fundamentals of higher order neural networks for modeling and simulation. In: *Artificial Higher Order Neural Networks for Modeling and Simulation*, ed. M. Zhang, Hershey, PA: IGI Global, 2012, pp. 103-133.




HOŠOVSKÝ, A., ŽIDEK, K., OSWALD C. Hybridized GA-optimization of neural dynamic model for nonlinear process. In: *Proceedings of the 2011 13th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, May 28-31, 2012, Podbanské, Košice: IEEE, pp. 227–232.


HREHOVÁ, S., MIŽÁKOVÁ, J. Evaluation a process using fuzzy principles and tools of Matlab. In: *Proceedings of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics (SCI 2013)*, September 28-30, 2013, Venice: Europment, pp. 222-226.

PITEL, J., MIŽÁK, J. Computational intelligence and low cost sensors in biomass combustion process. In: *Proceedings of the 2013 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence: 2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation (CICA)*, April 16-19, 2013. Singapore: IEEE, pp. 165–168.

Laboratory Setup for Testing Various Types of Active Vibration Control Algorithms

PILBAUER Dan¹, KUČERA Vladimír¹, BUŠEK Jaroslav¹ & VYHLÍDAL Tomáš²

¹ Ing,  Technická 4, Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Instrumentation and Control Engineering, 
dan.pilbauer@fs.cvut.cz,  <http://www.cak.fs.cvut.cz/>

² Prof,  Technická 4, Czech technical University in Prague, Department of Instrumentation and control engineering  [Tomas.Vyhliidal\[at\]fs.cvut.cz](mailto:Tomas.Vyhliidal[at]fs.cvut.cz),  <http://www.cak.fs.cvut.cz/>

Abstract: *Vibration control is a challenging problem from both the theoretical and implementation points of view. In this article we present both the concept and the implementation of the laboratory set-up for testing various vibration suppression algorithms. The set-up has been designed as a positioned series of several single degree of freedom mechanical systems (formed by series of carts connected by springs), which are equipped by either position or acceleration sensors. Starting with the mathematical model description, two specific vibration suppression algorithms are targeted in the paper. The first one utilizes the concept of resonator absorber with delayed acceleration feedback, whereas the second algorithm utilizes time delay based input shaping for pre-compensating the oscillatory modes of the system. Thanks to the time delays which are contained in the vibration suppression algorithms, the dynamics of the closed loop system become infinite dimensional. This fact needs to be taken into consideration in the design of the master controller for positioning the overall mechanical system. Next to the theoretical developments, the design issues of the laboratory set-up and its measurement and control systems are addressed too.*

Keywords: *Vibration control, delayed resonator, signal shapers, experimental design*

1 Introduction

As the main contribution, we present a laboratory set-up that has been designed to test various algorithms for the active vibration suppressions. Particularly, we focus on two types of algorithms that utilize time delays in the algorithm structure. The first algorithm is the delayed resonator and the second is the input shaper. Next, we consider a communication time delay in the control loop.

The basic design framework for the laboratory set-up is multi-degree of freedom structure with multiple resonators. The resonators in our case are tuned by the delayed acceleration feedback, see [Olgac, Hosek]. The set-up structure under consideration is shown in Fig 1. There are two periodical external harmonic forces $f_{d1}(t)$, $f_{d2}(t)$, characterized by the frequencies ω_1, ω_2 , that excite vibrations of the masses (m_p, m_h). The masses are together joined by the k_h, k_p springs and c_h, c_p dampers. The absorbent masses (m_a, m_b) are also connected with the main structure by the springs k_a, k_b and the dampers c_a, c_b . The resonators are controlled by the delayed feedback from the accelerating sensors. In an ideal case, the absorbers acts such that the deflections x_p, x_h of the masses (m_p, m_h) are equal to zero despite the excitation forces. The masses m_p, m_h are positioned through the input $u(t - \tau)$, where the time τ delay is caused by communication between remote controller and local control devices.

The equations for our case are derived from standard force equilibrium equations combined with accelerated delayed feedback(3) as follows.

$$\begin{aligned}
 m_a \ddot{x}_a(t) + c_a \dot{x}_a(t) + k_a x_a(t) - g_a \ddot{x}_a(t - \tau_1) &= c_a \dot{x}_p + k_a x_p(t) \\
 m_b \ddot{x}_b(t) + c_b \dot{x}_b(t) + k_b x_b(t) - g_b \ddot{x}_b(t - \tau_2) &= c_b \dot{x}_h + k_b x_h(t) \\
 m_p \ddot{x}_p(t) + (c_p + c_h + c_a) \dot{x}_p(t) + (k_p + k_h + k_a) x_p(t) &= \\
 = \{c_a \dot{x}_a(t) + k_a x_a(t) - g_a \ddot{x}_a(t - \tau_1)\} + c_h \dot{x}_h(t) + k_h x_h + f_{d_1}(t) & \\
 m_h \ddot{x}_h(t) + (c_h + c_b) \dot{x}_h(t) + (k_h + k_b) x_h(t) &= \\
 \{c_b \dot{x}_b(t) + k_b x_b(t) - g_b \ddot{x}_b(t - \tau_2)\} + c_h \dot{x}_p(t) + k_h x_p + f_{d_2}(t) & \\
 m_n \ddot{x}_n + c_p \dot{x}_n + k_p x_p = c_p \dot{x}_p + k_p x_p + u(t - \tau) - f_{d_1} &
 \end{aligned} \tag{1}$$

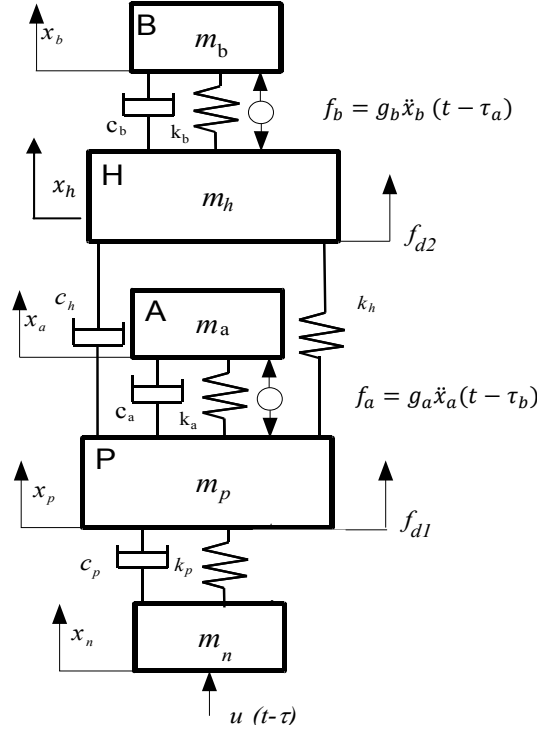


Fig. 1 Model of laboratory setup for vibration testing and positioning

2 Design Requirements

All the mechanical components need to be designed with respect to functionality in the achievable frequency ranges of the primary actuators - the absorbers that are to be implemented using voice coils(magnetic shakers). Springs are designed to allow deflections within the voice coil ranges and the maximal force. Dampers are not explicitly included but they are included in springs themselves and in rolling carts on the rails.

The range of considered frequencies also depends on the available control units and their sampling. Laboratory setup includes lots of electronic parts such as a servo drive, accelerometers, position sensors etc., which are discussed in the chapter 4.

Balancing all the constraints, the design parameters for the set-up have been selected as given in Tables 1. and 2. Parameters are based on simulation of the models described in the introduction and a complete stability analysis done in [Vyhldal].

Table 1. Parameters of the proposed setup

Parameter	value	Units
Range of frequencies	5-15	Hz
Deflection of absorbers	± 20	mm
Moving mass weight, m_p, m_h	> 1	kg
Amplitude of the excitation Force	± 5	N

Table 2. Parameters of the absorbers

Parameter	Value	Units
Resonator weight, m_a, m_b	0.2	kg
Spring k_a, k_b	280	Nm^{-1}
Dampers c_a, c_b	1.4	Nsm^{-1}

Laboratory setup has also been designed in order to allow large scale of modularity, which allows a simple scaling of system parameters and assembling various device configurations.

3 Design and integration of mechanical parts

The set-up, see Fig. 2-3, is designed to allow both the single and multi-degree of freedom architecture. For linear motion steel rail are used as the base component providing the movement in one direction with as low friction as possible. Bearing houses with connection threads are used to move masses on the rails, composing the particular carts of the set-up. Houses are assembled with other part of system such as electronics, springs and resonators. Used resonators are voice coils providing linear motion that dump vibration caused by external force. External forces come from another voice coil (see Fig. 2) or from servo drive connected through actuating belt which can be also used as a positioning system (see Fig. 3).

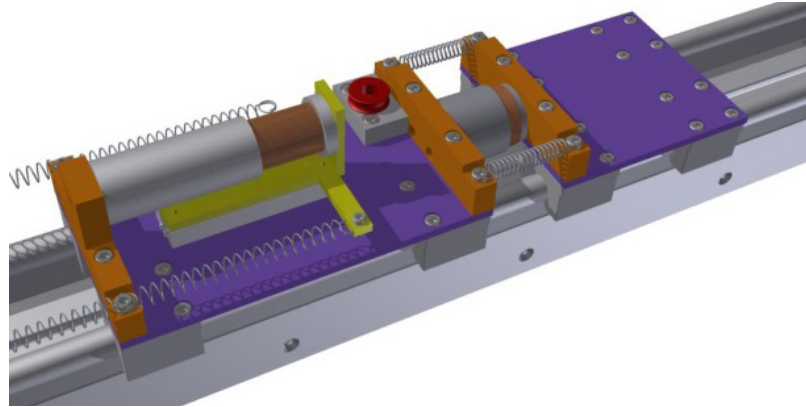


Fig. 2 Detail on two carts of the set-up. The larger cart is equipped with the delayed resonator absorber implemented by a voice-coil. The other voice-coil is used to excite the cart via connection with the smaller cart.

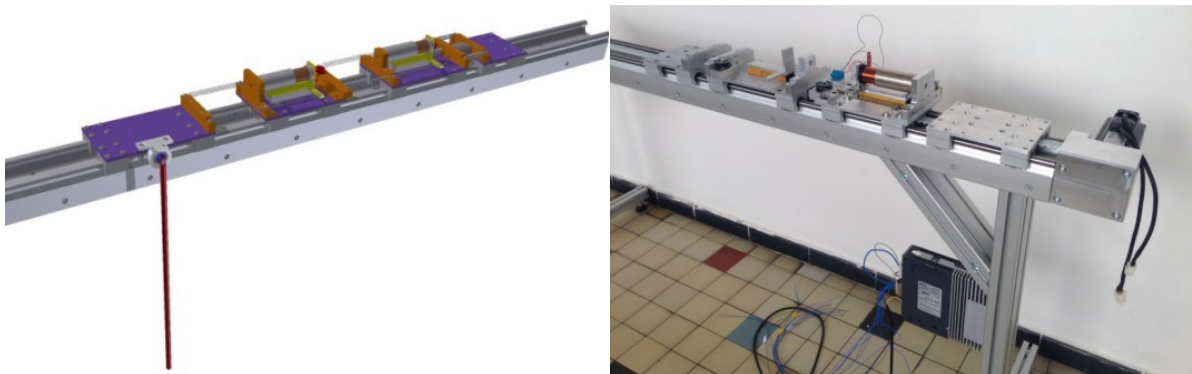


Fig. 3 Mechanical model of the laboratory setup (left) and its real design of the unit with one attached resonator (right).

With respect to the scheme in Fig. 1, the set-up is implementation as follows. The cart for the set-up positioning denoted by m_n is connected to the servo drive via actuating belt, see Fig. 3. The second cart denoted as m_p is connected to the first one with two parallel springs. The second and third carts are designed in the same way. On both the carts, small linear ball slides are mounted to carry the coils of the magnetic shakers, whereas the magnetic cores are fixed to the carts. These components together form the absorber of the resonator, as shown in Figs. 2-3.

4 Control electronics and sensors

Local PC control system is equipped with data acquisition card AD 622. The DAQ card contains 8 channel fast 14 bit A/D converter with simultaneous sample/hold circuit and 8 independent 14 bit D/A converters, which are used for system control. Sensor outputs and control boards of actuators are connected to the card using TB620 I/O terminal.

The main positioning movement of the movable mass elements on a linear sliding guide provides a servomotor actuator with toothed belt. Servo drive ProNet-04A is controlled by analog voltage signal 0 – 10 V in torque or speed control mode.

Secondary movements between mass elements are realized by voice coils, which are controlled by voice coil control unit board. The control unit works on the principle of current feedback. The voice coil winding (i.e. coil) provides the motive force to the ferromagnetic coil core by the reaction of a magnetic field to the current passing through it. The control unit brings appropriate accurate excitation current to winding of the coils and so the desired force of the linear actuator is exerted. The control unit is equipped with processor ST 32F100 which is 32 bit ARM processor. Sampling frequency of the current measurement is 20 kHz with 12-bit resolution. Power supply voltage range is between 9 and 48 VDC and current range is from 50mA to 10 A. Supported communication protocols are RS-232, RS-485, Profibus, CAN and Ethernet. In our case, the control unit is directly controlled by analogue output of AD 622 DAQ card.

Conditioning amplifier Brüel&Kjær NEXUS 2692 with accelerometer type 4375 was used for initial experiments. The accelerometer is a single-axis precise piezoelectric accelerometer with full scale range of 5000 g. But simple use and precise calibration of output with signal conditioning (bandwidth control, gain control etc.) are of course also expensive and therefore cheaper alternative was chosen. Polysilicon surface micromachined sensor ADXL325/ADXL326 is a small, low power and low cost, complete 3-axis accelerometer with signal conditioned voltage analog outputs - full-scale range of ± 5 g or ± 16 g. Bandwidths of the sensor can be selected to suit the application with a range of 0.5 Hz to 1600 Hz for X and Y axes and a range of 0.5 Hz to 550 Hz for the Z axis, which are sufficient parameters for basic measurement with the device. Small SMD package of the sensor (4mm \times 4mm \times 1.45mm) and few necessary PCB components in practical circuit allow to make a small plate with all the components that can be easily stick anywhere on the small flat surface on the device.

5 Delays in the system

In this section, we provide theoretical background on the algorithms that are to be primary tested on the set-up.

A) Delayed resonator

The setup structure under consideration is shown in Fig 1.and described in chapter 1.This structure is used to analyze and design delayed resonators.

As can be seen, in Fig. 1, we have two delayed resonators in the structure with the isolated dynamics determined by the following two characteristic equations

$$\begin{aligned} R_a(s) &= m_a s^2 + c_a s + k_a - g_a s^2 e^{-\tau_a s} = 0 \\ R_b(s) &= m_b s^2 + c_b s + k_b - g_b s^2 e^{-\tau_b s} = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

The transcendental terms are the transform of the delayed acceleration feedback given by

$$\begin{aligned} f_a(t) &= g_a \ddot{x}_a(t - \tau_a) \\ f_b(t) &= g_b \ddot{x}_b(t - \tau_b) \end{aligned} \quad (3)$$

As given in [Olgac, Hosek], the gain and the time delay can be calculated from next two equations

$$\begin{aligned} g_{a,b} &= \sqrt{(c_{a,b} \omega_c)^2 + (k_{a,b} - m_{a,b} \omega_c^2)^2} \\ \tau_{a,b} &= \frac{\text{atan}(c_{a,b} \omega_c, m_{a,b} \omega_c^2 - k_{a,b}) + 2(j_c - 1)\pi}{\omega_c}, j_c = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

where ω_c is the frequency of the forced oscillations to be suppressed and j_c is an optional delay branch (usually $j_c = 1$ is considered). More details can be found in [Vyhldal].

B) Signal shaper

Signal shapers are mostly used in applications as reference command filters for positioning of the system with flexible or oscillatory modes. The reference command $w(t)$ of the system $G(s)$ is shaped by the shaper $S(s)$ in order to target the oscillatory mode of the flexible part of the system $F(s)$ so that it is not excited. As the basic concept of signal shaping, O.J. Smith Posicast[Smith] published in 1950's can be considered. Nowadays, these types of shaper are known from the work of Singer and Seering [Singhose, Singer], in the 1990's. They developed idea of zero vibration shaper (ZV) and alternatives that lead to more robust suppression over the target mode, such as zero-vibration-derivative (ZVD) and extra insensitive (EI) shapers.

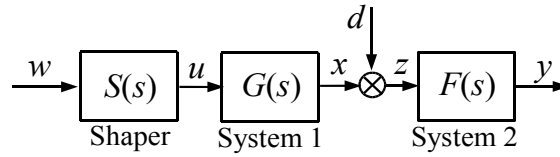


Fig 4. Signal shaper basic concept

For the compensation of $F(s)$ oscillatory mode given by the complex conjugate poles $s_{1,2} = \alpha + \beta j$, we can use the ZV shaper in a form of equation as follows,

$$u(t) = Aw(t) + (1 - A)w(t - \tau), \quad (5)$$

where w and u are the shapers input and output. The parameters of the shaper are the gain A and the time delay $\tau \in \mathbf{R}^+$. The zeros of the shaper, given as the roots of the equation

$$S_{zv} = A + (1 - A)e^{-s\tau} = 0, \quad (6)$$

are given as follows

$$r_{2k+1, 2k+2} = \frac{1}{\tau} \ln \frac{A}{1-A} \pm j \frac{\pi}{\tau} (2k + 1), k = 0, 1, \dots, \infty, \quad (7)$$

Placing the dominant zeros $r_{1,2}$ of the shaper (5) at the position of modes $s_{1,2}$ of the flexible system with the objective to compensate it, provide

$$A = \frac{e^{\frac{\beta}{\Omega}\pi}}{1 + e^{\frac{\beta}{\Omega}\pi}}, \tau = \frac{\pi}{\Omega}. \quad (8)$$

Next to the above described classical ZV shaper, the new concept of signal shaper with a distributed delay [Vyhlidal2, Vyhlidal3] will be tested on the laboratory set-up. Also the new concepts of the inverse shaper in the feedback loop [Vyhlidal4] will be tested.

C) Positioning with communication delay

Next to considering time delays in the control algorithms, communication delay will be considered in the feedback loops. The delay will arise by placing the controller at a computer of the project partner in Boston and connecting it with the set-up using the internet. Positioning of primary masses m_p and m_h will be done accurately but indirectly by applying control input in the form of a force to the base mass m_n . The input $u(t)$ considers input and output delays between controller and the system's sensors, communication lines and actuators. The overall communication delay τ is variable and depends on routing a signal through TCP/IP communication connection. For the positioning, the proposed measurement is position x_p and x_h and velocity \dot{x}_p and \dot{x}_h of the primary masses. The control law for the input $u(t - \tau)$ must be designed with respect to the communication delay with desired positioning accuracy and performance.

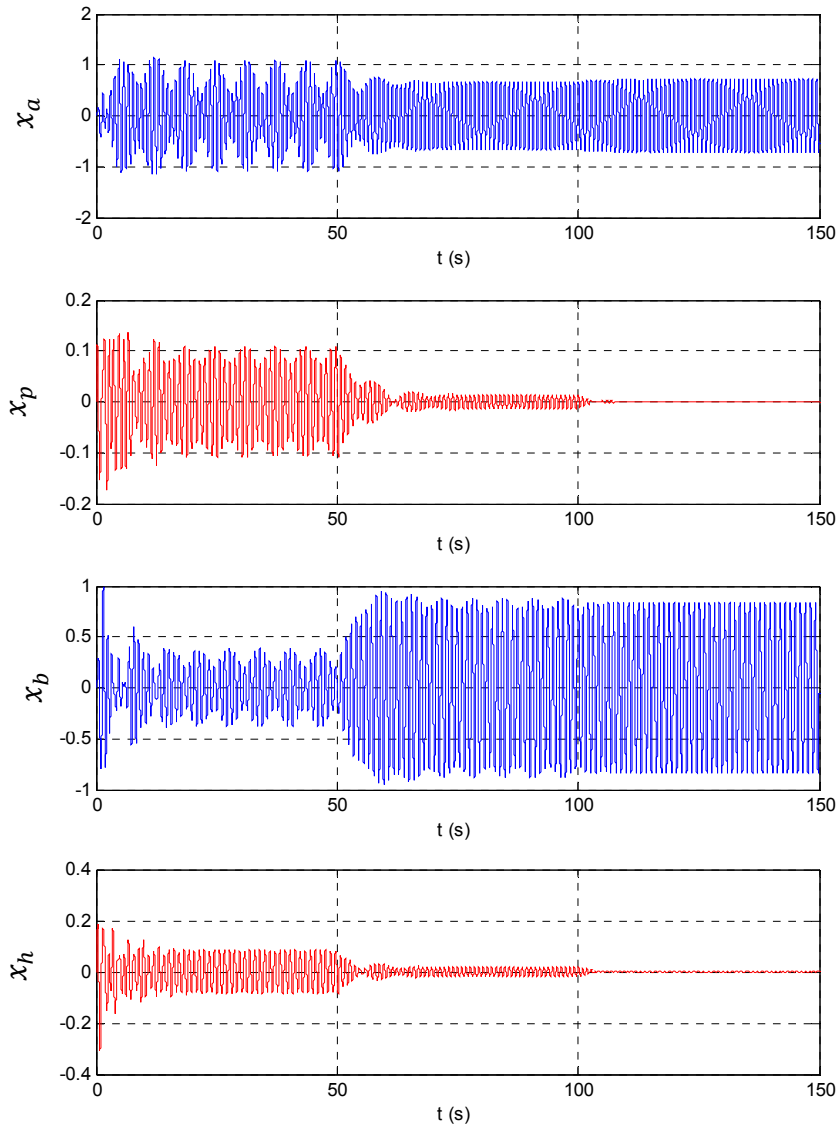


Fig 5 Simulation results of the vibration suppression by two delayed resonators

6 Simulation experiment

To demonstrate the functionality of the set-up, we provide the following simulation example. Consider the primary structure coupled with the delayed resonators as described in Figure 1. with $m_p = 10kg, c_p = 20kgs^{-1}, k_p = 500Nm^{-1}$, and $m_h = 10kg, c_h =$

20kg s^{-1} , $k_h = 500\text{Nm}^{-1}$, connected together by. The m_n mass in this example is fixed as stationary part of the system.

The objective is to suppress the external periodical force with frequency at $\omega_1 = 7\text{ rad. s}^{-1}$ and $\omega_2 = 6\text{ rad. s}^{-1}$ exciting the structure at m_h and m_p . Let us consider the absorber masses are given as $m_a = 2\text{kg}$ and $m_b = 2\text{kg}$. Consider $j_c = 1$, we obtain the feedback parameters $\tau_a = 0.4007\text{s}$, $g_a = 0.0432\text{kg}$ for frequency $\omega_1 = 7\text{ rad. s}^{-1}$ and $\tau_b = 0.5200\text{s}$, $g_b = 0.778\text{kg}$ for frequency $\omega_1 = 7\text{ rad. s}^{-1}$.

Results in Fig 4 show two delayed resonator operation. The first resonator attached to primary mass m_p starts operating at $t = 50\text{s}$ and the resonator attached to the mass m_h starts operating at the time $t = 100\text{s}$. The first excited frequency is removed after the first resonator starts operating and the second is removed when the second resonator starts working, as shown in Fig 5.

6 Conclusions

The paper focuses on design of a laboratory setup for testing various active vibration control laws with time delays. Next, we discussed problems of delayed resonator, signal shapers and positioning of the multi degree of freedom structure that will be tested on this setup. Simulation results in chapter 5 show vibration suppression by two resonators attached on main structure which is excited by external periodical forces.

Some parts of the system have already been tested and recorded on video available on the project web page¹. On the video record, we can see one cart excited with external force provided through smaller magnetic shaker. Larger magnetic shaker then represents delayed resonator which suppresses the vibration, see also Fig. 2. Next, functioning of the signal shaper is also seen on the video record.

Acknowledgement

This work was supported by the Grant Agency of the Czech Technical University in Prague, grant No. SGS14/182/OHK2/3T/12 and by the Ministry of Education of the Czech Republic under the program KONTAKT II LH12066.

7 References

OLGAC N., and Hosek M., Active Vibration Absorption Using Delayed Resonator with Relative Position Measurement, ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 119, No. 1, January 1997, pp. 131-136.

HOSEK M., and Olgac N., A Single-Step Automatic Tuning Algorithm for the Delayed resonator Vibration Absorber, IEEE/ASME Transactions on mechatronics, Vol. 7, No. 2, pp. 245-255, 2002

SHITH, O.J.M (1957), Posicast control of damped oscillatory systems, Proceedings of the IRE col 45, September 1957, pp1249-1255.

SINGER, N.C. a Seering, W.P. (1990), Preshaping command input to reduce system vibration, Journal of Dynamics, System, Measure and Control, vol112., pp 76-82.

SINGHOSE, W. Seering, N. C. Singer, (1994), Residual vibration reduction using vector diagrams to generace shaped

¹<http://www.cak.fs.cvut.cz/projects/resonator>

inputs, *Journal of Mechanical Design* . 1994, 116: 654-659

VYHLIDAL T., Olgac N. , V. Kucera, Design and Stability Analysis of Delayed Resonator with Acceleration Feedback, ASME – DSCC 2013, Stanford University, Palo Alto Ca, October 21-23, 2013

VYHLIDAL2 T, V. Kucera, M. Hromcik. Signal shaper with a distributed delay: Spectral analysis and design, *Automatica*, Vol 49, Issue 11, November 2013, pp 3484-3489

VYHLIDAL3 T., Kucera V., Hromcik M, Zero vibration shapers with distributed delays of various types, 52nd Conference on Decision and Control CDC 2013, Florence, Italy, December 10-13, 2013.

VYHLIDAL4, M. Hromcik, V. Kucera. Inverse signal shapers in effective feedback architecture. European Control Conference 2013, Zurich, June 1-3, 2013.

Návrh metodiky kalibrace nelinearit 2D triangulačních skenerů

PODEŠVA, Petr¹ & FOJTÍK, David²

¹ Ing., ✉ Katedra ATŘ-352, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu, Ostrava - Poruba, 708 33
petr.podešva@vsb.cz,

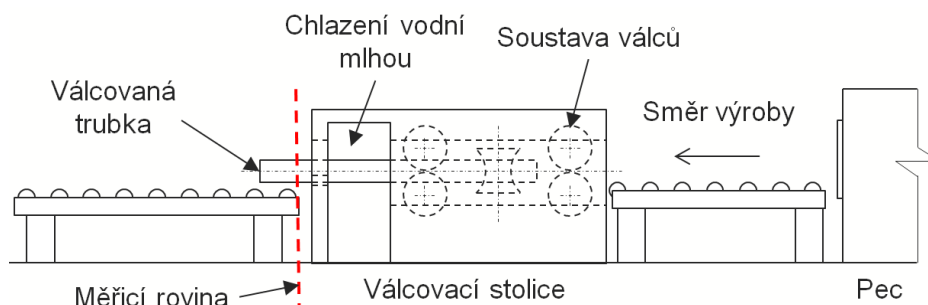
² Ing., Ph.D., david.fojtik@vsb.cz,

Abstrakt: Tento příspěvek se zabývá problematikou nelinearity triangulačních 2D skenerů založených na principu naklápěného zrcátka. Tyto skenery byly použity při měření průměru a ovality trubek válcovaných za tepla. Během nasazení v provozu se projevovaly nepřesnosti patrné zejména při měření kruhového průřezu, způsobené konstrukcí skenerů tohoto typu. Příspěvek popisuje počáteční stádium vývoje kalibrační metodiky a její softwarové podpory, jejímž cílem bude kalibrace skenerů v provozních podmínkách za účelem potlačení nelinearity skenerů a tedy zvýšení přesnosti měření celé soustavy.

Klíčová slova: triangulační skener, nelinearity, kalibrace

1 Úvod

Jednou z žádaných úloh v průmyslu, je měření tvaru povrchu objektů s kruhovým průřezem pro účely stanovení průměru, ovalitu nebo objem objektu. V rámci projektu PreSeed a ve spolupráci se společností RMT s.r.o., byl vyvinut systém pro měření vnějších průměrů a ovality bezešvých válcovaných ocelových trubek.

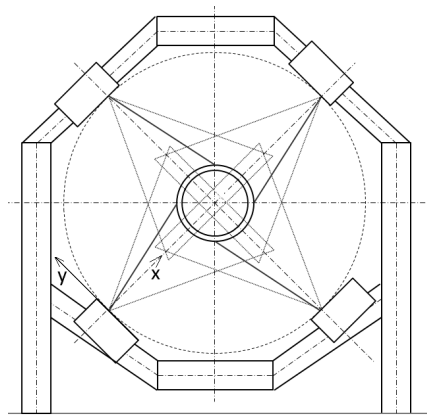


Obr. 1 Nákres válcovací stolice

Tento systém je založen na skupině synchronizovaných 2D triangulačních skenerů umístěných v rovině kolem společného středu. Získané hodnoty jsou použity jako součást kontroly kvality a systému detekce poruch válcovací stolice, v tomto případě zejména opotřebení válců. Měření se provádí na výstupu z válcovací stolice při teplotě trubek v rozmezí od 800 do 1000 °C.

Skenery použité pro toto měření musely splnit následující požadavky:

- přesnost vyšší než 0,2 mm,
- dosah až do 0,75 metrů,
- rozsah nejméně 0,4 m,
- zorné pole úhlu až 30 °,
- měření s frekvencí nejméně 30 Hz,
- synchronizace mezi skenery.



Obr. 2 Náskres rámu se skenery pro měření průměru trubky

Frekvence měření je důležitá, neboť měřené trubky nejsou v ustálené poloze. Je také důležité zajistit synchronizaci mezi skenery, aby body ze všech skenerů byly snímány v jeden okamžik, a také se zabránilo situaci, kdy jeden snímač promítá laserový bod do zorného pole jiného skeneru. Skenery musí být schopny pracovat na povrchu s nepravidelnou strukturou, odrazivostí a vysokou teplotou. Splnění těchto parametrů není jednoduchý úkol. Zejména provozní dosah a rozsah s vysokým rozlišením a linearitou je těžké dosáhnout. Na trhu je nabídka skenerů, které splňují tyto požadavky, velmi omezená. Zvolili jsme jednobodový triangulační skener s oscilujícím zrcadlem, protože tento typ skenerů nabízí dobrou rovnováhu mezi požadavky. Jednobodové skenery fungují obecně lépe na povrchu s nepravidelnou odrazivostí a mají větší pracovní úhel, než liniové skenery s pevnou difrakční mřížky. Skener s rotujícím hranolem, který by splňoval požadavky, jsme na trhu neobjevili.

Zvolili jsme skener O2DS 500 (obr. 2) od firmy DSE. Jedná se o jednobodový laserový triangulační 2D skener s oscilujícím zrcadlem, pracující v červeném spektru a vybavený účinným filtrem IR spektra pro měření povrchů s teplotou do teplot do 1300°C. Zrcadlo je nakláněno elektrickým krokovým motorem s vačkou a setrvačnicku. Vačka je navržena tak, aby rovnoměrně rozprostírala body v rovině rovnoběžné s osou x. Pro návrat zrcadla, je silná pružina tlačí ji v opačném směru, než kameru. IRC čidlo měří jeden impuls za rotace. Úhel zrcadla je odvozen z doby od posledního pulzu. Důležitou vlastností těchto skenerů je synchronizace fáze a rychlosti měření pomocí řídicího signálu vysílaného jedním zvoleným skenerem ve skupině.

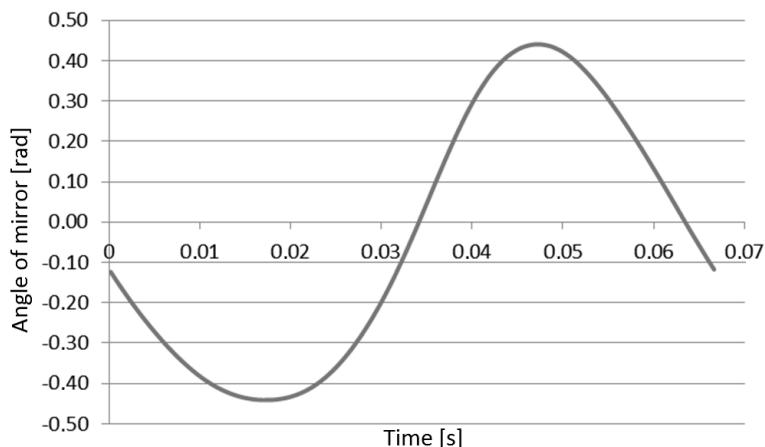


Obr. 3 Skener DSE O2DS s připevněným tepelným senzorem

Základní údaje udávané výrobcem:

- Pro měření za teplot do 1300 °C s ochranným obalem
- Rozlišení 0,2 mm v ose x a y, opakovatelnost $\pm 0,2$ mm
- Pracovní rozsah 250 - 750 mm
- Frekvence 6000 bodů/s
- 200 bodů na pracovní úhel 30°

Výstupem ze skeneru jsou body v kartézské soustavě. Skener ale fyzicky měří v polárních souřadnicích, kde změřený bod je dán úhlem odpovídajícím úhlu náklonu zrcátka a vzdáleností od počátku změřenou triangulačním principem. Úhel náklonu zrcátka je definován v kalibrační knihovně každého skeneru. Knihovna obsahuje vektor předepisující úhel každého měřeného bodu v daný okamžik, za předpokladu že je frekvence měření konstantní. Vektor tedy představuje závislost úhlu na čase (obr. 4).



Obr. 4 Závislost úhlu náklonu zrcadla na čase dle kalibrační knihovny

2 Nelinearity měření skenerem

Během nasazení do průmyslu, jsme zjistili, že měření jsou vážně ovlivněna nelinearitami. Ty se projevují především na objektech s kruhovým profilem. Na plochých předmětech a tento problém není tak patrný. U kulatých profilů má i malý rozdíl v informaci o úhlu měřeného bodu velký vliv na výsledný vypočtený průměr, protože malá změna souřadnice x vede k velké odchylce v y a to zejména v okrajových oblastech kde je úhel odrazu tupý. V našem případě, je výsledný obraz tvořen kombinací obrazů několika skenerů, takže deformace obrazu je součet těchto nelinearit. Při měření potrubí o průměru 160 - 400 mm jsme získali odchylky v měření průměru do 2 mm, avšak včetně nepřesností kalibračních přístrojů.

Nelinearity mají tři hlavní zdroje:

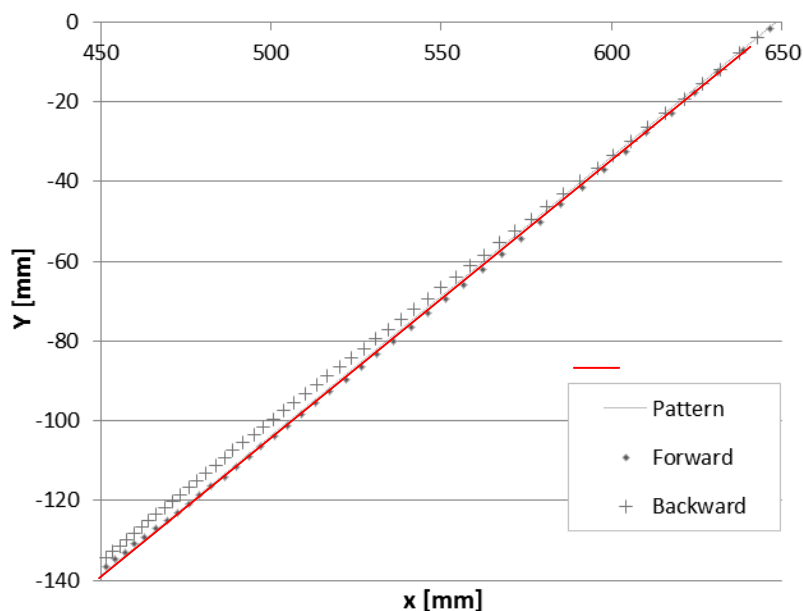
- nepřesnost v optické části triangulačního dálkoměru,
- hystereze v mechanismu naklápění,
- chybná kalibrace softwaru.

Pomineme-li špatnou kalibraci, tak hlavním vliv má nelinearita typu hystereze, vyskytující se v naklápěcím mechanismu. Tato skutečnost byla potvrzena konzultací s výrobcem. Naklápěcí mechanismus je ovlivněn několika faktory:

- pružnou deformací materiálu způsobenou například tlakem pružiny, jenž tlačí na vačku na rameno naklápěcí hřídele, a když vačka tlačí na rameno,
- hysterezi způsobenou mezerou vznikající mezi vačkou a ramenem hřídele, když se vačka vzdaluje od ramene,
- pracovní pozicí jinou než pozice, ve které byl skener kalibrován.

Opakovaná měření ukázala, že se deformace obrazu jsou stabilní a v dlouhodobém horizontu se nezmění, pokud není se skenery fyzicky manipulováno. Z toho důvodu je zde předpoklad, že by mělo být možné vyvinout metodu pro kalibraci skeneru v provozních podmínkách, založenou na opakovaném měření kalibračních modelů v různých polohách od

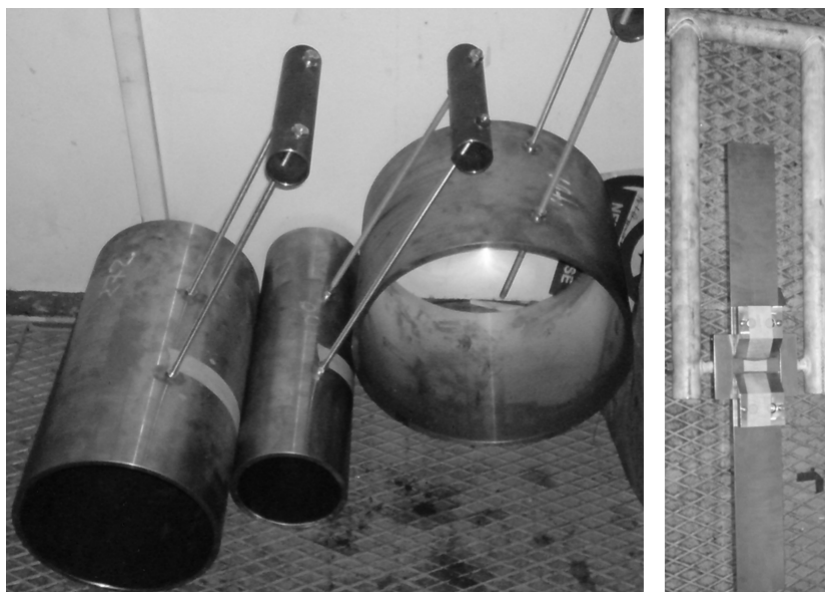
skeneru a poté upravit kalibrační vektor. Obrázek 5 zobrazuje nelinearitu skeneru. Tento příklad obsahuje závažné deformace a byl vybrán jako příklad, jelikož je na něm jasně vidět charakter nelinearit. Deformace ve standardních situacích, nejsou tak závažné.



Obr. 5 Nelinearita při měření kalibru s rovnou plochou

3 Zkušební měření

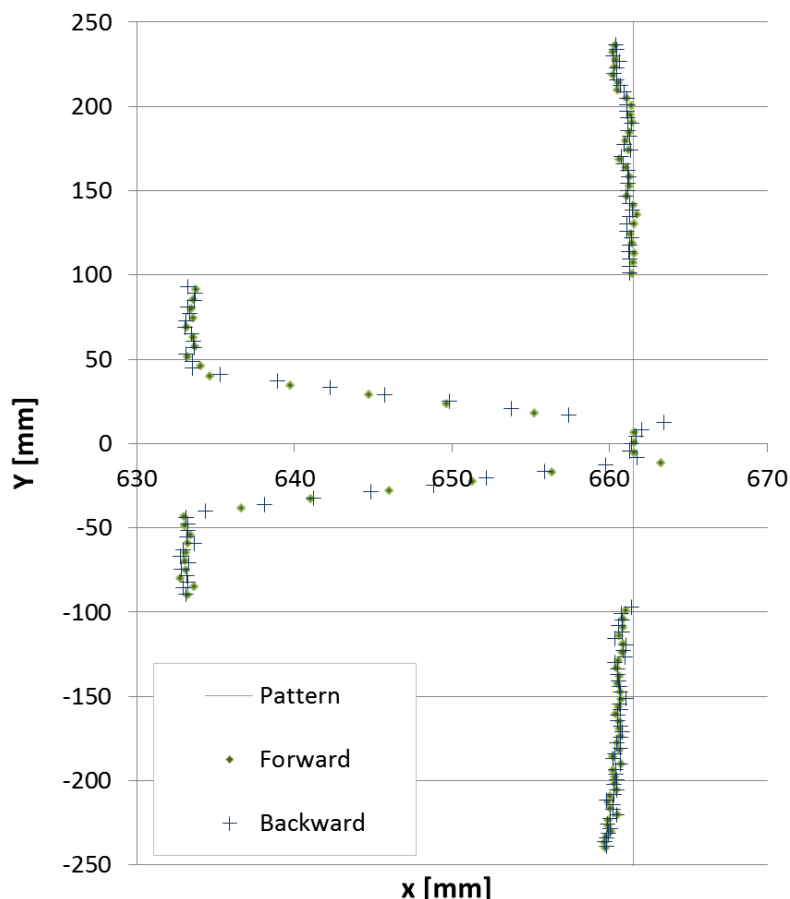
Testování a kalibrace snímačů byla provedena na kalibračních objektech znázorněných na obr. 6. Tato zařízení se uchyťí ve středové části měřicí soustavy. Jsou vyrobeny z oceli soustružením a frézováním. K dispozici jsou tři průměry potrubí 166, 272 a 401 mm a jeden otočná deska. Deska má jednu stranu plochou a na druhé straně blokem s drážkou tvaru V s tupým vrcholem tak, že jeho virtuální vrchol leží na rovině protější strany. Osa otáčení leží v tomto virtuálním vrcholu, takže tato rovina může otáčet kolem jednoho bodu na povrchu ploché strany.



Obr. 6 Kalibrační přípravky

V tomto bodě byla testována pouze možnost kompenzovat nelinearitu v úhlu náklonu zrcátka změnou kalibračního vektoru a nelinearita měření délky triangulačním dálkoměrem se považovala za nevýznamnou. Další verze kalibrace bude založena na obou souřadnicích.

V první fázi, se korekce prováděla na základě kalibrační tabulky dodávané výrobcem skeneru. Tato tabulka spojuje vektor měřených vzdáleností s vektorem úhlů, který je definovaný v kalibrační knihovně. Tabulka umožňuje korekci posunem fáze měření o konstantní hodnotu. Tato kalibrace se ukázala jako nedostatečná, protože může být použita pouze v případě, malých odchylek a zdvojených obrazů způsobených nesprávným časováním.

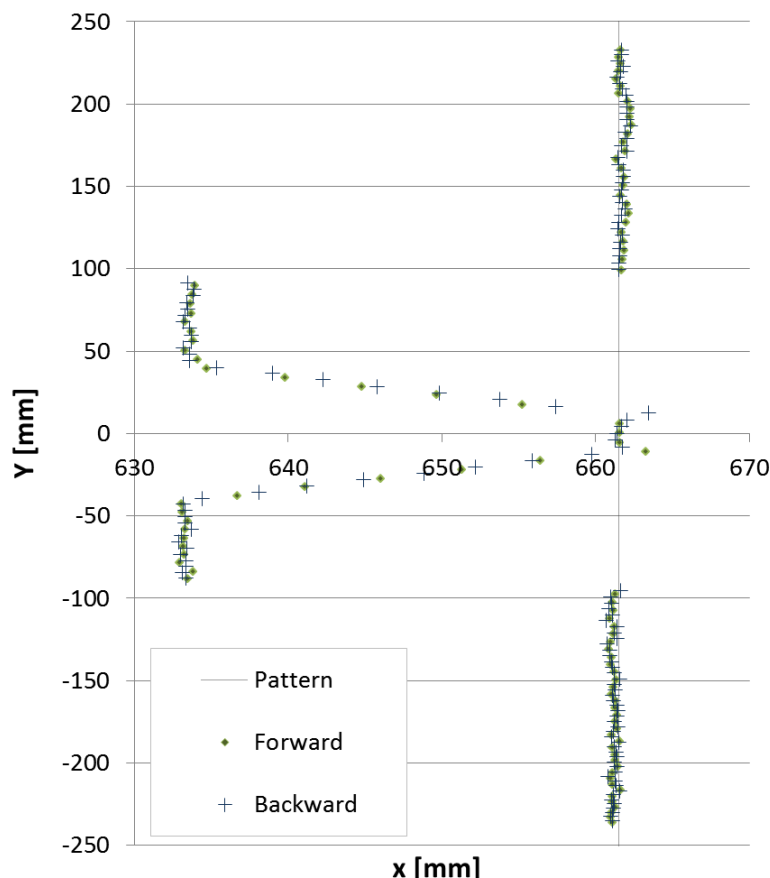


Obr. 7 Nelinearita při měření kalibru s rovnou plochou s blokem s V drážkou

V tomto okamžiku se zdálo, že deformace je způsobena pouze nesprávně definovaným pracovním úhlem, protože obraz byl symetrický od středu. V té době jsme si také nebyli vědomi problému s hysterezí vačkového mechanismu. Obrázek 8 znázorňuje hodnoty z obrázku 7 po korekci. Změnou amplitudy kalibrační křivky (obr. 4) byl snížen úhlu záběru skeneru tak, aby obraz roviny ležel v okolí přímky.

Tato kalibrace se ukázala nedostatečná, protože lze použít jen v případě malých odchylek a rozdělení obrazu. V tomto okamžiku se zdálo, že deformace je způsobená pouze špatnou interpretací pracovního úhlu a rozložení je symetrické od středu. Proto byla aplikována korekce součtem vektoru s pomocnou křivkou ve tvaru sinusoidy a experimentálně testována různá nastavení fáze a amplitudy této křivky. Tímto způsobem bylo možné u některých skenerů možno dosáhnout odpovídajícího tvaru, avšak pouze pro konkrétní data z jednoho měření. Aplikací získaného vektoru na data z jiných měření ukázala problém s neznalostí správných rozměrů. V té době nám také nebyl znám problém s hysterezí vačkového mechanismu. Korekční metoda byla opakovaně testována na sadách 4 až 10 měření. U

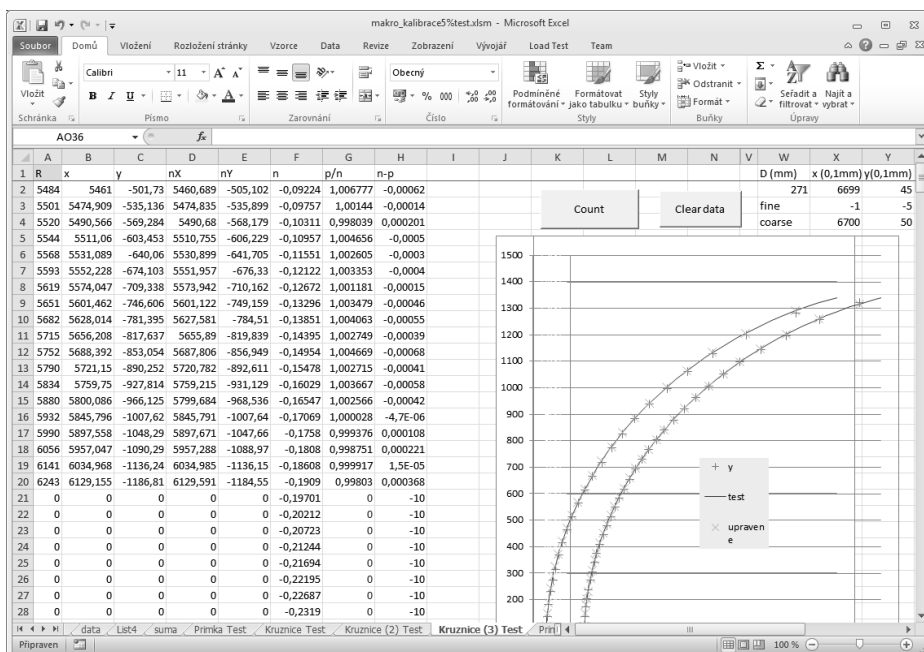
skenerů, kde se projevovaly atypické odchylky na krátkých úsecích, byl vektor úhlů korigován ručně, což bylo velmi pracné a výsledek kalibrace byl většinou neuspokojivý.



Obr. 8 Nelinearita při měření kalibru s rovnou plochou s blokem s V drážkou po korekci

4 Automatizace kalibrace

Idea byla taková, že pokud provedeme korekci na větší skupině dat z měření pokrývajících stejný pracovní úhel, měli bychom pak váženým průměrem získaných korekčních vektorů získat správný vektor natočení pro přepočítání souřadnic měřených bodů. Cílem při kalibraci bude úprava vektorů natočení tak, aby obraz odpovídal tvaru měřenému kalibračnímu přípravku ve tvaru rovné nebo válcové plochy. Byla proto vytvořena aplikace (obr. 9) v prostředí MS Excel, která obsahuje makra pro výpočet průsečíku kružnice s kalibrační přímkou a kalibrační kružnicí. Parametry kalibrace jsou zadávána ručně, z čehož nejobtížnější je správné umístění kalibrační křivky, což je ještě náročnější u kružnice. Neplatné body jsou vynechány. Získaný vektor úhlů je pak opět aplikován na naměřená data a v grafu zobrazen rozdíl mezi původní a novou verzí. Výsledný vektor úhlů je vážený průměr z vektorů získaných kalibrací na jednotlivých obrazech.



Obr. 9 Náhled kalibrační aplikace v režimu kalibrace na kružnici

Postup je následující:

Prvním krokem je odstranění bodů, bodů, jejichž souřadnice se příliš liší od původních souřadnic. Je to s největší pravděpodobností způsobeno chybným měřením. Tyto chyby se projeví zejména u bodů, jejichž průvodiče svírají s rovinou odrazu úhel blízký se 90° . Malá odchylka změřené vzdálenosti vyvolá velkou změnu úhlu při korekci. V další verzi již bude úhel dopadu součástí výpočtu určující, jakou váhu budou mít vypočtené souřadnice jednotlivých bodů.

Druhým krokem je testování aplikace jednotlivých vektorů úhlů na naměřená data. Postupně se jednotlivým řadám přiřazuje váha 1 a ostatním 0. Zkoumá se vliv na výsledné obrazy a řadám s negativním vlivem se zanechá váha blízká se 0. V následující verzi aplikace budou odděleny váhy pro oba směry skenování. Vliv jednotlivých vektorů úhlů na výsledné obrazy bude vyhodnocovat algoritmus aplikace.

Třetím krokem je úprava vah podle pozitivního vlivu na výsledek. Nyní se to provádí experimentálně. V následující verzi by měl tento problém řešit algoritmus testováním vlivu vah na odchylky obrazu od vzoru. Dále se předpokládá opakovaná aplikace celého algoritmu na získaný vektor úhlů, kdy výsledný vektor úhlů se stane výchozím vektorem následující iterace.

5 Závěr

Článek se dále zabývá nelinearitou 2D triangulačních skenerů s naklápěcím zrcátkem DSE 02DS, využitého v soustavě pro měření průměru a ovality trubek na výstupu z válcovací stolice a tedy za pohybu a teploty až 1000°C , vytvořené rámci projektu Preseed. Během provozu se ukázalo, že u skeneru tohoto typu se projevují nelinearity během měření. Při dané pracovní vzdálenosti, rozsahu, pracovního úhlu a rychlosti se již projeví sebemenší nepřesnost v konstrukci. Problematické se to stává při skládání obrazu z více skenerů a to zejména právě u měření povrchu s válcovým průřezem, kde se využívá velká část pracovní oblasti skeneru a chybný údaj o sklonu paprsku skeneru má velký vliv na následný výpočet tvaru objektu.

Nelinearita skenerů je způsobena zejména konstrukcí vačkového naklápění rozmítacího mechanismu a částečně změnou pracovní polohy oproti tovární kalibraci. Nelinearity se projevují deformací obrazu a rozdvobením řad naměřených bodů. Tvoří dvě skupiny

představující sken při naklánění zrcadla vačkou jedním směrem a při jeho návratu do výchozí polohy působením přitlačné pružiny. Vznikající hystereze je způsobena deformací materiálu, změnou pracovní polohy a zejména nedostatečným přitlakem při návratu zrcadla pomocí pružiny. Přítlak pružiny již nebylo možno zvýšit, neboť pak docházelo k deformaci mechanismu, zvýšenému otěru a tření mezi pohyblivými díly. Přidáním vodícího mechanismu se podařilo výrobcí tento problém snížit, avšak ne odstranit.

Z opakovaného měření vyplynulo, že pokud nedochází k fyzické manipulaci se skenerem, nemění se ani povaha nelinearity. Předpokládané řešení bylo v úpravě kalibrační knihovny určující polární souřadnice bodů v závislosti na změřené vzdálenosti a fázi měření. Pokus o řešení se skládal nejprve z ruční úpravy kalibračních koeficientů knihovny tak, aby výstup tvarem odpovídal změřenému kalibračnímu přípravku tvořeného frézovanou deskou a soustruženými trubkami o různých rozměrech. Poté byl vytvořen algoritmus v jazyce VBA pro MS Excel, který měl ze změřených hodnot provést korekci úhlových souřadnic tak, aby obraz odpovídal tělesu o zadaných rozměrech a souřadnici.

Dosažené výsledky zatím nebyly uspokojivé. Jednou z příčin byly nedostatečně přesné kalibry a nedostatečné množství dat a také chybná metodika při měření, kdy pravděpodobně nebyly osy kalibračních přípravků umístěny přesně kolmo k rovině měření, nebo docházelo k jejich pohybu vlivem okolí a nevhodné konstrukce. Nové kalibrační přípravky jsou vyrobeny s větší přesností a metodika měření bude vylepšena.

6 Literatura

- DSE *O2DS Z-line scanner series specifications* [online] dostupné z: http://sensor.dk/wp-content/uploads/2013/09/O2DS_Z_sept13.pdf. [cit: 7.8.2013]
- Burman, H. *Adjustment of laser scanner data for correction of orientation errors*. v: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000. vol. 33, part B3/1, pp. 119-126.
- Forest Collado, J. *New methods for triangulation-based shape acquisition using laser scanners*. PhD thesis, Universitat de Girona. 2004
- Kilian, J. Haala, N. *Capture and evaluate of laser scanner data*. v: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna, 31-B3, pp. 383-388.

Design and Development of GUI for Mapping of Obstacle by Sensor Fusion Techniques

SHARMA, Rahul

✉ Nám. Čs. legií 565, 532 10 Pardubice, University of Pardubice, Faculty of Electrical and Informatics Engineering, Department of Process Control.

💻 e-mail: rahul.sharma@student.upce.cz

Abstract: *Sensor fusion has been applied to robotics immensely in applications like localization, tracking, obstacle avoidance etc. Many sensor fusion techniques have been evolved over the time. In this paper, two sensor fusion techniques, namely statistical method and Kalman filtering, are used to localize the robot with the help of multiple IR sensors. A GUI is designed and developed, which shows the estimated distance and orientation to obstacle from the robot by the sensor fusion techniques. The GUI provides a basic prototype of mapping application which can further extended to more complicated computation and control of the robot.*

Keywords: *Sensor fusion, obstacle avoidance, mapping, estimation, localization*

1 Introduction

For an autonomous robot, perception of the environment is the most challenging task. Most of the cases, robot tends to rely on dedicated sensors, whose reliability are often questionable. Over dependency of the dedicated sensors brings huge challenge to the capability of autonomy of robots. This challenge can be eliminated by sensor fusion. Multi sensor fusion is a theory and technique which combines the data from multiple sensors to a common representation. Information from multiple sensors are fused together to estimate a more reliable data. The fusion of sensor data can be from redundant sensors or complementary sensors. Many techniques and approaches have been evolved over past two decades. A survey of sensor fusion techniques is presented in [SMITH, D., SINGH, S. 2006].

Sensor fusion has been applied in many applications like robotics, wireless sensor networks, remote sensing etc [LUO, R. C., YIH, C. C., SU, K. L. 2002]. Robot navigation [KAM, M., ZHU, X., KALATA, P. 1997, PANICH, S., AFZULPURKAR, N. 2011] and Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) [FANG, F., MA, X., DAI, X. 2005] are the two major areas in robotics, where sensor fusion has been applied intensively. Many techniques of sensor fusion have been studied and applied so far, for instance statistical methods, Kalman Filter, Particle filter etc.

Obstacle avoidance is one of the most challenging tasks in mobile robotics. The first and foremost requirement of any obstacle avoidance algorithm is to estimate precisely the position and orientation of the obstacle. This paper focuses on a design and development of a GUI for obstacle position and orientation tracking using simple sensor fusion techniques, namely Kalman filtering [SHARMA, R., DANIEL, H., DUŠEK, F.2014], statistical method [SHARMA, R., DANIEL, H., DUŠEK, F.2014]. The data from redundant sensors (IR range finder) are fused together to determine the two parameters, namely depth to the wall from the center of the robot and orientation to the wall.

The paper is organized as follows: section 2 describes mathematical modelling of the system followed by sensor fusion techniques in section 3. The GUI design is presented in

section 4. The results of the proposed system are stated in section 5. Section 6 presents the conclusion.

2 Mathematical Modelling

x_k and y_k are the points on the line (wall), where the IR sensor beam gets reflected. The parameters of interest are d and \emptyset , where d is the perpendicular distance from the origin of the robot to the wall and \emptyset is the angle between horizontal axis of robot and axis parallel to the wall.

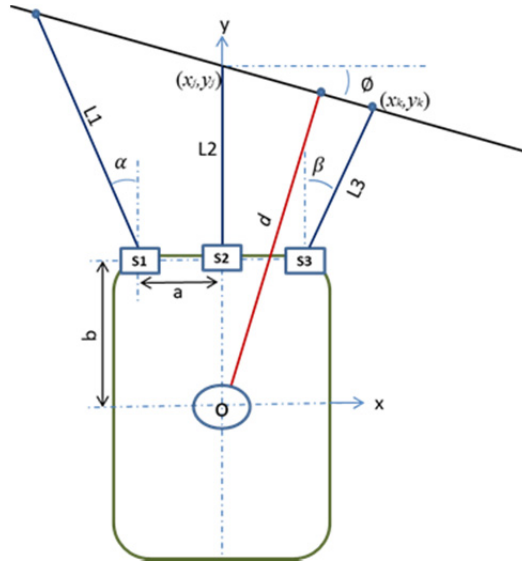


Figure 1 - Robot configuration [SHARMA, R., DANIEL, H., DUŠEK, F.2014]

S1, S2 and S3 are the three IR range finders connected to the robot. α and β are the angles at which the IR sensors are mounted on the robot. L_k is the depth to the wall from the robot measured by sensor k. a and b are the distances from the axes of robot to the sensors as shown in Figure 1. The parameters can be derived from the following expressions .

$$\begin{bmatrix} x_i \\ x_j \\ y_i \\ y_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} L_i \\ L_j \\ L_i \\ L_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a \\ b \\ b \\ a \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} y_i \\ y_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i & 1 \\ x_j & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} m \\ n \end{bmatrix} \quad (2)$$

m and n are the slope and y intercept respectively. (2) can be written in the form of ,

$$Y = F * X \quad (3)$$

Applying least square estimation (LSE) method to (3)

$$X = (F^T F)^{-1} F^T Y \quad (4)$$

$$\emptyset = \tan^{-1}(m) \quad (5)$$

$$d = \frac{n}{\sqrt{1+m^2}} \quad (6)$$

From (1) to (6), the two parameters (d and \emptyset) can be found out from the depth measurement of the sensors.

3 Sensor fusion techniques

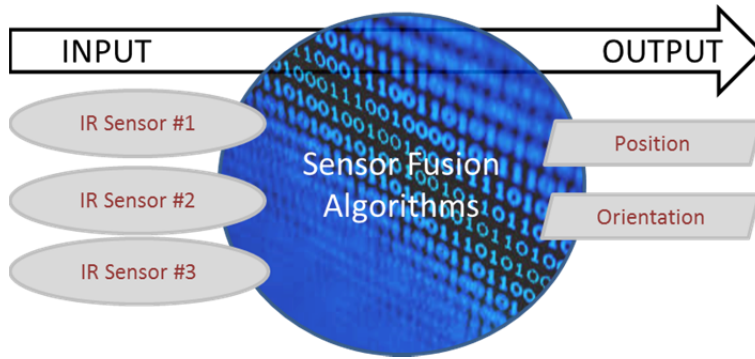


Figure 2 - Basic architecture of sensor fusion techniques

The basic prototype of sensor fusion technique is shown in the Figure 2. The raw data from the three IR range finders are fused together by sensor fusion techniques to estimate the parameters. Two sensor fusion techniques are presented in the paper.

3.1 Sensor fusion by Kalman Filter

Kalman filter has been extensively used in robotics [ZHANG, P., GU, J., MILIOS, E. E., HUYNH, P. 2005]. A survey of Kalman filter is given in [CHEN, S. Y. 2012].

The Kalman filter is a set of mathematical equations that provides an efficient computational technique to estimate the state of a process by minimizing the mean of the squared error. The Kalman filter achieves this by estimating past, present, and even future states. Many variants of Kalman Filter have been evolved over time. A discrete linear model Kalman filter is proposed in this paper for the parameter estimation. The two important steps of Kalman Filter are prediction and update. The following are the important steps.

Prediction is governed by the following equations.

$$\hat{x}_k = F_k \hat{x}_{k-1} + B_{k-1} \quad (7)$$

$$P_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_{k-1} \quad (8)$$

Where F, B are the matrices which relates the previous state to current. \hat{x}_k is the state variable vector. u_k , P_k and Q_k are control vector, covariance vector of state variable vector and process noise covariance.

Update stage is governed by the following equations.

$$y = Z_k - H \hat{x}_{k-1} \quad (9)$$

$$S = H P H^T + R \quad (10)$$

$$K = P H^T S^{-1} \quad (11)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K y \quad (12)$$

$$P_k = (I - K H) P_{k-1} \quad (13)$$

Where Z, H, R are measurement vector, extraction matrix and covariance vector of measurement vector respectively. K is the Kalman gain.

The basic architecture of the technique [SHARMA, R., DANIEL, H., DUŠEK, F. 2014] is shown in the Figure 3. In preprocessing stage, the raw analog signal samples from the IR sensors are acquired. From the set of samples, the mode (most repeating value, analog voltage in this case) of the data is calculated. The mode of the sample is then used to choose the sample set which falls in certain acceptable variation (eg, $\pm 5\%$) from the mode. Those chosen samples are averaged together and the depth is measured to get the inputs to the parameter estimation stage.

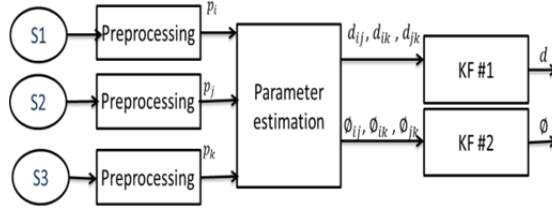


Figure 3 – Sensor fusion system by Kalman filter

Parameters are estimated as explained in section 2. Two Kalman filters are used to calculate the parameters, one for position and the other for orientation.

3.2 Statistical method

Figure 4 shows the basic design of sensor fusion system adopted [SHARMA, R., DANIEL, H., DUŠEK, F.2014] in the paper. The first step is preprocessing of the signal acquired from the sensor. In this stage, a series of sample are averaged to get an initial rough data. Using this data (p_i), the parameters (p_{ijk}) are calculated using eq. (1) – (8). These set of parameter have to be validated, for knowing the reliability of the sensors. At the data validation stage, the data is validated and a weighing factor v_{ijk} is calculated. The following sections will explain the stages in detail.

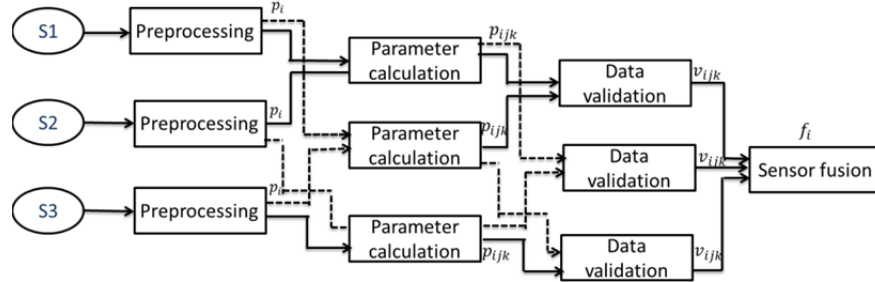


Figure 4 – Sensor fusion system by Statistical method

3.2.1 Data Validation

Data from the sensors has to be validated before proceeding to sensor fusion. The data from the sensor is only allowed to fuse, if it confirms certain criteria. The criteria are correlation coefficient and closeness coefficient. Correlation coefficient is given by the expression,

$$Cor(j, k) = \frac{N \sum_0^N P_{ijk} P_{ikj} - \sum_0^N P_{ijk} \sum_0^N P_{ikj}}{[N \sum_0^N P_{ijk}^2 - (\sum_0^N P_{ijk})^2]^{\frac{1}{2}} [N \sum_0^N P_{ikj}^2 - (\sum_0^N P_{ikj})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

$Cor(j, k)$ is the correlation of parameter P_i , calculated from sensor j and sensor k and N is the number of samples. Closeness coefficient is given by the expression,

$$\gamma = 1 - \frac{|P_{ij} - P_{ji}|}{Closeness} \quad (15)$$

Where $Closeness$ is the parameter which allows choosing the data which are closer.

When the new data (parameters) falls in a range, say magnitude of correlation coefficient is above 0.75 and closeness coefficient is less than 0.8, the data is selected. Otherwise the data is rejected and not chosen for data fusion. This allows the system to choose only reliable sensor data by comparing with all the other sources. A weighing factor, v_{ijk} gives the weightage of each parameter, so that the corresponding parameter can either selected or rejected. This factor is calculated by the following expression

$$v_{ijk} = \begin{cases} 0, & \text{if any of the criteria fails} \\ 1, & \text{if both the criteria are satisfied} \end{cases}$$

v_{ijk} , will help to choose the most reliable parameters for fusion, calculated from different sensors.

3.2.2 Sensor Fusion

The parameters which confirms the criteria of data validation are selected and fused together by the following expression

$$f_i = \sum_{i=0, j=0, k=0}^{i=3, j=n, k=n} \frac{\sigma_{kj}^2}{\sigma_{jk}^2 + \sigma_{kj}^2} p_{ijk} * v_{ijk} \quad (16)$$

Where is the final parameter, σ_{kj}^2 is the variance and p_{ijk} is the parameter i , calculated from sensor j and k .

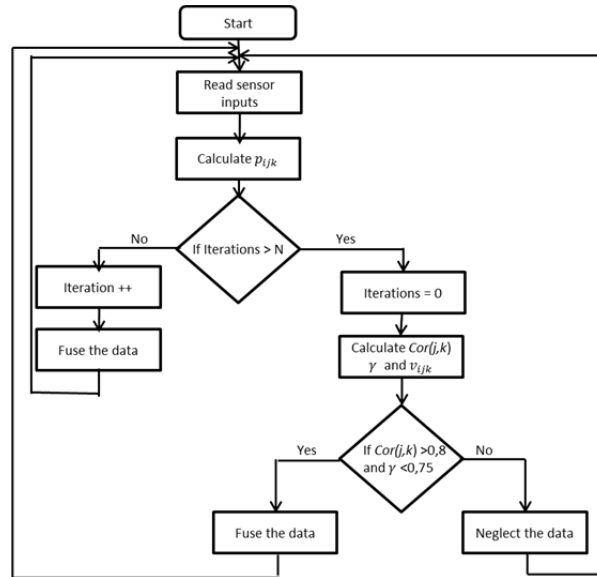


Figure 5 – Flow chart of sensor fusion system

Figure 5 illustrates the process, step by step. For making the system faster, a variable N (period), is introduced to validate data on regular intervals, thereby avoiding the sensor validation process in each iteration.

4 GUI development

The GUI is developed using a java based tool called Processing.org, which is a programming language as well as development environment. Figure 6 shows the sketch book screen shot of the program.

The data from the robot can be acquired through the serial port and the parameters can be plotted in the graph.

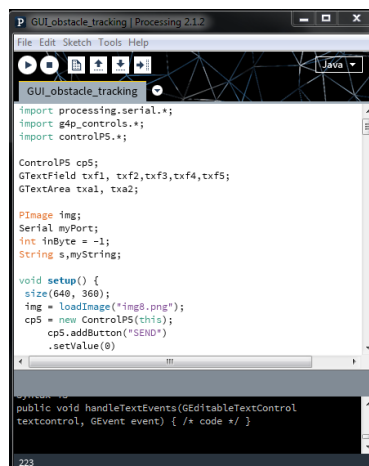


Figure 6 – Processing.org sketch book screen shot

The graph can be plotted with the help of the following equation.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tan \phi & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & \tan \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ d/\cos \phi \\ 0 \\ d/\cos \phi \end{bmatrix} \quad (17)$$

X_1 and X_2 are the points in x-axis, where the graph is to be plotted. (x_1, y_1) and (x_2, y_2) are the points in the line.

5 Results

Three SHARP GP2Y0A02, IR range finders were interfaced to Arduino Due Board. The IR range finders were fixed on front side of the robot with $a=5$, $b=5$, $\alpha=10^\circ$ and $\beta=10^\circ$. The IR sensors were sampled at a rate of 1ms and the raw analog sensor data were first processed and the parameters were estimated. The three sets of parameters were then fused together by the sensor fusion techniques.

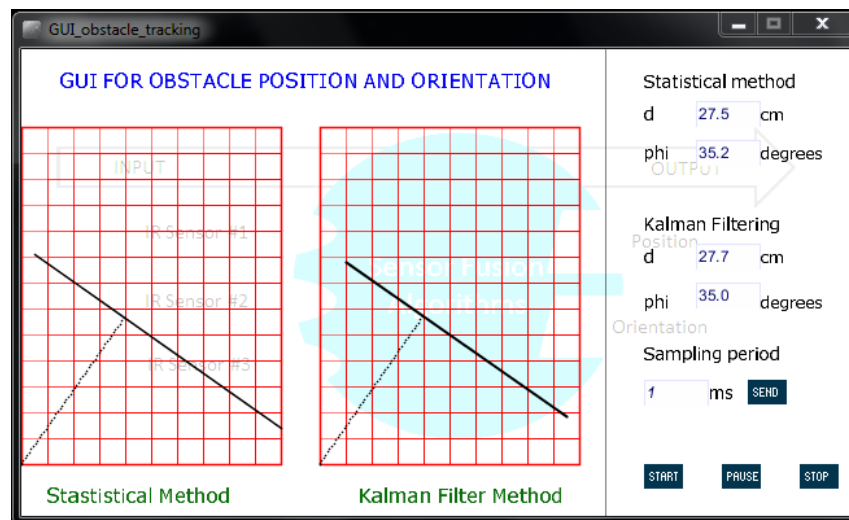


Figure 7 – Screen shot of GUI

This data is sent to the PC serially. The GUI will acquire this data from the serial port and the position and orientation are plotted in the graph and displayed in the text boxes. A text box is also provided for sending commands to the robot about the sampling time. Figure 7 shows the screen shot of GUI.

6 Conclusion

The sensor fusion techniques have been designed and implemented in the robot and the parameters are calculated. A GUI is also developed which will track the position and orientation of the robot. This GUI can be further extended to more complicated control or computation for an optimal obstacle avoidance strategy.

7 References

- CHEN, S. Y. *Kalman filter for robot vision: a survey*. Industrial Electronics, IEEE Transactions on 59.11 (2012): 4409-4420.
- FANG, F., MA, X., DAI, X. *A multi-sensor fusion SLAM approach for mobile robots*. Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference. Vol. 4. IEEE, 2005.

- KAM, M., ZHU, X., KALATA, P. *Sensor fusion for mobile robot navigation*. Proceedings of the IEEE 85.1 (1997): 108-119.
- LUO, R. C., YIH, C. C., SU, K. L. *Multisensor fusion and integration: approaches, applications, and future research directions*. Sensors Journal, IEEE 2.2 (2002): 107-119
- PANICH, S., AFZULPURKAR, N. *Sensor Fusion Techniques in Navigation Application for Mobile Robot*. Sensor Fusion-Foundation and Applications (2011): 101-120
- SHARMA, R., DANIEL, H., DUŠEK, F. *Sensor fusion for prediction of orientation and position from obstacle using multiple IR sensors, An approach based on Kalman Filter*. Applied Electronics (AE), 2014 International Conference on. IEEE, unpublished
- SHARMA, R., DANIEL, H., DUŠEK, F. Is. Nostradamus 2014: Prediction, Modeling and Analysis of Complex Systems. Springer International Publishing, unpublished.
- SMITH, D., SINGH, S. Approaches to multisensor data fusion in target tracking: A survey. Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on 18.12 (2006): 1696-1710.
- ZHANG, P., GU, J., MILIOS, E. E., HUYNH, P. *Navigation with IMU/GPS/digital compass with unscented Kalman filter*. In Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference (Vol. 3, pp. 1497-1502). IEEE.

The Brief Summary of Drive Development for Prosthesis and Rehabilitation Devices of Human Hand Based on Fluidic Actuators

ŠEMINSKÝ, Jaroslav

doc. Ing., PhD., ✉ KARaKR Sjf Technickej univerzity v Košiciach, Park Komenského 9,
Košice, 042 00, 🖨️ jaroslav.seminsky@tuke.sk, 🌐 <http://web.tuke.sk/karakr>

Abstract: *The paper maps the development of prosthetic of upper limbs from the first solutions to myoelectric (so-called bionic prosthesis) with a primary focus on the development of drives with muscle function. The human hand is the main tool for handling - from food across hygiene through various working tools. Loss of mobility in the limbs means the loss of man ego. Health restrictions cause a variety of problems, personal, but also in job placement and therefore it is understandable that a number of designers tried and trying to eliminate these problems. The paper provides an overview of the development of the individual cross-sectional design approaches for prosthetic and rehabilitation devices. Especially the development of control technology has accelerated the development of new drives with prospective application in prosthetics and rehabilitation facilities - fluid artificial muscles. Fluid artificial muscles present thanks of their properties, partly comparable with human skeletal muscles, interesting type of actuating device for using in biorobotics, prosthetics or else in industry.*

Keywords: *prosthesis, rehabilitation, artificial muscle*

1 Introduction

In recent years, largely part of the service robotics is dedicated to designing equipment for rehabilitation processes [1, 2]. In the world there are more and more projects aimed at developing advanced robotic rehabilitation devices that have as model bionic devices. As the rehabilitation must be done with each patient individually and according to diagnosis should be tailored to each patient individual rehabilitation program, therefore physiotherapist has to give to each patient time to separately. As the rehabilitation training is repeated with high frequency, as an appropriate solution shows the use of robotic rehabilitation devices.

Manipulation capability of the human hand, the flexibility and power to weight ratio are for machines till unreachable. Human hand is therefore a constant source of inspiration for designers of manipulation devices. One of the hand elements that designers try to copy, and which has a substantial effect on the human hand, is hand muscles. The most usable copies of biological muscles the pneumatic artificial muscles are including mainly, that represent progressive electro-pneumatic servo system. This type of muscle has properties similar to biological muscles.

2 A brief overview of development

Idea to use automation technology to assist in the movement of paralyzed limbs is not new and so equipment firstly appeared in the early 60s of the last century. An example may be a computer-controlled orthosis developed on the Case Institute of Technology, USA [3]. This device with 4 degrees of freedom (Fig. 1) was able to move the affected patient's hand according to the recorded program. Externally powered exoskeleton thus made possible the

movement of paralyzed limbs by combining various handling sequences. This project became a model for many other more sophisticated projects realized in later years.

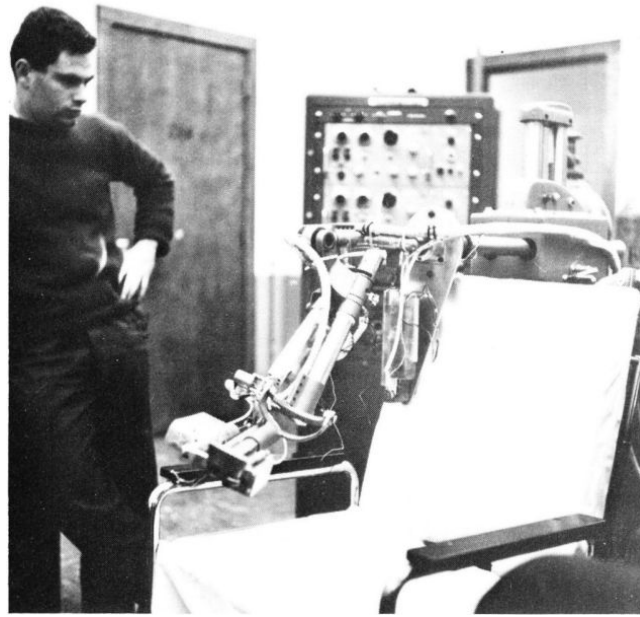


Figure 1 – CASE manipulator [3]

As an example of further development of the above mentioned concept is project of "Rancho Los Amigos Manipulator" (Figure 2) hand orthosis with seven degrees of freedom. The designers have tried to solve control arm problem directly by patient. Technically control has been realized by field of a microswitches activated by patients.

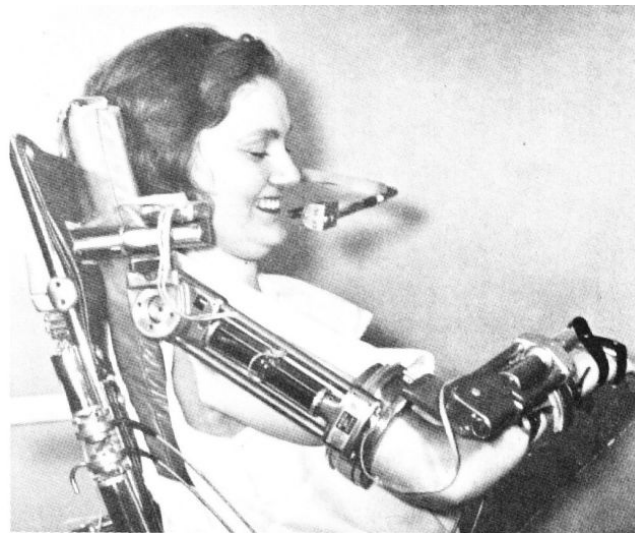


Figure 2 – Orthosis realised at Rancho Los Amigos. This orthosis is considered first external control orthosis [4]

Large clinical testing of these devices has demonstrated both the technical limitations of the so drives and problem of their management and control directly by human. The efforts of developers led to more or less successful solutions, which culminated in the creation of artificial hands I-LIMB (from Touch Bionics, UK), which was one of the first commercially available solutions (Figure 3). To control the fingers electrical signals generated by muscle were used. Although to wider application prevents high price (at the time of launch to the market \$ 60,000 - \$ 150,000), more and more advance technical solutions appear in the last decade known as bionic technology.



SOURCE: Touch Bionics

Figure 3 – Substitution of the hand I-LIMB by Touch Bionics, UK [5]

3 Fluidic drives – perspective direction of drive development

One of the fundamental problems that must be solved in the structure of prostheses and rehabilitation devices is actuating of its individual elements. As actuator in the first structures of prostheses linear pneumatic actuators or DC servos were used. The idea to use artificial muscle in prosthetics is not new. Late 50s of last century pneumatic artificial muscle were used in the design of artificial limbs (prostheses) due to its similarity to the skeletal muscle by American physicist Joseph Laws McKibben. To this idea led him disability of his daughter Karen caused by polio and family efforts to allow her studies at secondary school. [6]



Figure 4 – Karan McKibben with parents [6]

In the '50s Joseph L. McKibben pneumatic muscle was developed, which was in the 50s and 60s used for research for prosthetic applications. McKibben muscle is composed of an elastic tube. Principle of the invention is in a method of braiding elastic tube. For

McKibbenovho muscle is made double-stranded braid crossed winding (Figure 5). Braid as a network of basic pantograph units that transform pneumatic energy into mechanical. The inner elastic tube has a cylindrical shape, its shell inlet air pressure is applied to the tube expands in width. Using a pantograph braid is expanding radial force tube transformed into axial contraction force. Muscle thus increasing the internal pressure increases in diameter and shorter in length. Exerted force of muscle contraction is then used for movement.

Pneumatic artificial muscles are technical representative of bioactuator called artificial muscle. Its properties are used wherever electrical servo loses its advantage because of the excessive weight, stiffness and volume at low power. The actuators are designed as linear fluid motors (mostly used pneumatics), where a powerful element of the elastic actuator varying input pressure energy into mechanical energy output represented tensile strength and mechanical rectilinear movement.

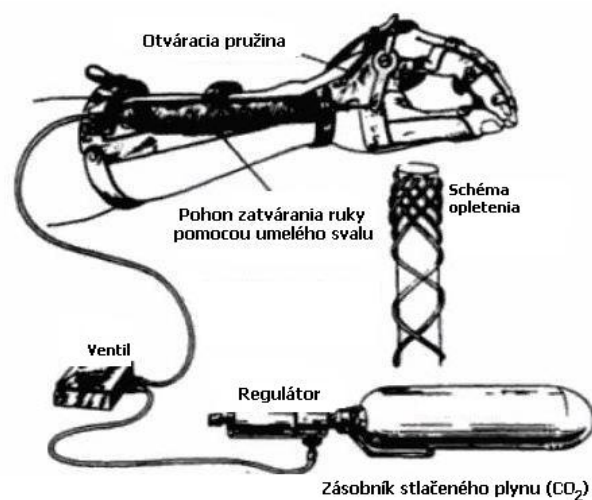


Figure 5 – Prosthesis driven by artificial muscles as proposed by McKibben [6]

McKibben was inspired by an earlier report from German scientists who had designed ingenious pneumatic devices on similar principle. Although McKibben was not the first to use this technical solution, fluidic muscle based on the principle of the elastic braid tube is now generally referred to as McKibben muscle. It was McKibben's use that coined the term "Artificial Muscle".

The first known attempt to construct a pneumatic artificial muscle was performed by Russian inventor P. Garasiev early 30s of the last century. This simple artificial muscle was made from rubber tube circumscribed by rings in several places, which were linked together by nontensile fibers. However, this artificial muscle had very limited use, since at that time were not suitable materials for its implementation. The oldest example of the so called braided pneumatic actuator similar to artificial muscles used at present time (Braided Pneumatic Muscle) was Patent received by Pierce, R.C. in 1936, which proposed to use it as alternative of coal mining explosives. Air pumped into the actuator widened its diameter, the resulting force in the radial direction disrupted coal. Although Pierce observed the phenomenon of longitudinal contraction of artificial muscle, practical application of it occurred in 1949 (patent received by De Haven, H., who proposed the use of artificial muscle tension for pilot safety belt in a crash). The actuator was powered by pressure of gas from explosion of black powder inside the device [7].

The need for a source of compressed gas, as well as improved electrical characteristics of electric drive led the robotics designers for use of electric drives. To develop control techniques and the easy availability of sufficient computing power activated again the development of pneumatic actuators and application of their advantageous properties where electric drives do not conform to their great weight, robustness and proportions.

It was developed several modifications McKibbenovho artificial muscle, for example Rubbertuator (Bridgestone in the mid-80s) [8], where in cooperation with Hitachi actuators for industrial robots to replace humans in production processes were developed.

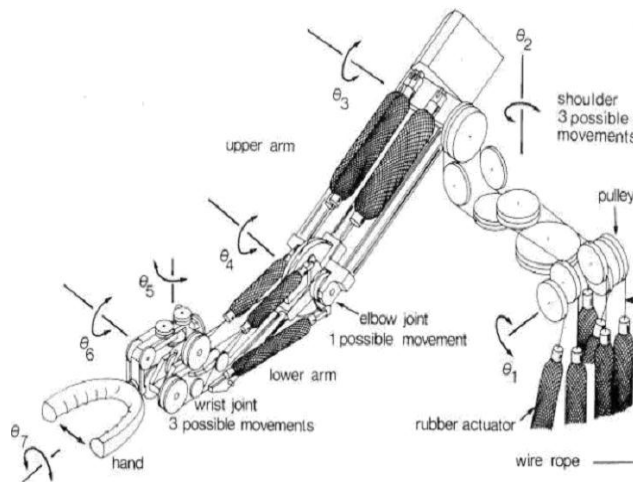


Figure 6 – The concept of a robotic arm with antagonistic arranged muscles (Bridgestone "Rubbertuator") [8]

Another modern solutions (Shadow Robot Company since 1988) [9], (Festo in 2002) [10] were targeted to the bionics.



Figure 7 – Based on pneumatic artificial muscles (fluidic) Festo has launched a joint venture project by EvoLogics GmbH and the Faculty of bionics and evolution of technology of Technical University of Berlin.

4 Conclusions

Pneumatic artificial muscles are powerful progressive element of pneumatic and electro-pneumatic servo systems in rehabilitation robotics. These devices are a mechanism structurally and functionally linked to the rehabilitation arm [11-12]. All these artificial pneumatic muscles are characterized by a high power to weight ratio and flexibility sufficient stability. But there are problems still with position control muscles due to their nonlinear characteristics and problems associated with the compressibility of the medium [13-14].

Pneumatic artificial muscles represent thanks of their properties partly comparable with human skeletal muscles interesting type of actuating device for use in biorobotics, but also prosthetics industry. Due to the specificity of these characteristics represent a qualitatively new dimension in these areas and allow the dissemination in application sphere.

Technology of their design, however, brings some problems in control, which are related to the elasticity of the materials used as well as the operating principle of pneumatic elements

having naturally non-linear character and whole system thereof is characterized by a relatively significant time delay.

5 References

- [1] SMRČEK, J. - KÁRNÍK, L.: Robotika : servisné roboty, navrhovanie-konštrukcia-riešenia. Prešov : Vyd. Michala Vaška, - 2008. - 531 s. - ISBN 978-80-7165-713-2
- [2] ŠIMŠÍK D. [et al.]. Rehabilitačné inžinierstvo. Košice : TU - 2011. - 398 s. - ISBN 978-80-553-0559-2
- [3] Cyberneticzoo. A history of cybernetic animals and early robots. [online]. Available from: <<http://cyberneticzoo.com/?p=7215>>
- [4] Cyberneticzoo. A history of cybernetic animals and early robots. [online]. Available from: <<http://cyberneticzoo.com/?p=7221>>
- [5] Electronic hand and finger prostheses from Touch Bionics. [online]. Available from: <<http://www.touchbionics.com/products/>>
- [6] Cyberneticzoo. A history of cybernetic animals and early robots. [online]. Available from: <<http://cyberneticzoo.com/?p=6674>>
- [7] DAVIS, S., TSAGARAKIS, N., CANDLERLE, J., CALDWELL, D.: Enhanced Modelling and Performance in Braided Pneumatic Muscle Actuators. The International Journal of Robotics Research. Vol. 22, No. 3 - 4, 2003, pp. 213 – 227
- [8] Cyberneticzoo. A history of cybernetic animals and early robots. [online]. Available from: <<http://cyberneticzoo.com/?p=6800>>
- [9] SHADOW HAND: Robotická ruka [online]. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Shadow_Hand>
- [10] Humanoid. Festo. [online]. Available from: <http://www.festo.com/cms/en_corp/9763.htm>
- [11] ŽIDEK, K., PITEĽ, J., GALAJDOVÁ, A., FODOR, M. Rehabilitation Device Construction Based on Artificial Muscle Actuators. In: Proceedings of the Ninth IASTED International Conference: Biomedical Engineering BioMed 2012, Innsbruck, Austria, February 15-17, 2012. Innsbruck: IEEE, 2012. pp. 855-861. ISBN 978-0-88986-909-7
- [12] TÓTHOVÁ, M., PITEĽ, J. Classification of Models of Pneumatic Artificial Muscles. In: Proceedings of the 10th International Conference PROCESS CONTROL 2012, Kouty nad Desnou, Czech Republic, June 11 – 14, 2012. [CD-ROM]. Pardubice: University of Pardubice, 2012. pp. C034a-1-6.
- [13] KOPEČNÝ, L.: McKibbenuv pneumatický sval – Modelovanie a použitie v hmatovom rozhraní. Dizertačná práca. Brno : Vysoké učenie technické v Brne, Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií, 2009.
- [14] BALARA, M. – BALARA, A.: Štruktúra a riadenie servosystému s umelými svalmi. Prešov : Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, 2009.

Acknowledgement

The research work is supported by the Project of the Structural Funds of the EU, Operational Programme Research and Development, Measure 2.2 Transfer of knowledge and technology from research and development into practice. Title of the project: „Research and development of intelligent nonconventional actuators based on artificial muscles”, ITMS code: 26220220103.



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov ES.

Modelování a simulace aktivně tlumené struktury Modelling and simulation of an active damped structure

ŠURÁNEK, Pavel¹, TŮMA, Jiří² & MAHDAL, Miroslav³

¹ Ing., ✉ VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 703 88 Ostrava, 🖨 pavel.suraneke@vsb.cz,

² prof., Ing., CSc., 🖨 jiri.tuma@vsb.cz,

³ Ing., Ph.D., 🖨 miroslav.mahdal@vsb.cz,

Abstrakt: Referát se zabývá tvorbou matematického modelu aktivně tlumené mechanické struktury. Tento model se skládá z diferenciálních rovnic popisujících dynamické chování struktury a diferenciální rovnice regulační smyčky. Tento simulační model je vytvořen za účelem návrhu a ověřování regulačního algoritmu před jeho aplikováním na reálný laboratorní testovací stav.

Klíčová slova: aktivní tlumení vibrací; vetknutý nosník; modelování; simulace

1 Úvod

Modelování a simulace skutečných objektů je v dnešní době velice důležité pro návrhy regulátorů. Umožňuje studii většího množství možných řídicích algoritmů v rámci simulačního modelu, aniž by je bylo nutné aplikovat na skutečné zařízení. To pomáhá vyhnout se nebezpečným situacím, které mohou nastat na skutečných strojích, v případě použití nevhodného regulátoru.

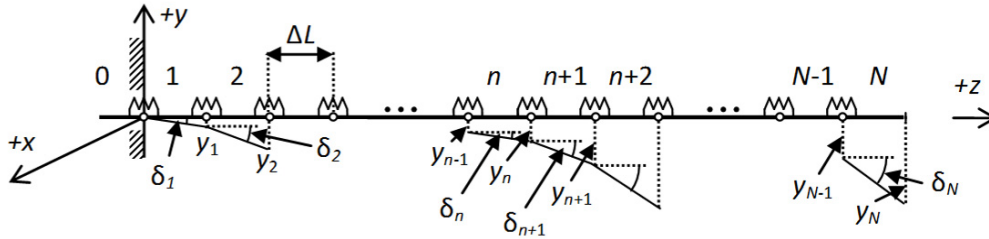
Autoři vyvinuli testovací zařízení pro experimenty s aktivním tlumením vibrací [1]. Tento laboratorní model se vyznačuje použitím „komínového“ piezoaktuátoru a nekolokovaným uspořádáním, kde snímač a akční člen jsou umístěny v navzájem vzdálených bodech vetknutého nosníku. Vědci obvykle pro své experimenty používají kolokované uspořádání [2] a také ohybové piezoaktuátory [3]. Tento referát popisuje tvorbu matematického modelu jednostranně vetknutého nosníku a jeho simulaci.



Obrázek 1 – Laboratorní model s vetknutým nosníkem

2 Matematický model

Pro diskretizaci spojitého nosníku je použita přímá fyzikální metoda diskretizace [4]. Nosník je rozdělen na N částí a ty jsou spojeny torzními pružinami, dle následujícího obrázku.



Obrázek 2 – Diskretizovaný model nosníku

Rozměry nosníku jsou: délka $L = 0,5$ m; šířka $b = 0,04$ m and tloušťka $h = 0,005$ m. Vlastnosti materiálu jsou určeny Youngovým modulem $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Pa a hustotou $\rho = 7850$ kg·m⁻³.

Dynamické chování diskretizovaného nosníku je poté popsáno diferenciální rovnicí:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = \mathbf{f}(t), \quad (1)$$

$\mathbf{y}(t) = [y_1(t) \dots y_N(t)]^T$ je časově závislý vektor příčných výchylek, $\mathbf{f}(t) = [f_1(t) \dots f_N(t)]^T$ je časově závislý vektor sil.

\mathbf{M} je matice tuhosti:

$$\mathbf{M}_{(N \times N)} = \begin{bmatrix} B & A & & & & \\ A & B & A & & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & A & B & A \\ & & & & A & B/2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A = \frac{\Delta m}{4} - \frac{J_x}{\Delta L^2}; \quad B = \frac{\Delta m}{2} + \frac{2J_x}{\Delta L^2}$$

$\Delta m = \rho L b h / N$ je hmotnost elementu, ΔL je délka elementu a J_x je moment setrvačnosti kvádrů:

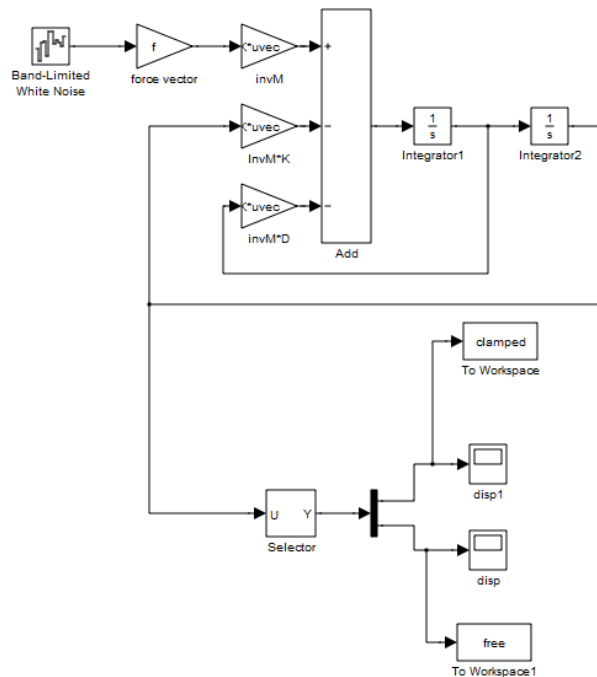
$$J_x = \Delta m \frac{\Delta L^2 + h^2}{12}. \quad (3)$$

\mathbf{D} je matice tlumení, která je proporcionální k matici hmotnosti:

$$\mathbf{D}_{(N \times N)} = \alpha \mathbf{M}, \quad (4)$$

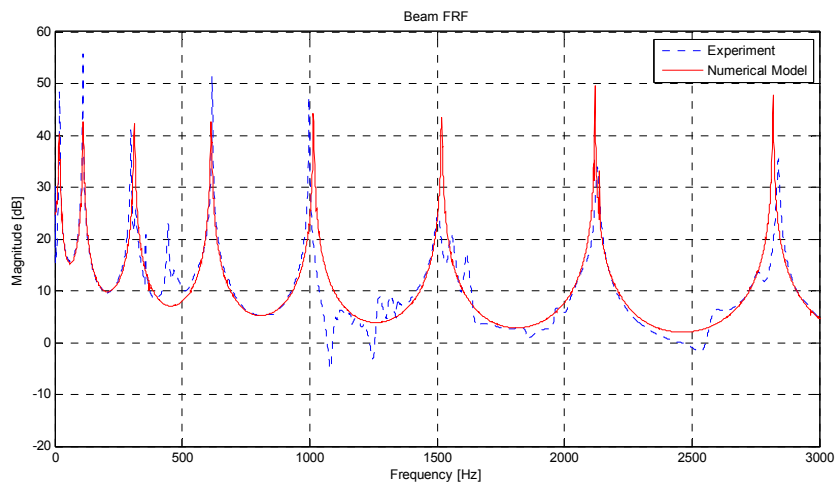
α je určeno porovnáním měřených a simulovaných dat: $\alpha = 20$ s⁻¹.

\mathbf{K} je matice tuhosti:



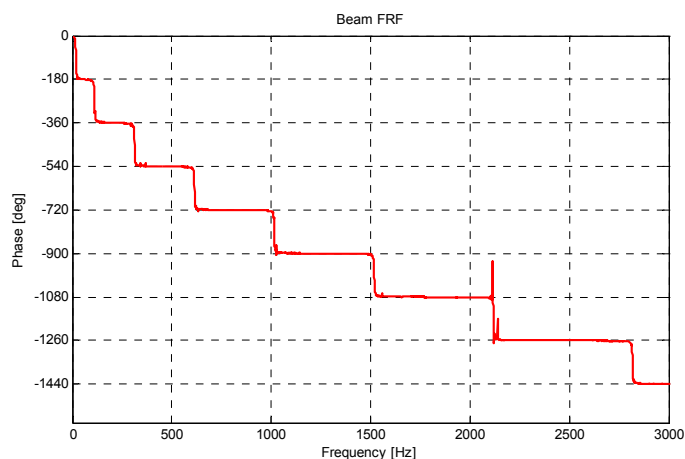
Obrázek 3 – Diagram v Simulinku pro simulaci diferenciální rovnice nosníku

Porovnání přenosu skutečného nosníku a přenosu získaného zpracováním simulačních dat je patrné z následujícího obrázku.



Obrázek 4 – Přenos vetknutého nosníku

Lze pozorovat, že systém je velice málo tlumený: rezonanční vrcholy jsou velice úzké a ostré. Vlivem uspořádání snímače a akčního členu (nekolokované uspořádání) každá rezonanční frekvence otáčí fázi o 180° . To znamená, že fázový posun u lichých rezonančních frekvencí je -90° a u sudých -270° . Tento fakt přináší komplikace v návrhu vhodného řídicího systému pro aktivní tlumení vibrací.



Obrázek 5 – Fázová charakteristika přenosu vetknutého nosníku

3 Modelování regulátoru

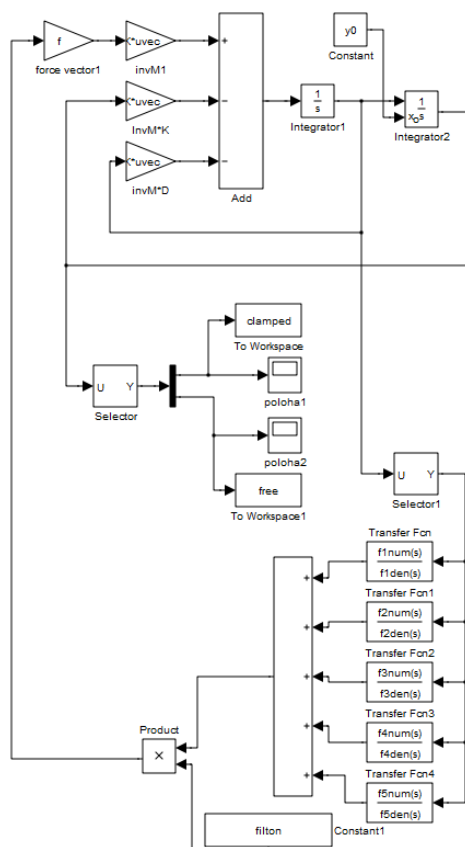
Obrázek 6 znázorňuje nosník vybavený aktivním tlumením vibrací. Předpokládá se snímání rychlosti a zpracování jejího signálu několika pásmovými filtry. Filtr typu pásmová propust má v rovině komplexní proměnné s přenos:

$$H_{Fi}(s) = \sum_{i=1}^M \frac{K_i \cdot 2\pi \cdot \Delta f_{BPi} s}{s^2 + 2\pi \cdot \Delta f_{BPi} s + 4\pi^2 f_i^2} \quad (12)$$

K_i je zesílení filtru, Δf_{BPi} je šířka propuštěného pásma a f_i je frekvence středu propuštěného pásma. Zesílení je záporné pro liché vlastní tvary kmitů a kladné pro sudé vlastní tvary kmitů. Parametry filtru jsou shrnuty v následující tabulce:

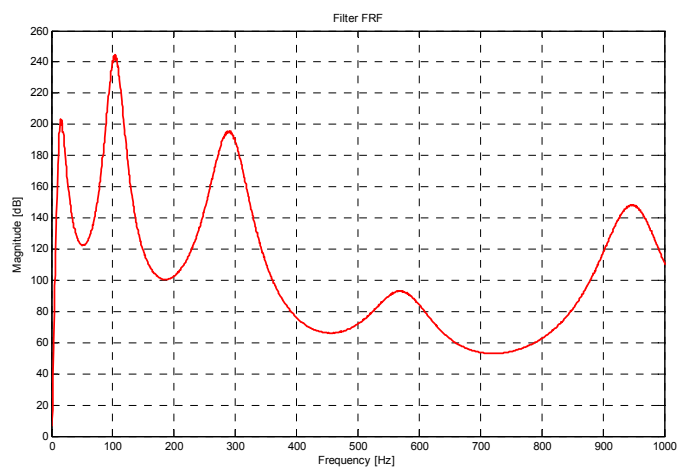
Tabulka 1: Parametry filtru

i	K_i [-]	f_i [Hz]	Δf_i [Hz]
1	-200	17	20
2	250	105	40
3	-200	293	80
4	100	575	120
5	-150	950	120



Obrázek 6 – Nosník s regulátorem

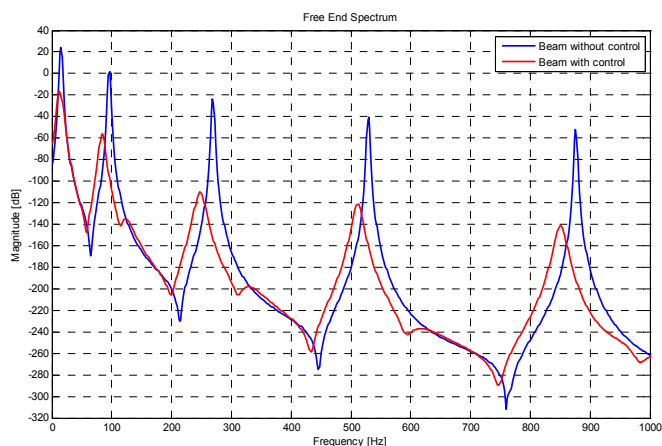
Přenos filtru demonstruje, že akční veličina je zdatelná pouze v úzkých pásmech, které jsou nastaveny tak, aby odpovídaly rezonančním frekvencím nosníku.



Obrázek 7 – Přenos filtru

4 Výsledky aktivního řízení vibrací

Použitím pásmových filtrů bylo dosaženo utlumení rezonančních vrcholů o nejméně 40 dB. To znamená minimálně stonásobný útlum.



Obrázek 8 – Účinnost aktivního tlumení

5 Závěr

Z Euler-Lagrangeovy rovnice byly odvozeny matice hmotnosti a tuhosti. Simulace v porovnání s naměřenou charakteristikou umožnila určit matici tlumení, která byla zjištěna jako proporcionální k matici hmotnosti. K modelu byl přidán regulátor skládající se z pásmových filtrů a bylo dosaženo snížení amplitud vibrací.


9 Použitá literatura

- [1] P. Šuránek and J. Tůma, Experiments with the Active Vibration Control of a Cantilever Beam, in Z. Dimitrovová, J.R. de Almeida, R. Gonçalves (eds.) “Proceedings of the 11th International Conference on Vibration Problems (ICOVP-2013)”, Lisbon, Portugal, 9-12 September, 2013, AMPTAC, ISBN 978-989-96264-4-7, abstract p. 391, article 7 pages.
- [2] D. Hickey, S. Sewell, B. Mortel and I. Esat, A Study to Demonstrate the Potential Benefits of Active Vibration Control in the Engineering Community, in Z. Dimitrovová, J.R. de Almeida, R. Gonçalves (eds.) “Proceedings of the 11th International Conference on Vibration Problems (ICOVP-2013)”, Lisbon, Portugal, 9-12 September, 2013, AMPTAC, ISBN 978-989-96264-4-7, abstract p. 369, article 9 pages.
- [3] S.-B. Choi, M.S. Han, Vibration control of a rotating cantilevered beam using piezoactuators: experimental work, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 277, Issues 1–2, 6 October 2004, Pages 436-442, ISSN 0022-460X.
- [4] J. Tůma, P. Šuránek and Miroslav Mahdal, Stability of the Active Vibration Control of Cantilever Beams, in Z. Dimitrovová, J.R. de Almeida, R. Gonçalves (eds.) “Proceedings of the 11th International Conference on Vibration Problems (ICOVP-2013)”, Lisbon, Portugal, 9-12 September, 2013, AMPTAC, ISBN 978-989-96264-4-7, abstract p. 195, article 11 pages.

Simulácia dynamiky pneumatického aktuátora využitím rôznych modelov svalov

Simulation of Pneumatic Actuator Dynamics Using Different Muscle Models

TÓTHOVÁ, Mária

Ing., ✉ Katedra matematiky, informatiky a kybernetiky, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, Technická univerzita v Košiciach, Bayerova 1, Prešov, SR, 
maria.tothova@tuke.sk

Abstrakt: *Pri implementácii pneumatických umelých svalov ako pohonov manipulačných zariadení je potrebné brať do úvahy nelineárny charakter tohto pohonu, ktorý má zásadný vplyv na riadenie celej sústavy. Na základe teoretického rozboru činnosti pneumatického aktuátora s umelými svalmi v antagonistickom zapojení a experimentálnych meraní bola navrhnutá bloková schéma pneumatického aktuátora na báze troch rôznych modeloch umelých svalov (jednoduchý geometrický model svalu, pokročilý geometrický model svalu, modifikovaný Hill-ov model svalu) a v prostredí Matlab/Simulink bol následne vytvorený simulačný model tohto aktuátora. V príspevku sú prezentované a porovnané vybrané dynamické charakteristiky antagonistického aktuátora získané simuláciou týchto troch modelov svalov s nameranými charakteristikami na experimentálnom aktuátore.*

Kľúčové slová: pneumatický aktuátor, umelé svaly, model

1 Úvod

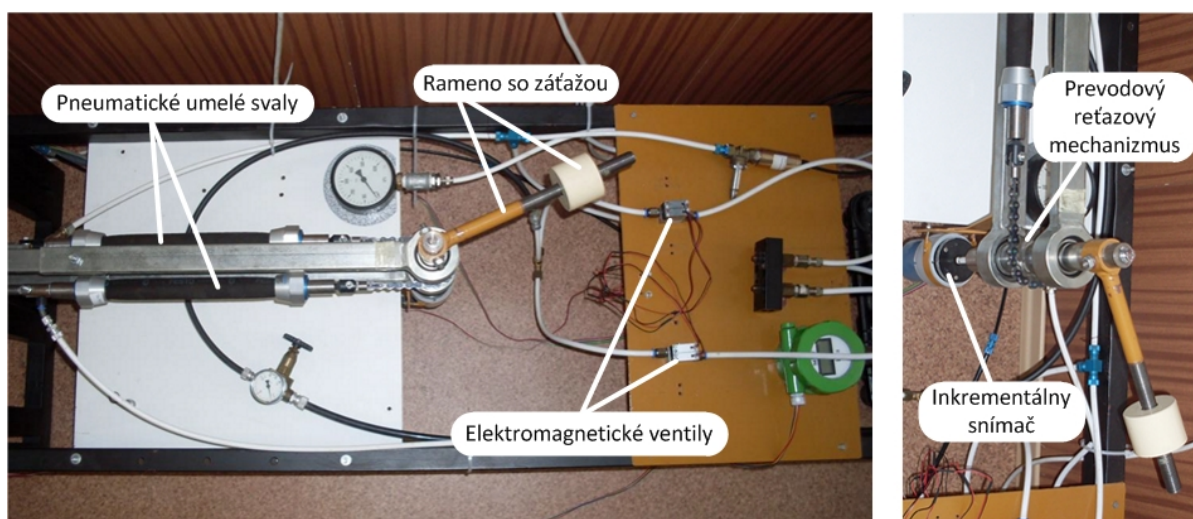
Pneumatické umelé svaly patria k nekonvenčnému typu pohonov so špecifickými vlastnosťami, medzi ktoré patrí mimoriadne vysoký pomer výkonu a sily k hmotnosti a objemu, pružnosť, flexibilita, bezpečnosť, jednoduchá inštalácia a minimálna údržba. Už pri prvotnej analýze tohto prvku zo sémantického hľadiska vyplýva najprirodzenejšia oblasť jeho použitia, ktorým je biorobotika a protetika. Uvedené oblasti však neostávajú jedinými a uplatnenie možno rovnako predpokladať aj v priemyselnej sfére, v ktorej hrá pneumatika v istých prípadoch nenahraditeľnú úlohu. Napriek konštrukčnej jednoduchosti je aj samotný pneumatický sval predmetom vývoja z technologického hľadiska, čím sa stáva vhodnou alternatívou pre bežne používané pneumatické valce.

2 Pneumatický aktuátor s umelými svalmi

V rámci doterajšieho výskumu bol na pracovisku autorky vytvorený polohový servosystém, kde riadenou sústavou bol aktuátor na báze antagonisticky zapojených pneumatických umelých svalov (obrázok 1).

Takto zostrojený antagonistický aktuátor s pneumatickými umelými svalmi je kinematickou štruktúrou, ktorá pozostáva z dvoch proti sebe pôsobiacich svalov typu FESTO MAS-20-250 vzájomne spojených ťažnou reťazou unášajúcou ozubené koleso, ktoré je nasadené a upevnené na výstupný otočný hriadeľ. K hriadeľu je následne pripojené rameno so záťažou. Pootočenie (poloha) hriadeľa je proporcionálne, rovné rozdielu tlakov v jednotlivých svalov, tuhosť polohy hriadeľa v príslušnom smere je daná veľkosťou tlaku v príslušnom

pneumatickom svale, ktorý je namáhaný v ťahu. Akčný člen je tvorený dvoma párami priamo ovládaných dvojcestných elektromagnetických ventilov [Hošovský, 2012].



Obrázok 1 – Experimentálny pneumatický aktuátor s umelými svalmi

3 Použité modely svalov

Pneumatický aktuátor s umelými svalmi tvorí nelineárnu sústavu, ktorej koncová poloha je nelineárnou stredovo symetrickou funkciou plniaceho tlaku vzduchu v umelých svaloch. Vzhľadom na značne nelineárny charakter takejto sústavy je potrebné mať k dispozícii modely týchto pohonov, ktoré sú dôležité pre simuláciu dynamiky pohybu a tiež pre riadenie týchto pohonov [Piteľ, 2007].

Súčasný návrh riadenia vo všeobecnosti predpokladajú vytvorenie matematických modelov riadených systémov, získaných buď na základe teoretického rozboru fyzikálnych javov prebiehajúcich v systéme alebo identifikáciou jeho vlastností na základe experimentálne zistených charakteristík (veľmi často kombináciou oboch prístupov). Modelovanie systémov na báze pneumatických umelých svalov je obzvlášť náročné kvôli ich prirodzene veľmi komplexnému matematickému popisu súvisiacemu s ich elastickým charakterom ako aj špecifikami vyplývajúcimi z použitého média (stlačený vzduch). Dokonalý matematický model nie je možné vytvoriť kvôli nie úplnej znalosti všetkých fyzikálnych javov prebiehajúcich v sústave (stochastický charakter vplyvov a zmien). Z tohto dôvodu je potrebné navrhovať matematický model ako málo citlivý na neurčitosti, teda schopný zabezpečiť nominálne odozvy aj pri zmenách parametrov a porúch.

V rámci výskumu boli vytvorené tri modely pneumatických umelých svalov:

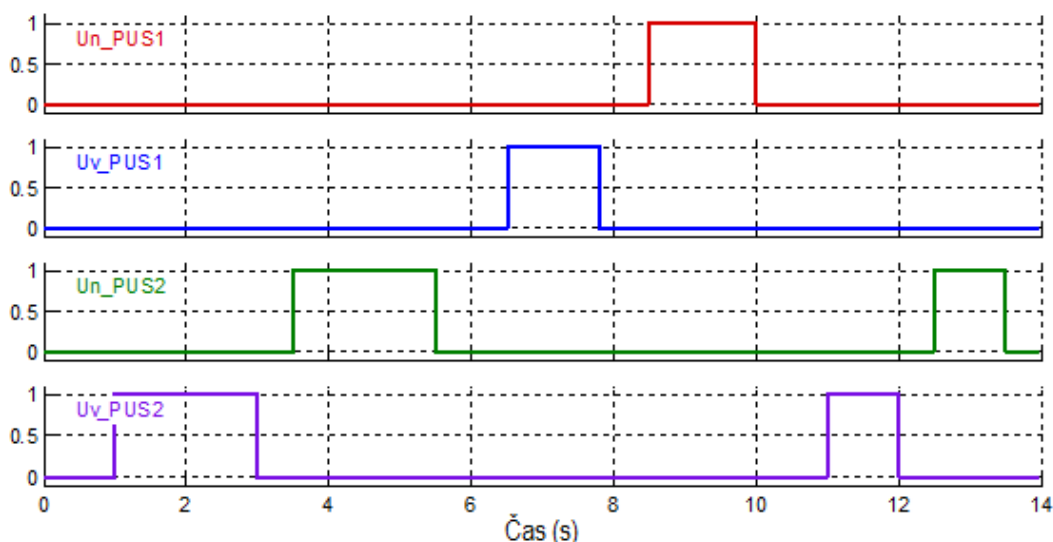
- Na základe zjednodušeného matematického popisu geometrie svalu bol vytvorený *jednoduchý geometrický model*, ktorý popisuje sval ako valec s nulovou hrúbkou steny. Experimentálnym meraním bola zistená statická charakteristika závislosti uhla natočenia ramena aktuátora a následne bola zahrnutá do modelu aktuátora [Boržíková, 2011].
- Jednoduchý geometrický model svalu sa stal základom pre *pokročilý geometrický model*, ktorý predpokladá, že sval je eliptický valec. Rovnako berie do úvahy, že pri zmene tlaku vo svale sa môže meniť priemer svalu, ktorý je funkciou dĺžky svalu. Celý model vznikol na základe matematického popisu, experimentálne merania neboli potrebné [Tóthová, 2013].
- V roku 1938 fyziológ a biofyzik A.V.Hill vytvoril trojprvkový elastický model svalu, ktorý presne a jednoducho popisuje jeho fyzikálne vlastnosti. Je priamo uplatniteľný pre modelovanie kontrakcie svalov, v ktorých vonkajšie skrátenie nastáva pri konštantnom vonkajšom zaťažení. Tento model sa stal základom pre tvorbu *modifikovaného Hill-ovho modelu* svalu, v ktorom niektoré charakteristiky boli experimentálne merané [Piteľ, 2013].

4 Simulované dynamické charakteristiky aktuátora

Simulačný model aktuátora za použitia troch rôznych modelov svalov popisujúci dynamiku svalov bol navrhnutý a simulovaný v prostredí Matlab/Simulink. Modely vychádzajú z doterajších poznatkov nadobudnutých v priebehu výskumu so špecifikami predpokladanej aplikácie a použitých komponentov, dostupnej teórie o fyzikálnych procesoch prebiehajúcich v skúmanom systéme a dostupných informácií z experimentálneho výskumu.

Na začiatku simulácií boli svaly plne natlakované na tlak 600 kPa, rameno aktuátora bolo v nulovej počiatkovej polohe. Časový krok numerického riešenia modelu bol nastavený na konštantných 0,003 s a doba simulácie bola nastavená na hodnotu 14 s.

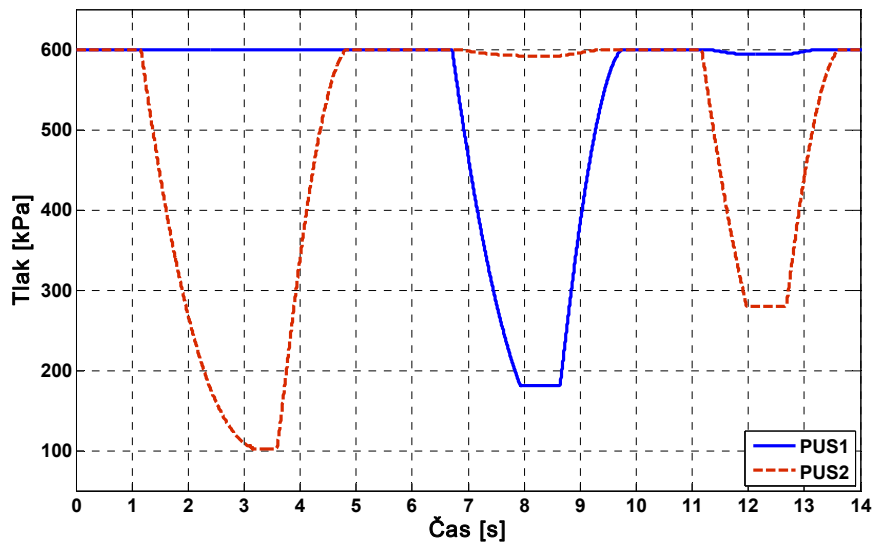
Na obrázku 2 sú znázornené priebehy ovládacích signálov ventilov pre simuláciu aktuátora. Os x je časová os, na osi y je logický stav signálu (log. „0“ alebo log. „1“). Ako je zrejmé z obrázka 2, najprv bol otvorený vypúšťací ventil druhého svalu v čase 1 s na dobu 2 s a následne v čase 3,5 s bol otvorený jeho napúšťací ventil rovnako na dobu 2 s. Vypúšťací ventil prvého svalu bol otvorený v čase 6,5 s na dobu 1,5 s a jeho napúšťací ventil bol otvorený v čase 8,5 s na rovnakú dobu otvorenia. Na záver simulácie sa znova otvoril vypúšťací ventil druhého svalu v čase 11 s, ale iba na dobu 1 s. Jeho napúšťací ventil sa otvoril v čase 12,5 s na rovnakú dobu otvorenia.



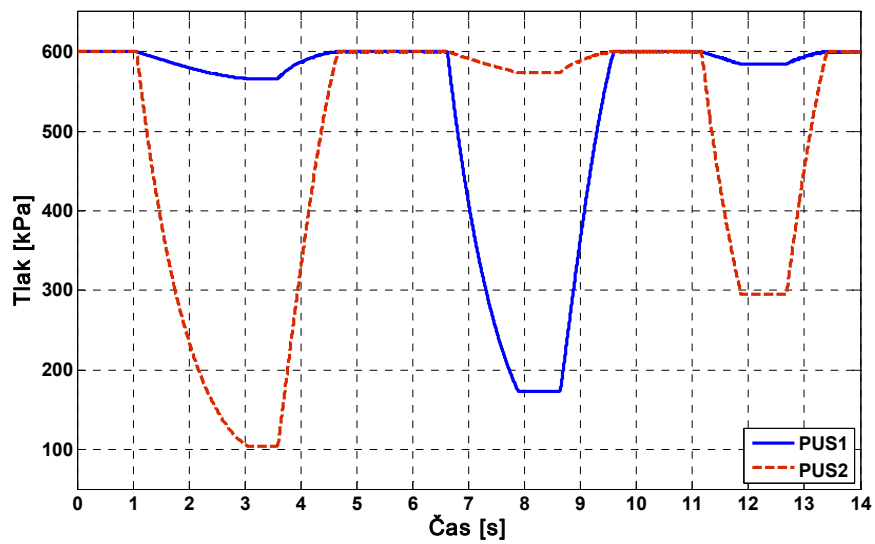
Obrázok 2 – Priebehy ovládacích signálov ventilov pre simuláciu aktuátora

Výsledky simulácií priebehu tlaku v umelých svaloch sú zobrazené na obrázku 3, 4, a 5, ktoré boli získané pri rôznej dobe otvorenia ventilov podľa obrázka 2. V čase 1 s sa s dopravným oneskorením druhý sval úplne vypustil z dôvodu dostatočne dlhého otvorenia jeho vypúšťacieho ventilu a tlak v tomto svale klesol na hodnotu atmosférického tlaku vzduchu (približne 100 kPa). Následne otvorením napúšťacieho ventilu tohto svalu sa sval znova naplnil a tlak sa zvýšil na počiatkovú hodnotu 600 kPa. Ďalším otvorením vypúšťacieho ventilu či už prvého, alebo druhého svalu sa ani jeden zo svalov úplne nevypustil z dôvodu krátkej doby otvorenia ventilu.

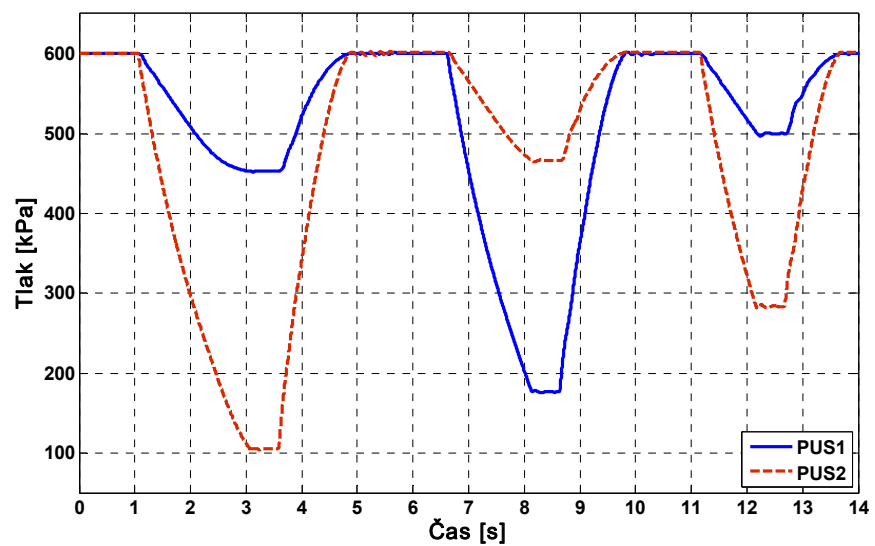
Ako je zrejmé z obrázkov 3, 4, a 5 rozdiely medzi jednotlivými použitými modelmi svalov sú v priebehoch tlakov v pasívnych svaloch (ktorých príslušné ventily sú zatvorené), nakoľko v prezentovaných simuláciách je ovládaný vždy iba jeden, tzv. aktívny sval. Obrázok 3 predstavuje priebehy získané simuláciou modelu za použitia jednoduchého geometrického modelu svalu, pričom v dôsledku zjednodušeného popisu svalu je priebeh tlaku v pasívnom svale takmer konštantný. Priebehy na obrázku 4 sú získané simuláciou použitím pokročilého geometrického modelu svalu a na obrázku 5 pomocou modifikovaného Hill-ovho modelu svalu, u ktorých je zrejmy výraznejší pokles tlaku v dôsledku presnejšieho modelovania svalu.



Obrázok 3 – Simulované priebehy tlaku vo svaloch na báze jednoduchého geometrického modelu svalu

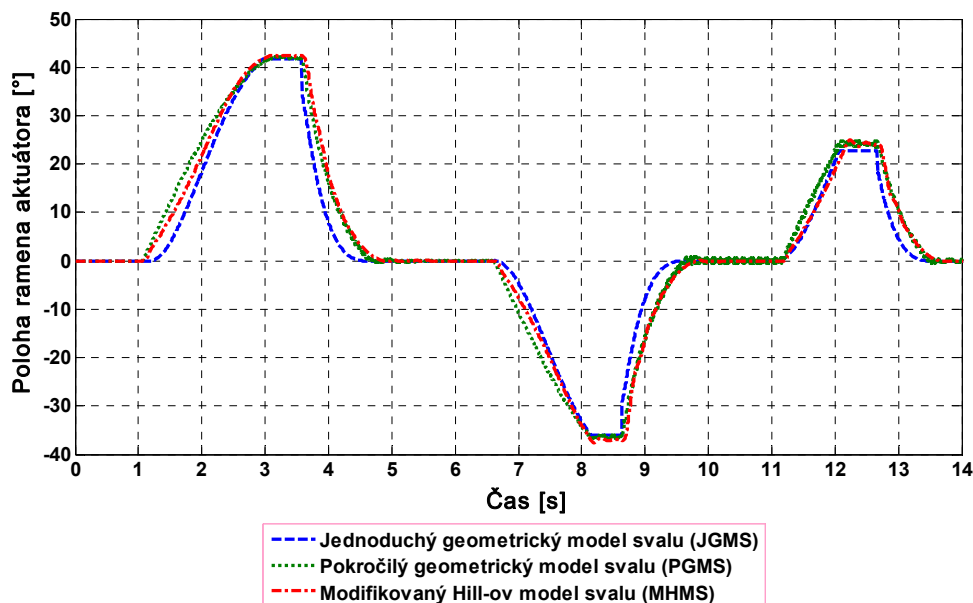


Obrázok 4 – Simulované priebehy tlaku vo svaloch na báze pokročilého geometrického modelu svalu



Obrázok 5 – Simulované priebehy tlaku vo svaloch na báze modifikovaného Hill-ovho modelu svalu

Obrázok 6 znázorňuje simulovanú časovú závislosť uhla natočenia ramena aktuátora použitím troch rôznych modelov svalov. V čase 1 s bol otvorený vypúšťací ventil druhého svalu, rameno aktuátora sa s dopravným oneskorením vychýlilo z nulovej polohy do kladných hodnôt. Nakoľko bol ventil dostatočne dlho otvorený, poloha ramena aktuátora dosiahla pri všetkých modeloch svalov maximálnu hodnotu približne $+42^\circ$. Otvorením príslušného napúšťacieho ventilu sa rameno aktuátora vrátilo späť do nulovej polohy. Do záporných hodnôt sa rameno vychýlilo otvorením vypúšťacieho ventilu prvého svalu a nakoľko bol ventil otvorený iba na dobu 1,5 s rameno dosiahlo zápornú hodnotu pre všetky modely svalov približne -38° . V čase 11 s bol otvorený znova vypúšťací ventil druhého svalu, ale iba na dobu 1 s a rameno aktuátora dosiahlo kladnú hodnotu približne 25° . Na záver simulácie sa rameno vrátilo do nulovej polohy otvorením napúšťacieho ventilu druhého svalu.



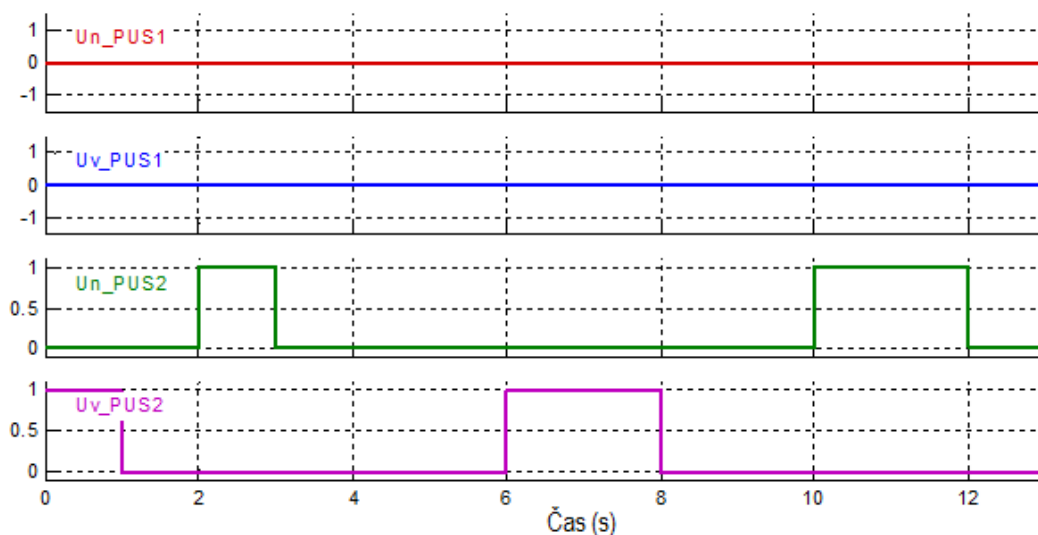
Obrázok 6 – Simulované priebehy uhla natočenia ramena aktuátora

5 Porovnanie simulovaných priebehov s nameraným priebehom

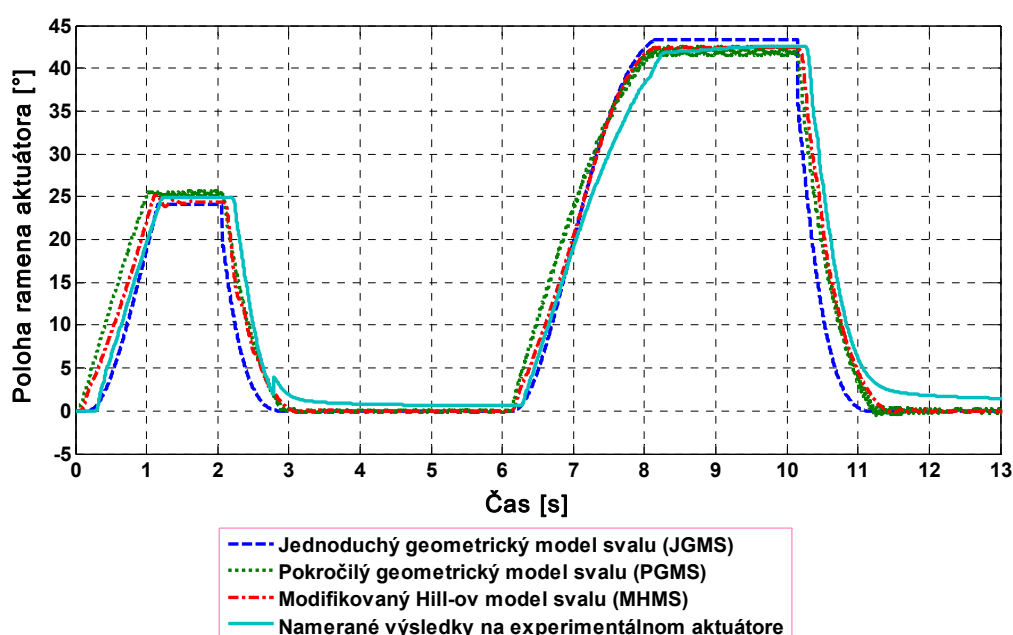
Simulované priebehy boli následne porovnané s priebehom uhla natočenia ramena nameranom na experimentálnom aktuátore.

Rovnako ako pri predchádzajúcich simuláciách dynamických charakteristík aktuátora boli svaly na začiatku natlakované na tlak 600 kPa a uhol natočenia ramena aktuátora bol nulový. Doba simulácií a merania bola nastavená na hodnotu 13 s. Ventily oboch svalov boli otvorené ako je znázornené na obrázku 7. V čase 0 s bol otvorený vypúšťací ventil druhého svalu na dobu 1 s a následne v čase 2 s bol otvorený jeho napúšťací ventil na rovnakú dobu jeho otvorenia. V čase 6 s bol otvorený vypúšťací ventil druhého svalu, ale už na dobu 2 s a následne v čase 10 s bol jeho napúšťací ventil otvorený na rovnakú dobu otvorenia.

Obrázok 8 porovnáva simulovanú časovú závislosť uhla natočenia ramena aktuátora použitím troch rôznych modelov svalov s nameraným priebehom na experimentálnom aktuátore. Priemerná absolútna chyba simulovanej polohy ramena aktuátora pri použití jednotlivých modelov svalov v porovnaní s nameranými hodnotami je $PACH_{JGMS} = 2,52^\circ$, $PACH_{PGMS} = 1,28^\circ$, $PACH_{MHMS} = 1,58^\circ$ a maximálny rozdiel je $\max_{JGMS}(|\Delta\phi|) = 4,91^\circ$, $\max_{PGMS}(|\Delta\phi|) = 3,95^\circ$, $\max_{MHMS}(|\Delta\phi|) = 4,46^\circ$. Príslušné relatívne chyby sú potom: $\delta_{PACH(JGMS)} = 15,78\%$, $\delta_{PACH(PGMS)} = 8,04\%$, $\delta_{PACH(MHMS)} = 9,93\%$, $\delta_{\max(JGMS)} = 11,56\%$, $\delta_{\max(PGMS)} = 9,30\%$, $\delta_{\max(MHMS)} = 10,50\%$.



Obrázok 7 – Priebehy ovládacích signálov ventilov



Obrázok 8 – Namerané a simulované priebehy uhla natočenia ramena aktuátora

6 Záver

V príspevku boli prezentované a porovnané vybrané dynamické charakteristiky antagonistického aktuátora získané simuláciou jeho dynamického modelu v prostredí Matlab/Simulink využitím troch rôznych modelov svalov s nameranými charakteristikami na experimentálnom aktuátore. Prezentované charakteristiky sú značne nelineárne, čo kladie vysoké nároky na algoritmy riadenia takéhoto aktuátora. Z porovnania tiež vyplýva, že prístup k tvorbe jednotlivých modelov svalov bol správny. Vzniknuté rozdiely mohli byť spôsobené rôznou zložitou modelovaním svalov ako aj neuvažovanými niektorými vlastnosťami umelých svalov (napr. trenie, hystéza), ktorých modelovanie môže byť predmetom ďalšieho výskumu. Vzhľadom ale na prioritné použitie odsimulovaných modelov v adaptívnych štruktúrach riadenia s referenčným modelom využívajúcich pokročilé algoritmy nie je nutné získanie presného dynamického modelu simulovaného aktuátora až tak dôležité, nakoľko tieto algoritmy sú robustné voči určitým chybám modelovania.

Príspevok bol vypracovaný s podporou Štrukturálnych fondov Európskej únie, operačný program Výskum a vývoj, opatrenie 2.2 Prenos poznatkov a technológií získaných výskumom a vývojom do praxe. Názov projektu „Výskum a vývoj inteligentných nekonvenčných aktuátorov na báze umelých svalov“, ITMS projektu 26220220103.



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ

7 Použitá literatúra

BALARA, M. The upgrade methods of the pneumatic actuator operation ability. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 308, 2013. pp. 63-68.

BORŽÍKOVÁ, J., PITEĽ, J., TÓTHOVÁ, M., ŠULC, B. Dynamic simulation model of PAM based antagonistic actuator. In: *Proceedings of the 2011 12th International Carpathian Control Conference (ICCC 2011)*, 25 – 28 May, 2011, Velké Karlovice, Czech Republic, [CD-ROM]. Danvers: IEEE, 2011. pp. 32 – 35, ISBN 978-1-61284-359-9.

HOŠOVSKÝ, A., NOVÁK-MARCINČIN, J., PITEĽ, J., BORŽÍKOVÁ, J., ŽIDEK, K. Model-based evolution of a fast hybrid fuzzy adaptive controller for a pneumatic muscle actuator. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 9, No. 56, 2012. p. 1-11.

MIŽÁKOVÁ, J., PITEĽ, J., TÓTHOVÁ, M. Pneumatic artificial muscle as actuator in mechatronic system. *Applied mechanics and materials*, Vol. 460, 2014. pp. 81-90.

PITEĽ, J., BALARA, M., BORŽÍKOVÁ, J. Control of the actuator with pneumatic artificial muscles in antagonistic connection. *TRANSACTIONS of the VŠB – TU Ostrava*, No. 2/2007, 2007. pp. 101 – 106, ISSN 1210-0471.

PITEĽ, J., TÓTHOVÁ, M. Dynamic modeling of PAM based actuator using modified Hill's muscle model. In: *14th International Carpathian Control Conference (ICCC 2013)*, 26-29 May, 2013, Rytro, Kraków: IEEE, 2013. pp. 307-310.

TONDU, B., LOPEZ, P. Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators. *IEEE Control Systems Magazine*. Vol. 20, No. 4, 2000, pp. 15-38, ISSN 0272-1708.


TÓTHOVÁ, M., PITEĽ, J. Dynamic model of pneumatic actuator based on advanced geometric muscle model. In: *9th International Conference on Computational Cybernetics (ICCC 2013)*, 8-10 July, 2013, Tihany, Budapest: IEEE, 2013. pp. 83-87.


ŽIDEK, K., ŠEMINSKÝ, J. Automated rehabilitation device based on artificial muscles. In: *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, 23-26 November, 2011. Vienna. Vienna: DAAAM, pp. 1113-1114.

ŽIDEK, K., PITEĽ, J., GALAJDOVÁ, A., FODOR, M. Rehabilitation device construction based on artificial muscle actuators. In: *Proceedings of the 9th IASTED International Conference: Biomedical Engineering BioMed*, 15-17 February, 2012, Innsbruck, Austria, Innsbruck: ACTA Press, 2012. pp. 855-861, ISBN 978-0-88986-909-7.

Správa alarmov v operátorských pracoviskách

URBAN, Patrik¹ & LANDRYOVÁ, Lenka²

¹ Ing.,  Department of Control Systems and Instrumentation,
VSB-TU Ostrava, 17. listopadu, Ostrava - Poruba, 708 33

 patrik.urban@vsb.cz

² Doc., Ing., CSc.,  lenka.landryova@vsb.cz

Abstrakt: Práca pojednáva o správe alarmov na operátorských pracoviskách riadiacich systémov. Zameriava sa na objektovo orientovane technológie a spracovanie zberu dát, konfiguráciu sledovaných veličín a definovanie ich parametrov. Prináša možnosti využívania systémových funkcií na konkrétnych príkladoch aplikácii v prostredí InTouch/Wonderware a 800xA/ABB s dôrazom na užívateľské prostredie operátorov.

Kľúčová slova: ABB, Wonderware, InTouch, SCADA, HMI

1 Technológie COM

COM (Component Object Model) je technológia založená na princípe objektovo orientovaného modelovania, ktorá umožňuje dvom alebo viacerým aplikáciám tzv. komponentom, ľahko spolupracovať medzi sebou aj keď sú vytvorené v rôznych programovacích jazykoch a operačných systémoch.

Technológia je založená na komunikácii server – klient a používa už spomenutú objektovo orientovanú architektúru, ktorej jednej z výhod je „zaobaliť“ funkcie programov do znovu použiteľných programových komponent, čo umožňuje skryť dáta a funkcie objektu.

Objekt je inštancia tried, ktorá je nejaká sada členských funkcií a dát. Komponenta je časť programu v binárnej forme a ako taká musí vyhovovať určitým binárnym štandardom. Tento objekt je možné pripojovať k rôznym aplikáciám alebo iným programovým komponentom. Vzhľadom k zabaleným dátam a funkciám objektu, klienta nezaujímajú ich vnútorná implementácia ale vonkajšie chovanie objektu (napr: poskytované funkcie apod.)

To definuje pre aplikácie COM [Bajgar, 2000].

2 OPC

Predstavuje štandardný spôsob komunikácie v priemysle, umožňujúci sa integrovať do existujúcich obchodných plánov a systémov. Výrobcovia musia byť schopní využívať systémy ako SCADA alebo DCS na realizáciu svojich plánov. K splneniu tejto podmienky je otvorená a efektívna komunikačná architektúra zameraná na prístup k dátam a nie k typu dát.

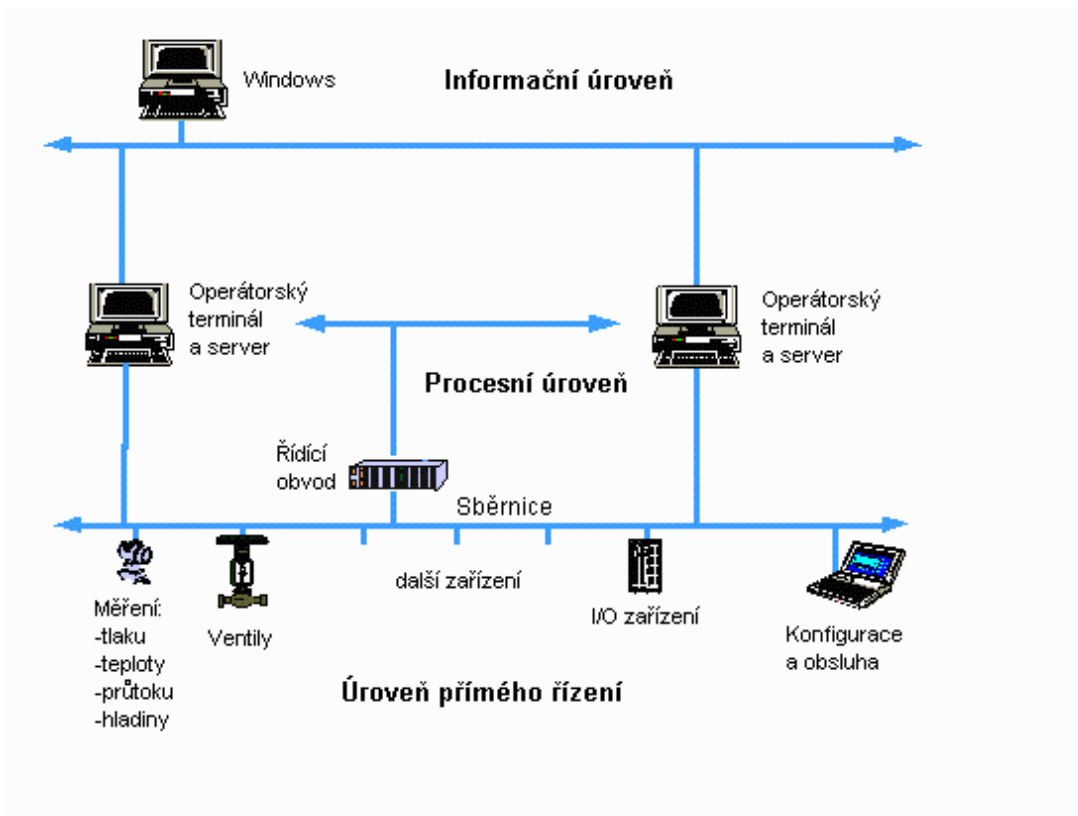
OPC je štandardom pre poskytovateľov hardwaru a vývojármí softwaru. Zabezpečuje mechanizmus pre štandardný transfer dát z hardwarových zariadení do ľubovoľnej klientskej aplikácie. Výrobcovia môžu vďaka tomu vyvinúť opakovane použiteľný, vysoko optimalizovaný server pre komunikáciu svojho softwaru so zdrojom dát (hardwarom riadiacim technologický proces) a definovať mechanizmus na efektívnu výmenu dát medzi softwarom a hardwarom.

Poskytnutím serveru s OPC rozhraním umožnia ľubovoľnému klientovi prístup k ich zariadeniu. Práve preto Microsoft a vyvinul OLE / COM (Object Linking and Embedding / Component Object Model) model, aby dovolil vývojárom využiť softwarové komponenty vo svojich programoch napísaných v inom jazyku. Vývojári podnikových aplikácií tak môžu napísať kód napríklad vo Visual Basicu, ktorý používa dáta priamo z priemyselného hardwaru. Cieľom všetkých špecifikácií je uľahčiť vývoj serverov pre OPC v C/C++ a dať tým vývojárom aplikácií voľnosť pri výbere programovacieho jazyka.

2.1 Hierarchia priemyselného riadenia

Riadenie sa skladá podľa obrázku 1 z nasledujúcich troch úrovní [Bajgar,2000] :

- **Úroveň priameho riadenia** kde sú poskytované informácie z „smart“ inteligentných snímačov alebo zariadení. Tieto informácie poskytujú dáta o zariadeniach, jeho konfiguračných parametroch atd, sú prezentované užívateľovi a využívajúcim aplikáciám.
- **Procesná úroveň**, táto úroveň sú inštalácie distribuovaných riadiacich systémov DSC a SCADA systémov. Systémy slúžia k monitorovaniu, riadeniu vyhodnocovaniu procesov z ktorých sú získavané a môžu byť použité na informačnej úrovni.
- **Informačná úroveň** získava informácie z riadiacich systémov do informačných alebo ekonomických aplikácií. Užívatelia musia byť schopný využiť programové SCADA, databáze textové a tabuľkové procesory v spojení s výrobným systémom.



Obrázok 1 Hierarchia komunikácie v priemyslovom riadení[Bajgar, 2000].

2.2 OPC Alarm and Event Server

Server oznamuje klientom výskyt udalosti alebo alarmovej podmienky . Umožňuje určiť klientom OPC určiť udalosti a podmienky podporovane OPC serverom.

Podmienka je stav OPC Event serveru alebo jedného jej objektu, ktorý je určeným spôsobom zaujímavý pre jeho OPC klienta. Alarm je špeciálnym prípadom podmienky, jeho aktivácia bude splnená prekročením definovaných medzných podmienok.

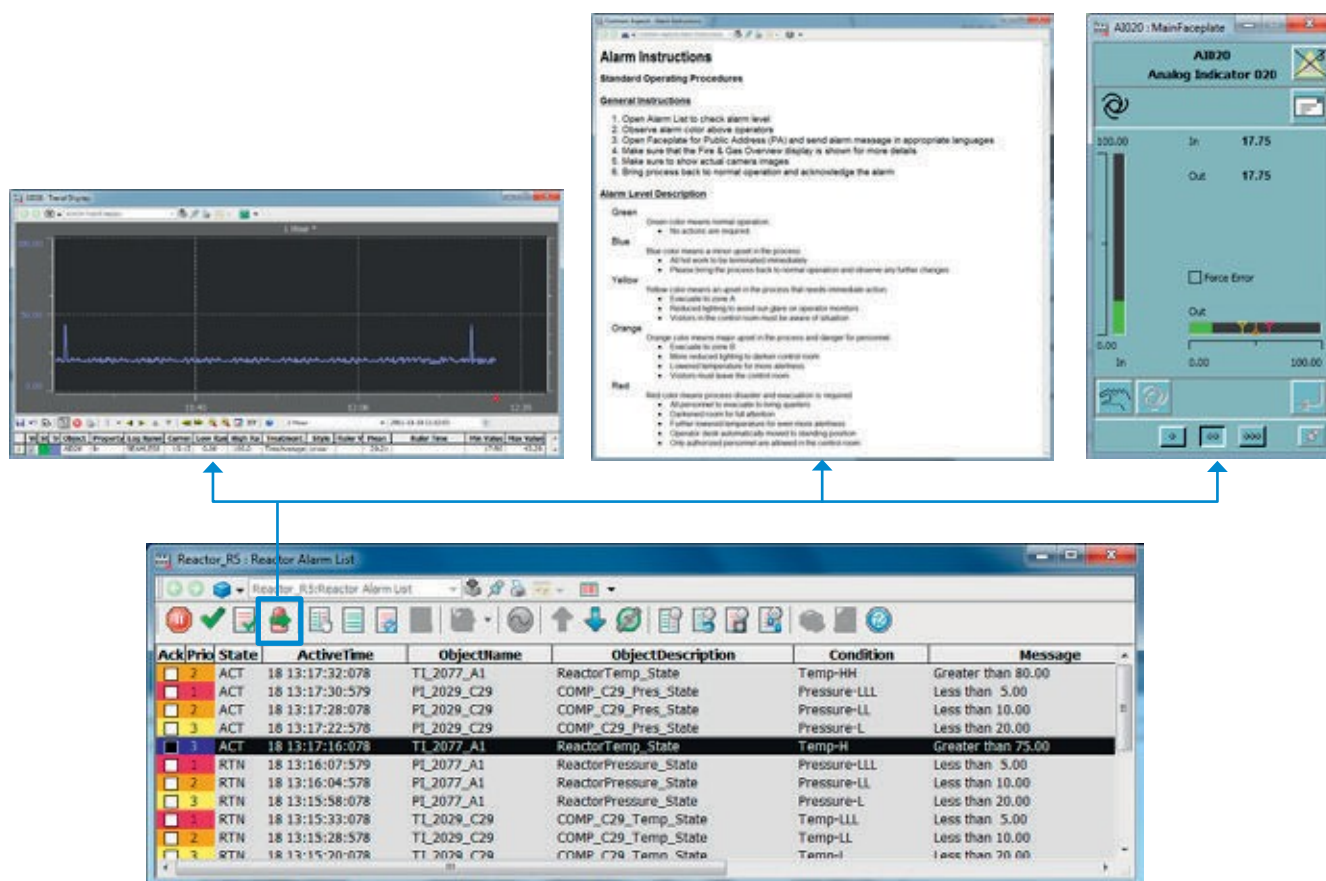
3 Riadiaci systém v ABB

Je postavený na vyššie postavených princípoch a jeho službe. Služba sa inak nazýva „*AfW Service*“ navrhnutá tak, aby bola schopná pracovať nepretržite. Je rozdelená do niekoľkých skupín služieb majúci špecifický rozsah služieb. Každá služba z možnosti redundancie môže obsahovať niekoľko poskytovateľov bežiacich na rôznych serveroch.

Služba poskytuje rozhranie *Aspect Directory* poskytujúce jednoduchú obsluhu s dátami a nenúti klienta sa zaoberať otázkami týkajúcimi sa ako je služba rozdelená. Podporuje pod jedným serverom rászne spustené servery, ktoré zjednocujú prístup k dátam z rôznych zdrojov. Tieto servery poskytujú jedno kompatibilné rozhranie OPC, čím klientske aplikácie nemusia riešiť, ktorý OPC práve beží alebo z ktorého čerpajú dáta.

3.1 Alarmy v 800xA/ABB

System 800xA je riadiaci systém navrhnutý v funkčnej štruktúre rozdelenej pre jednotlivé činnosti, podľa procesných častí (motory, nádrže). To vytvára jednoduchý alarmový list, ktoré sa pridávajú na začiatku funkčných blokov. 800xA automaticky pridá alarm z procesného objektu do špecifickej sekcie v špecifickom alarmovom liste.



Obrázok 2 Zoznam alarmov s nepotvrdením alarmom a komentárom, facepletou, Živou hodnotou[zdroj:ABB.com]

Je to veľmi efektívny a rýchly spôsob z hľadiska nákladov, takisto aj jednoduchšie pre operátorov, ktorí majú možnosť monitorovať svoje „vlastné“ alarmy, nie dlhý netriedený zoznam alarmov. Ak je nový alarm, pridá sa k objektu funkčnej štruktúry automaticky. Operátori môžu sledovať nepotvrdené alarmy zaznamenané v zozname udalostí.

Viditeľná časť systému 800xA zoznamov alarmov obsahuje tiež „Náhľad živých hodnôt“ funkcie, kde sú zobrazené aktuálne hodnoty a parametre, ktoré spustili poplach, príkladom kde môže klesnúť hladina v nádrži pod určitú minimálnu hodnotu. V zozname je možné vidieť aj aktuálnu hodnotu úrovne, ktorá vykonala alarm.

Racionalizáciu obsluhy záťaže pomáha operátorom zvládať stresové situácie dve funkcie systému 800xA: Skrytie alarmu (*Alarm Hiding*), Odložiť na policu (*Alarm Shelving*).

Pri Alarm Shelvingu umožní operátorom rozhodnúť na jak dlho alarm odloží na „policu“. To znamená odstránenie z hlavného zoznamu do zvláštného zoznamu. Operátor sa môže venovať aktuálnym alarmom. Odložené alarmy nie sú ovplyvnené. Tie budú neskôr vyžadovať riešenie operátora.

Alarm Hiding je hlavným cieľom potlačiť alarmy, ktoré sú v očakávaní alebo nie sú v danej situácii relevantné.

Ack	Pri	State	ActiveTime	ObjectName	ObjectDescription	Condition	Message	CurrentValue
<input type="checkbox"/>	2	ACT	18 08:00:52:078	TI_2077_A1	ReactorTemp_State	Temp-HH	Greater than 80.00	95.89
<input type="checkbox"/>	1	ACT	18 08:00:50:578	PI_2029_C29	COMP_C29_Pres_State	Pressure-LLL	Less than 5.00	33.96
<input type="checkbox"/>	2	ACT	18 08:00:48:077	PI_2029_C29	COMP_C29_Pres_State	Pressure-LL	Less than 10.00	33.96
<input type="checkbox"/>	3	ACT	18 08:00:42:578	PI_2029_C29	COMP_C29_Pres_State	Pressure-L	Less than 20.00	33.96
<input type="checkbox"/>	3	ACT	18 08:00:36:078	TI_2077_A1	ReactorTemp_State	Temp-H	Greater than 75.00	95.89
<input type="checkbox"/>	1	RTN	18 07:59:27:577	PI_2077_A1	ReactorPressure_State	Pressure-LLL	Less than 5.00	38.33
<input type="checkbox"/>	2	ACT	18 07:59:24:577	PI_2077_A1	ReactorPressure_State	Pressure-LL	Less than 10.00	38.33
<input type="checkbox"/>	3	ACT	18 07:59:18:078	PI_2077_A1	ReactorPressure_State	Pressure-L	Less than 20.00	38.33
<input type="checkbox"/>	1	RTN	18 07:58:53:078	TI_2029_C29	COMP_C29_Temp_State	Temp-LLL	Less than 5.00	68.41
<input type="checkbox"/>	2	RTN	18 07:58:48:578	TI_2029_C29	COMP_C29_Temp_State	Temp-LL	Less than 10.00	68.41
<input type="checkbox"/>	3	RTN	18 07:58:40:077	TI_2029_C29	COMP_C29_Temp_State	Temp-L	Less than 20.00	68.41
<input type="checkbox"/>	2	RTN	18 07:57:23:578	TI_2029_C29	COMP_C29_Temp_State	Temp-HH	Greater than 80.00	68.41
<input type="checkbox"/>	3	RTN	18 07:57:10:578	TI_2029_C29	COMP_C29_Temp_State	Temp-H	Greater than 75.00	68.41
<input type="checkbox"/>	1	RTN	18 07:55:58:578	TI_2077_A1	ReactorTemp_State	Temp-LLL	Less than 5.00	95.89
<input type="checkbox"/>	2	RTN	18 07:55:49:078	TI_2077_A1	ReactorTemp_State	Temp-LL	Less than 10.00	95.89
<input type="checkbox"/>	3	RTN	18 07:55:32:078	TI_2077_A1	ReactorTemp_State	Temp-L	Less than 20.00	95.89
<input checked="" type="checkbox"/>	1	ACT	15 09:51:43:578	Compressor-Drive	Compressor-Drive	DischargeLow	Compressor-DriveTorgue-Low	
<input checked="" type="checkbox"/>	1	ACT	15 09:51:43:578	Reactor_ByPass	Reactor_ByPass	Red	Reactor_ByPassByPass_Blk	
<input checked="" type="checkbox"/>	1	ACT	15 09:51:43:578	Compressor-Hydraulic	Compressor-Hydraulic	Cavitating	Compressor-HydraulicOil-Press-Low	
<input checked="" type="checkbox"/>	1	ACT	15 09:51:43:578	IsolationSystem	IsolationSystem	Unstable	IsolationSystemHelium_Gas_ON	

Obrázok 3 Zobrazenie alarmov v liste s vyvolaným alarmom a aktuálnou hodnotou [Zdroj: ABB.com]

Zoskupenie alarmov na rozdiel od úkrytu alarmov a odloženia, vytvorenie zoznamov s kľúčovými vlastnosťami, a tým vytvoreniu prehľadnejších zoznamov. Výsledkom alarmov je jeden alarm za celú skupinu alarmového zoznamu.



Obrázok 4 Zobrazenie alarmov v liste s vyvolaným alarmom a aktuálnou hodnotou spolu so zgrupovaným listom [Zdroj: ABB.com]

Toto zoskupenie pomáha operátorom lepšie pochopiť dôsledky určitého poplachu a jeho dopad na proces. V systémoch bez tejto funkcie závisí rozhodnutie a riešenie na znalostiach operátora. Pri niekoľkých procesoch naraz je nutné vyhodnocovať časové nároky a rizika.

Tabulka 1

	Problém	Účinky problému na pracovisku	Príklad výskytu problému
Preťaženie operátora alarmami	Vysoký počet alarmov. Jeden za minútu je neprijateľné. Max 40 alarmov za minútu	Zhoršené rozhodovanie Zvýšený stres operátorov	Texaco Milford Heave Aljaška North Slope Esso explóziu
Jednorazovo zvýšený počet alarmov	Vysoký počet alarmov. Často viac ako 100. Občas viac ako 500.	Nerieš. alarmov v zozname Zvýšený počet chýb	Three Mile Island
Obťažujúce systémové alarmy	Systémové alarmy. Opakované alarmy. Závada na konc. zariadení.	Ignorovaný alarm. Systém Vysoký stres operátorov. Špatné podmien. v riad. miest	BP prudhoe Bay Maryland rail Accident
Zle navrhnuté alarmy	Vysoký počet alarmov s vysokou prioritou. Nerozliš. bezp. alarmy	Operátory reagujú na nevhodné alarmy	BP Texax city explosion Helios
Špatná správa alarmov	Nevhodné zakázané alarmy. Ignorované alarmy. Neriešené chybné alarmy	Odstránenie ochr. Vrstvy Bezpečne Ekologicky Ekonomicky	BP Texax city explosion Maryland Rail Accident

4 Operátorské prostredie InTouch

Pre každú premennú je možné definovať jeden alebo viac alarmov rôznych tried a typov. Nastavený alarm ma priradenú určitú prioritu. Tá vyjadruje závažnosť alarmu a má rozsah 1 – 999 (Kritický – informatívny). Pomocou rozsahu je možné filtrovať vytvorené alarmy, pracovať v skriptoch a animáciách. Takisto ako v ABB 800xA je možné vytvoriť skupiny alarmov a alarmové listy.

Je možné konfigurovať alarmy pre nasledujúce premenné:

- **Logický :**

Možnosť voľby umožňuje zvoliť, či alarm bude splnený pri hodnote TRUE alebo FALSE a nastaveniu priority.



Obrázok 5 Nastavenie alarmu pre Logickú premennú[InTouch]

- **Analógový**

Je ho možné definovať ako celočíselný typu INT alebo s desatinou čiarkou typu (REAL).
Pre analógový typ alarmu existuje niekoľko tried:

- *Hodnotový*

Aktuálna prijatá hodnota sa porovná s nastavenými limitami, pri prekročení nastaveného limitu je vyhlásený alarmový stav.

- *Odchýlkový*

Hodnota sa odčíta od nastavenej hodnoty a absolútna hodnota vypočítaného rozdielu sa porovná s jedným alebo dvoma limitnými hodnotami vyjadrenými ako percentom rozsahu hodnoty premennej.

Pri nich je možné nastaviť priority k limitu:

- „Minor Devation“ – Menej závažná odchýlka.
- „Major Devation“ – Závažná odchýlka.
- „Deviaton Deadband“ – Pásmo necitlivosti

- *Rýchlosť zmeny*

Výpočet započítava aktuálnu hodnotu a predchádzajúcu hodnotu v aktuálnom čase a čase predchádzajúcej aktualizácie.

Obrázok 7 Analógový alarm[InTouch]

Alarm je vyhlásený pokiaľ absolútna hodnota rýchlosti zmeny prekročí stanovený limit. Limity a priority je možné nastaviť.

4.1 Riadenie vzniku a viditeľnosti alarmu

Pri aktivovanom alarme je občas vhodné a neodkladné niektoré alarmy vypnúť. V programe InTouch sa dá alarm:

- **Deaktivovať**, zmenou atribútu premennej a v databázy už nie je potrebné prevádzať žiadne zmeny. Splnená podmienka neprevedie premennú do alarmové stavu
- **Potlačiť vznik alarmu**, premennej ktorá vykonala alarm je možné vyhradiť vyhradenú premennú, ktorej hodnota môže potlačiť vznik alarmu a jej názov je inhibitor. Dej prebieha v dvoch fázach:

- Priradenie inhibitoru alarmovateľnej premennej
 - Zmena stavu inhibitoru FALSE na TRUE
- **Potlačiť zobrazenie alarmu**, ide aplikovať u jedného alebo viac alarmov špecifických vylučovacích kritérií. Pri ich splnení nebude alarm pre spotrebiteľa viditeľný.

InTouch umožňuje deaktivovať a aktivovať všetky alarmy a premenné naraz. Pri jednotlivých alarmových substavoch sa dá jednotlivý substav deaktivovať jednotlivivo. Analógové hodnoty môžu mať napr. Hi – Level aktívny a HiHi – Level deaktivovaný.

To isté platí aj pri deaktivácii a inhibitor môže byť použitý pre jednotlivé substavy. Pri akomkoľvek prechodu zo stavu aktívne potlačený do stavu nepotlačený je okamžite vyvolaná alarmová logika pre vyhodnotenie alarmového stavu.

5 Záver

Spracováva porovnanie vyhodnocovania alarmov v riadiacom systéme od ABB a operátorskom systéme InTouch/Wondervare. V nich sa zobrazujú signály inak nazvané *tagy* nesúce pod jedným názvom niekoľko rôznych dátových signálov. Pod tagom môže byť ukrytá aktuálna hodnota veličiny, ovládacie veličiny a nastavovanie stavov pre manuálne a automatické režimy. Alarmy sú zobrazované, podľa toho či dôjde k prekročeniu nastavených medzi a limitov. Kde je výhodou sprava alarmov pri ABB v podobe Alarm Hiddingu a Alarm Shelvingu.

Aktuálnym veličinám sú priradené medze a limity pri ktorých keď dôjde k prekročeniu tak je vyvolaný alarm, pri ktorých dochádza k vytváraniu záťaže pre operátorov vid. Tabulka 1, pre ktoré môžeme od ABB použiť napr. 2 metódy spracovania.

6 Použitá literatúra


Bajgar, D. Správa alarmových udalostí s využitím objektové technológie OPC. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2000. 62 stran. Diplomová práce, vedoucí: Landryová, L.

Inside ABB.com <http://www.abb.com/blog/gad00540/3F0E.aspx>

Interná dokumentácia InTouch

Priama a inverzná úloha kinematiky na riadenie PKŠ

VAJSÁBEL, Michal¹ & GRÚBEROVÁ, Michaela² & BARBOLYAS, Boris³ & BARTALSKÝ Lukáš⁴

¹ Ing.,  STU v Bratislave, Strojnícka fakulta, Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava SR,

 e-mail michal.vajsabel@stuba.sk  URL www.sjf.stuba.sk

² Ing.,  miachaela.gruberova@stuba.sk  e-mail,  URL www.sjf.stuba.sk

³ Ing.,  boris.barbolyas@stuba.sk  e-mail,  URL www.sjf.stuba.sk

³ Ing.,  lukas.bartalsky@stuba.sk  e-mail,  URL www.sjf.stuba.sk

Abstrakt: V kinematike priestorových robotov alebo manipulátorov sa riešia dva základné problémy. Prvým problémom je tzv. priama úloha kinematiky, to znamená, že poznáme zovšeobecnené súradnice a hľadáme polohu a orientáciu koncového bodu efektoru. Tento problém sa pomerne ľahko rieši, pokiaľ použijeme trigonometrické vzťahy pre daný typ robotu. V prípade opačného problému je táto úloha zložitejšia. Vtedy poznáme polohu a orientáciu koncového bodu a hľadáme zovšeobecnené súradnice koncového bodu efektoru.

V súčasnej dobe poznáme viacero druhov KŠ. Sú to sériová kinematická štruktúra, paralelná kinematická štruktúra a hybridná kinematická štruktúra. U sériovej kinematickej štruktúry sa priama kinematická úloha vytvára výsledným pohybom, kdeže je tu možnosť rotácie na všetkých súradnicových osiach. Naproti tomu pri paralelnej kinematickej štruktúre je to zložitejšie, kdeže tu nie je rotácia u všetkých súradnicových osiach, ale len u dvoch a posun v smere osi Z. Predkladaný článok opisuje možnosti riadenia robotov prostredníctvom priamej a inverznej úlohy kinematiky.

Keľúčové slova: Tricept, paralelná kinematická štruktúra, priama úloha kinematiky, inverzná úloha kinematiky

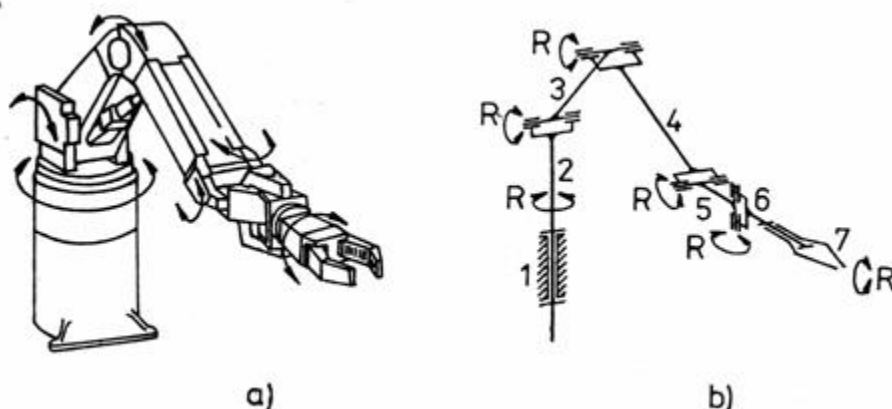
1 Úvod

Súčasné obrábacie stroje sú pomerne konzervatívne k možnostiam využitia strojov s paralelnou kinematickou štruktúrou. No nové konštrukčné usporiadanie strojov už opúšťajú koncepciu sériového usporiadania prvkov. Motiváciou je vytvorenie pohybovej kinematiky, ktorá by bola ľahšia a vykazovala by aspoň porovnateľné statické tuhosti ako sériová kinematika a mala by vyššie dynamické tuhosti. Táto cesta poukazuje na efektívnejšie využitie materiálu, ktorá je u paralelnej kinematiky.

2 Kinematické štruktúry

Kinematické štruktúry sa delia na sériové, paralelné a hybridné. Majú za úlohu vykonávať určitý predpísaný pohyb resp. predpísanú operáciu. Sú spojené do jedného veľkého celku a môžu vykonávať pohyb buď translačný alebo rotačný.

Najčastejšie používaná štruktúra je sériová kinematická štruktúra (pozri obr. 1), ktorá je používaná u priemyselných strojov resp. manipulátorov. Jej hlavnou výhodou je, že využíva kinematické dvojice vždy len v jednom stupni voľnosti. Ide o otvorenú kinematickú štruktúru čo znamená, že jednotlivé prvky sú za sebou postupne spojené. Výsledný pohyb je pohybom všetkých predošlých kinematických dvojíc. Pri týchto štruktúrach sa používajú tri posuvné osi, ktoré sú na seba kolmé (X, Y, Z). Pri pohybe takéhoto stroja nesmie byť ovplyvňovaná pracovná a geometrická presnosť.



Obrázok 1 – Kinematická štruktúra sériových mechanizmov [11]

a) sériový mechanizmus b) kinematické prvky

Výhody sériových kinematických štruktúr:

- množstvo skúseností v oblasti návrhu a výroby strojov
- jednoduché riadenie
- sériovo vyrábané
- nízka nákupná cena

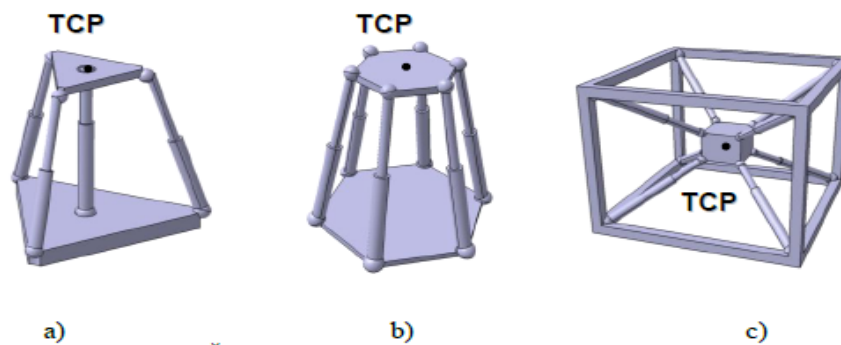
Nevýhody sériových kinematických štruktúr:

- nízka tuhosť (statické aj dynamické kmitanie)
- ohybové zaťaženie stroja
- veľké pohybujúce sa časti
- obmedzená dynamika osí

- sčítavanie chýb v jednotlivých osiach, obmedzená dynamika
- vysoké požiadavky na presnosť vyrábaných dielcov
- chyba sa prejaví na koncovom člene po sčítaní všetkých chýb

Presnosť polohovania rádovo v desatinách milimetra.

V poslednom období sa začala uplatňovať konštrukcia, ktorá uplatňovala pôvodnú myšlienku uložiť stroj na platformu, ktorá je zavesená na diaľkovo premenlivých a kĺbovo uchytených teleskopických tyčiach (ramien). Pomocou týchto teleskopických tyčí (ramien) je možné orientovať platformu k požadovanej operácii. Tieto reťazce podporujú koncový efektor. Počet pohonov je rovnaký ako počet stupňov voľnosti. Paralelná kinematická štruktúra (pozri obr. 2) je uzavretý kinematický reťazec. [2]



Obrázok 2 – Typy paralelných kinematických štruktúr 3D [2]

a) Tripod, b) Hexapod, c) Oktapod

Výhody paralelných kinematických štruktúr:

- malá hmotnosť pohybujúcich sa častí
- vysoká tuhosť konštrukcie
- ťahové a tlakové zaťaženie tyčí a stojanov
- vysoké pracovné rýchlosti
- vysoká presnosť
- opakovateľnosť jednotlivých častí v rámci stroja
- malá hmotnosť pohybujúcich sa častí

Nevýhody paralelných kinematických štruktúr:

- zložité riadenie lineárnych pohonov
- malý pracovný priestor pre výmenu nástroja
- náročný merací systém

- obmedzená orientačná pohyblivosť pri výmene nástroja
- veľké dĺžky teleskopických tyčí sú namáhané tepelne
- zlý pomer medzi zastavanou plochou stroja a pracovným priestorom

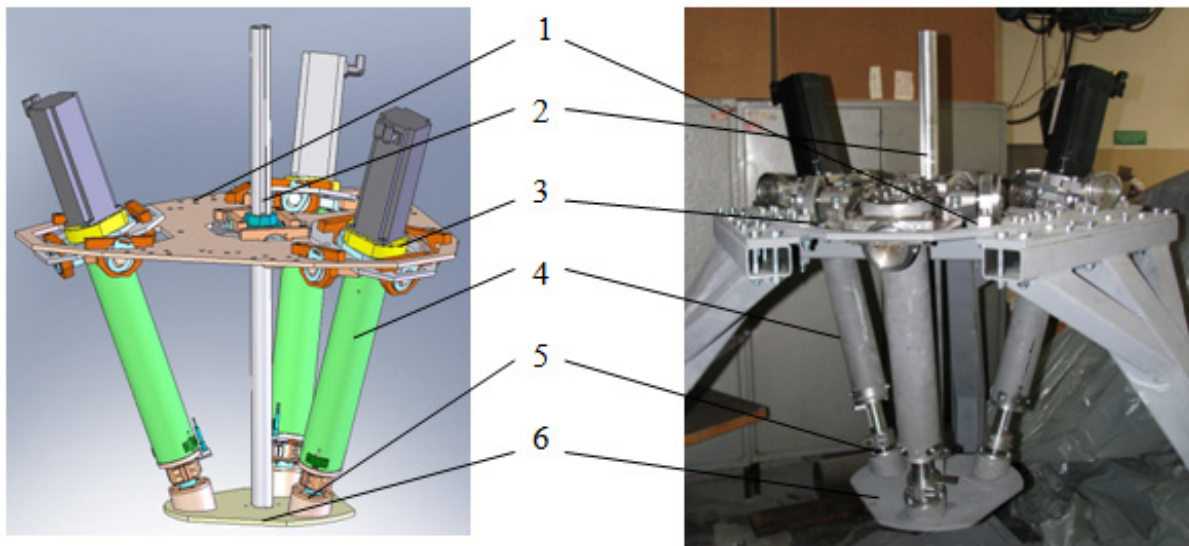
Hybridné kinematické štruktúry (pozri obr. 3) sú kombináciou sériových a paralelných kinematických štruktúr. Prinášajú nové možnosti pri konštrukcii a umožňujú zlepšovať charakteristiky paralelných kinematických štruktúr. Existuje veľké množstvo koncepcií a konštrukcií strojov, ktoré sú používané v priemysle na vysoko rýchlostné obrábanie, zváranie, plazmové rezanie, meranie, kontrolu a manipuláciu. [2]



Obrázok 3 – Hybridná kinematická štruktúra Tricept 805 [2]

3 PKŠ typu Tricept na STU

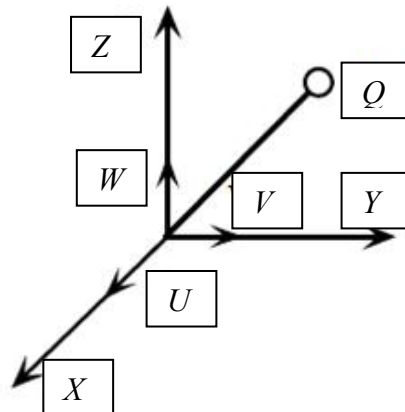
Najznámejšia PKŠ je Tricept. Z kinematického hľadiska je Tricept pevná platforma (pozri obr. 4), spojená s pohyblivou platformou pomocou troch teleskopických tyčí (ramien) a jednou centrálnou tyčou, ktorá umožní translačný pohyb bez možnosti pootočenia. Spojenie teleskopických tyčí je zabezpečené na pevnej platforme primárnym kĺbom a na pohyblivej platforme sekundárnym kĺbom. Na konci centrálnej tyče je pripevnený efektor čo môže byť nástroj alebo technologická hlavica. Motor, ktorý je umiestnený na každej teleskopической tyči (ramena) umožňuje zmenu dĺžky pomocou guľôčkovej skrutky a matice. Tricept je navrhnutý tak, aby jeho primárne kĺby umiestnené na nepohyblivej platforme dovolili natočenie teleskopických tyčí minimálne o 45°. Nosná konštrukcia sa napája na nepohyblivú platformu v miestach s predpokladaným najväčším namáhaním. Nosná konštrukcia a pevná platforma vytvárajú jeden kinematický reťazec.



Obrázok 4 – Tricept na STU: 1-pevná platforma, 2-centrálna tyč, 3-primárny kĺb, 4-teleskopická tyč, 5-sekundárny kĺb, 6-pohyblivá platforma [9]

4 Matice otočenia PKŠ

Prvá úloha, ktorá sa rieši je priama úloha kinematiky. Jej základnou podmienkou je určenie vzájomnej polohy (pozri obr. 5) a pohybov v súradnicových systémoch.



Obrázok 5 – Súradnicový systém X,Y,Z a U,V,W [11]

Súradnicový systém X,Y,Z je zafixovaný v priestore. Súradnicový systém U,V,W je spojený s telesom a otáča sa s ním okolo osi X,Y,Z . Bod Q môžeme definovať v ľubovoľnom súradnicovom systéme.

$$Q_{UVW} = (Q_U, Q_V, Q_W)^T, \quad (1)$$

$$Q_{XYZ} = (Q_X, Q_Y, Q_Z)^T, \quad (2)$$

kde je $Q_{(XYZ)}$ – karteziánsky súradnicový systém,

$Q_{(UVW)}$ – súradnicový systém bodu Q .

Základná úloha je otočenie systému U, V, W okolo osí základného systému X, Y, Z , kde vznikajú matice elementárnych otočení $R_{X\alpha}$, $R_{Y\beta}$, $R_{Z\gamma}$.

Otočenie o uhol α okolo osi X reprezentuje matica $R_{X\alpha}$

$$R_{X\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Otočenie o uhol β okolo osi Y reprezentuje matica $R_{Y\beta}$

$$R_{Y\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

V našom prípade nie je otočenie v osi Z len posun, preto výsledná matica bude vyzerat' nasledovne.

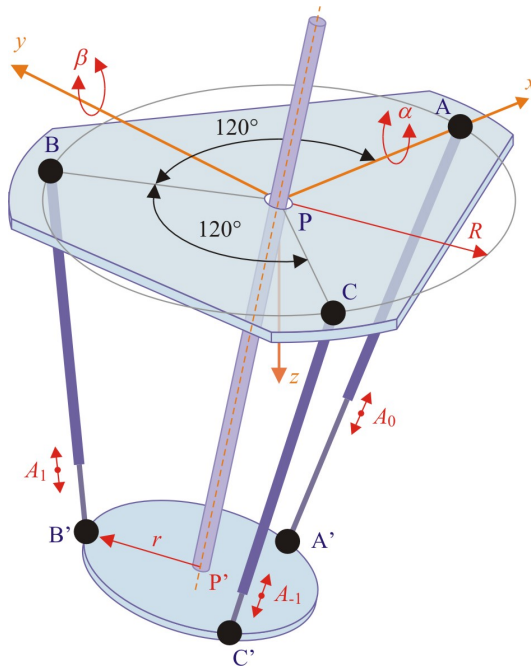
$$R_Z = \vec{q} + \vec{e}_3, \quad (5)$$

Zložitejšie otáčanie nastáva vtedy, keď sa vynásobia dve príslušné matice. Pričom je nutné dodržanie postupnosti násobenia matíc. Súradnicový systém U, V, W sa môže otáčať aj okolo vlastných osí, pričom tu platia určité pravidlá: [11, 12]

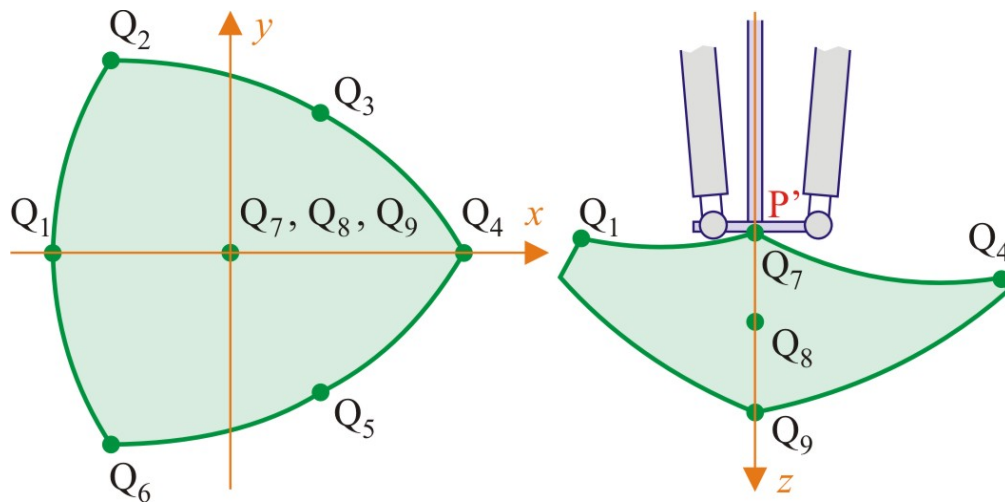
- na začiatku sú rovnaké oba systémy,
- ak sa systém U, V, W otočí okolo niektorej osi X, Y, Z násobí sa výsledná matica predchádzajúceho pohybu zľava danou odpovedajúcou maticou pohybu,
- ak sa vykoná pohyb okolo súradnicovej osi U, V, W , tak sa bude násobiť sprava zodpovedajúcou príslušnou maticou.

5 Rovnice Triceptu

Pohyb KPŠ Triceptu sa bude považovať ako pohyb referenčného bodu (efektora) po naprogramovanej dráhe. Týchto bodov bude dostatočný počet, aby ležali dostatočne blízko vedľa seba a dali sa aproximovať priamkou (pozri obr. 6). Zvolí sa nový bod (referenčný), ktorý označíme ako bod q a tento bod bude spojený s pohyblivou platformou. pri pohybe tohto bodu sa budú počítať jednotlivé predĺženia jednotlivých teleskopických tyčí.



Obrázok 6 – Umiestnenie jednotlivých teleskopických tyčí na pevnej a pohyblivej platforme [10]



Obrázok 7 – Pracovný priestor triceptu [10]

Začiatok pohybu referenčného bodu q s určenými súradnicami $[q_x, q_y, q_z]$, pričom natočenie po všetkých súradnicových osiach X a Y sú nulové (pozri obr. 7) a súčasne je nulový aj posun po súradnicovej osi Z . Stanový sa koncový bod Q do ktorého sa máme dostať po naplánovanej trajektórii. Tento nový bod má svoje súradnice $[Q_x, Q_y, Q_z]$. Všetky natočenia sú popísané jednotlivými prvkami otočenia pomocou transformácie závislej od uhla natočenia. Otočenie okolo osi X o uhol α je dané maticou $O_x(\alpha)$ a natočenie okolo osi Y je dané maticou $O_y(\beta)$, pričom posun súradnicovej osi Z je dané ako vektor posunu $(\vec{q} + z\vec{e}_3)$.

Maticový zápis pre náš prípad:

$$\vec{Q} = O_y(\beta)O_x(\alpha)(\vec{q} + z\vec{e}_3), \quad (6)$$

Rozpísaný tvar v maticovom tvare:

$$\begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z + z \end{pmatrix}, \quad (7)$$

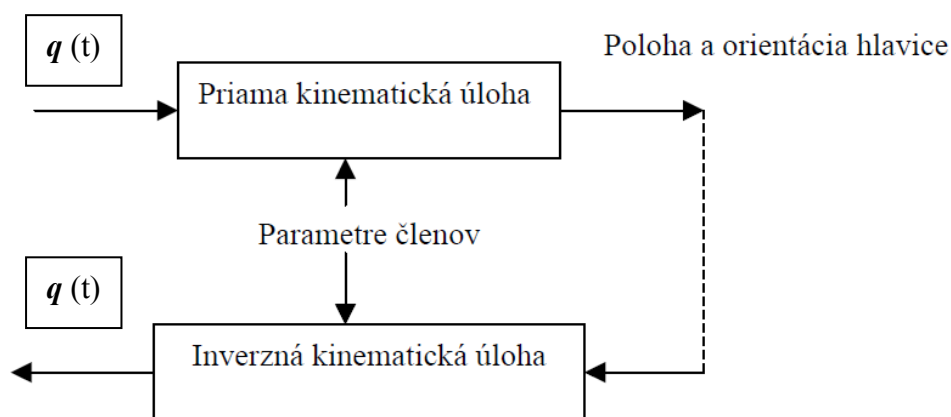
6 Kinematika

Kinematika je časť mechaniky, ktorá skúma pohyb telies a bodov. V kinematických úlohách sa zvyčajne pracuje s nehmotnými bodmi, alebo nehmotnými telesami, ktoré majú geometrickú vlastnosť. V kinematike sa neprihliada na príčiny pohybu, neskúma sa v nej silové pôsobenie. Predmet skúmania kinematiky je:

- poloha
- dráha
- charakteristiky dráh (stred krivosti)
- rýchlosť
- zrýchlenie (kladné, záporné)
- uhlová rýchlosť
- uhlové zrýchlenie

Kinematika sa zaoberá analýzou a syntézou (návrhom) pohybujúcich sa mechanizmov.

Rozloženie členov a zmeny konfigurácie systému v priestore jeho pohybu vyžadujú riešiť geometrické, kinematické (pozri obr. 8) a dynamické charakteristiky. Najčastejšie sa používa na opis úloh maticové vyjadrenie. Názornosť vyplýva z geometrickej interpretácie matice ako transformácie vektorov opisujúcich polohu bodu v priestore. [11]



Obrázok 8 – Priama a inverzná kinematická úloha [11]

$q(t)$ – vektor kľbových premenných

Úlohou kinematiky je popisovanie ako sa teleso, alebo sústava telies správa bez ohľadu na sily a vznikajúce momenty, ktoré môžu vyvolať pohyb. Pre mechanizmy, ktoré využívajú paralelnú kinematiku je tento proces zložitý. Problémom hľadania je ako vplývajú všetky kinematické reťazce na polohu koncového bodu (efektora).

Predmetom kinematickej analýzy je odvodenie relatívneho pohybu medzi rôznymi členmi mechanizmu. Existuje priama a nepriama (inverzná) úloha kinematiky.

Priama úloha kinematiky

Priamou kinematickou metódou sa rozumie (pozri obr. 9), že poznáme základné znalosti o kĺbových súradniciach (natočenie, posuv). Hľadá sa poloha koncového bodu efektora. Priama úloha kinematiky sa môže zapísať ako $x = f(\theta)$. Paralelná kinematika je zložitejšia vzhľadom na nelineárne riešenie problému. [12, 13]



Obrázok 9 – Priama úloha kinematiky

Inverzná úloha kinematiky

Inverznou kinematickou metódou sa rozumie (pozri obr. 10), že poznáme polohu koncového bodu efektora. Následnými výpočtami dostaneme potrebné posunutia resp. natočenia. Inverzná úloha kinematiky sa môže zapísať ako $\theta = f^{-1}(x)$. Pre mechanizmy využívajúce paralelnú kinematiku sa stanoví výpočet pomocou transformačných matic, alebo geometrickými metódami. Úloha je zložitejšia než priama úloha kinematiky a môže mať viac riešení. [12, 13]



Obrázok 10 – Inverzná úloha kinematiky

7 Záver

Predkladaný príspevok popisuje teoretické hľadanie priamej a inverznej úlohy kinematiky. Priame overenie prebehne priamo na Tricepte, ktorý sa nachádza na STU v Bratislave. Po odstránení chýb, ktoré má Tricept, prebehne naprogramovanie kinematiky, ktorá bude riešená v programovom prostredí Matlab. V programe bude navrhnutá naša PKŠ typu Tricept a bude porovnaná teoretická kinematika s kinematikou priamo na Tricepte. Na koniec budú zistené nepresnosti sústavy stroja, ktoré sa zahrnú do celkovej neistoty.

Pod'akovanie



Tento článok vznikol v rámci výskumnej úlohy podporovanej Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky VEGA 1/0584/12.

8 Použitá literatúra

- [1] MAREK, J. a kolektív. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Praha: MM publishing, 2010, ISBN 978-80-254-7980-3
- [2] POPPEOVÁ, V., BULEJ, F. a SVĚTLÁ, J. Sériové, paralelné a hybridné kinematické štruktúry výrobných strojov a robotov. The 13th International Scientific Conference, 2010
- [3] SICILIANO, B. Inverse kinematics, manipulatory analysis and closed-loop direct kinematics algorithm. Napoli, 1999
- [4] SKAŘUPA, J. a MOSTÝN, V. Teorie průmyslových robotů. Viena Košice, 2000, ISBN 80-88922-35-6
- [5] ZHANG, D., Parallel robotic machine tools. Canada, 2010, ISBN 978-1-4419-1116-2
- [6] KOPECKÝ, M., KOMPIŠ, V. a ŠVORČÍK, S. Kinematika, Praha: Nakladatelství dopravy a strojů, 1990, ISBN 80-7100-031-0
- [7] KOLLÁTH L., HALAJ M., KUREKOVÁ E., "Positioning accuracy of non-conventional production machines," IMEKO. Portugal, pp. 2099-2102, September 2009 [19th World Congress. Fundamental and Applied Metrology. Lisbon].
- [8] KOLLÁTH L., MARTIŠOVITŠ I., OMACHELOVÁ M. "Solving the problems of workspace in parallel kinematic structure," ERIN. Slovakia, pp. 15-17, May 2013. [7th international conference for young researchers and Ph.D. students].
- [9] OMACHELOVÁ M., MARTIŠOVITŠ I., KUREKOVÁ E., KOLLÁTH L., "Analytical expression of the lengths of tricept telescopic rods ejection," Czech republic, pp. 45-50, April 2013 [37th seminar ASR, Instruments and Control, Ostrava].
- [10] OMACHELOVÁ M., KUREKOVÁ E., HALAJ M., MARTIŠOVITŠ I., Theoretical aspects of control of the tricept type parallel kinematic structure. Czech republic, MAY 2014, <http://www.icc-conf.cz/conference/iccc2014/>
- [11] JURÍŠICA, L. - HUBINSKÝ, P. - KARDOŠ, J. Robotika, Bratislava: STU v Bratislave, 2005, <https://www.sjf.tuke.sk/seminsky/IVS/skripta.pdf>
- [12] BOŽEK P. A KOLEKTÍV AUTOROV, Špecializované robotické systémy, Ámos, 2011, ISBN 978-80-904766-8-4,
http://www.uiam.mtf.stuba.sk/predmety/srs/1-Ucebica/#_Toc310244208
- [13] CINTULA, L. Simulační modelování paralelných mechanismů, Brno, 2012, Diplomová práca

Kalman Filter for Signal Processing and Navigation

VASILEV, Andrey¹

¹ Ing.,  Katedra ATR-352, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu, Ostrava – Poruba, 708 33,
 andrey.vasilev.st@vsb.cz

Abstract: *The paper deals with the use of the Kalman filter for reducing the measurement error in experimental data. The filter algorithm was created in the MATLAB environment. It was analyzed how to setup the filter parameters and the initial guess of the state variable and the covariance matrix, including its effect on the result of filtration. There were solved three problems. The filtration of random constants is the first one. The further problem solves the calculation of velocity based on the track coordinate which are recorded by GPS. The last problem deals with reduction of the measurement error of a ramp function.*

Keywords: *Kalman filter, position, velocity, parameter setting, navigation data*

1 Introduction

Filters are tools for processing signals that carry information. Signals partially degraded by noise or distortion. Signal can be analogue or digital. For example analogue signal carried by electrical voltage or current.

Nowadays, filters are used all around us. For example signal processing and conversion of audio recording to electromagnetic waves. These electromagnetic waves are then spreading into ambient space. Where after some time they are received, but they are distorted by the environment (noise). Then there is a need to obtain original audio signal. For this task filter is used. Filters are also being applied in many other areas of human services and industry, such as medicine, exploration of space, economy, telecommunication, etc.

Focus of the paper is practical application of Kalman filter, primarily for processing of navigation data and suppression of noise in measured data. Kalman filter is a recursive filter. Filtering algorithm enables us to calculate estimate of the process and the covariance matrix of estimation error of state.

Among most commonly used is application of Kalman filter for global positioning system (GPS) and inertial navigation system (INS). Global positioning system enables to a system of satellites orbiting the earth to specify and calculate the distance of the receiver from reference points (satellites, relay stations). GPS allows measuring the position of receiver with accuracy tens of meters for conventional use and centimetres or millimetres for scientific use. INS tracks changes tracks changes of position or velocity of observed object. Tracking is dependant on provided initial parameters.

Use of Kalman filter to determine position using mentioned methods of navigation is subject to inaccuracies that may occur during the measurement. For example, the INS utilizes a gyroscope or an accelerometer to monitor changes in the motion of observed object. Accelerometer measurements can be affected by mechanical failure in the system. Another disturbance for measurement could be vibrations caused by the movement over uneven surfaces.

2 Kalman filter

Kalman filter eliminates random noise from the measurement. Useful component of the signal is preserved so that its rate of change is described in a model which is an integral component of the Kalman filter. Current frequency filter does not have this property, as it is unable to tell what noise is and what belongs to the useful information. Random measurement error is assumed as type of white noise and useful component can be both random and deterministic.

Model development process must be known in advance as well as measurement error variance and development sources of randomness for random variables. Kalman filter processes measured value. The result of processing is comparison of estimated and measured values, after comparison more accurate value is used. Kalman filter assumes that the measurement of process is described by two equations in the form of models, model of process dynamic properties [1] and measurement model [2]. In both equations there are random variables of white noise type with normal probability distribution that are independent of one another.

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{v}_1(k), \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}_2(k), \quad (2)$$

Normal distribution:

$$p(\mathbf{v}_1) \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{Q}(k)), \quad (3)$$

$$E\{\mathbf{v}_1(n)\mathbf{v}_1^T(k)\} = \begin{cases} \mathbf{Q}(n), & n = k \\ \mathbf{0}, & n \neq k \end{cases}, \quad (4)$$

$$p(\mathbf{v}_2) \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{R}(k)), \quad (5)$$

$$E\{\mathbf{v}_2(n)\mathbf{v}_2^T(k)\} = \begin{cases} \mathbf{R}(n), & n = k \\ \mathbf{0}, & n \neq k \end{cases}, \quad (6)$$

$$E\{\mathbf{v}_1(n)\mathbf{v}_2^T(k)\} = \mathbf{0} \quad \text{for all } n \text{ and } k, \quad (7)$$

where **A** – state transition model,
B – control-input model,
H – observation model,
Q – measurement noise covariance,
R – process noise covariance,
u – control vector,
v₁ – process noise,
v₂ – measurement noise,
x – state vector,
y – observation vector,
k – index,
p – normal probability distribution.

Kalman filtering is performed in two phases (steps), which are called prediction and correction, for prediction it is not necessary to know the new measurement. The prediction is calculated only on the basis of the preceding data. Correction of prediction is performed until the outcome of the new measurement is known. Filter is recursive and therefore estimation of state variables and estimate of error covariance matrix gradually rises.

3 Implementation of Kalman filter in Matlab/M-file

The algorithm of the Kalman filter is a complex programmable matrix calculation, especially for higher orders except the first. However, this is an effective tool for predicting system behavior provided knowledge of dynamic properties of that system. Filtration can be used on already measured data and filter out the expected process and measurement noise. Process noise is generated by the system and measurement noise is caused by measuring device eventually by measuring method. The algorithm, although at the beginning of the measurement filters relatively imprecisely, with increasing number of samples refines its estimate of monitored variable. Rate of velocity change and the limitation of excessive increase of velocity due to the effects caused by referred noise are also affecting limits of Kalman gain. Gain calculation is based on knowledge of the system dynamic properties and the probable dispersion of values. Dispersion of the monitored variables depends on its last known location for the considered calculation interval (for continuous signal) or calculation step (for digital signal).

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) = \mathbf{A}(k) \cdot \hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) + \mathbf{B}(k) \cdot \mathbf{u}(k), \quad (8)$$

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{A}(k) \cdot \mathbf{P}(k-1|k-1) \cdot \mathbf{A}^T(k) + \mathbf{Q}(k), \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}^-(k) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k) \cdot \hat{\mathbf{x}}(k|k-1), \quad (10)$$

$$\mathbf{S}(k) = \text{cov}(\tilde{\mathbf{y}}^-(k)) = \mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{P}(k|k-1) \cdot \mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k), \quad (11)$$

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k|k-1) \cdot \mathbf{H}^T(k) \cdot \mathbf{S}^{-1}(k), \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k) = \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{K}(k) \cdot \tilde{\mathbf{y}}^-(k), \quad (13)$$

$$\mathbf{P}(k|k) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \cdot \mathbf{H}(k)) \cdot \mathbf{P}(k|k-1), \quad (14)$$

- where **K** – Kalman gain,
P – distribution covariance matrix,
H – observation model,
Q – measurement noise covariance,
R – process noise covariance,
u – control vector,
x – state vector,
y – observation vector,
k – index,
p – normal probability distribution.

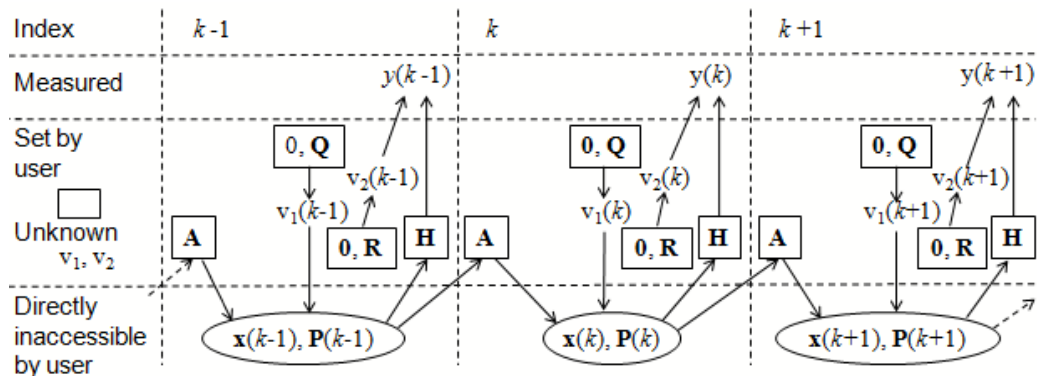


Figure 1 – Simplified development of state variables and matrices in time (steps)

4 Choice of estimated parameters

Considered known parameters and models could be derived from task at hand. Models of observing and state transition model for example. Initial conditions or values of state variables could be known or could be estimated.

Matrices of error covariance describe possible alteration made on observed signal by errors. Effect of noise is said to be independent of one another. That means considered set components of matrix are positioned on main diagonal. Measuring noise can be estimated in advance or be found in datasheet of used sensor. Mentioned effects of estimation are shown on Figure 2.

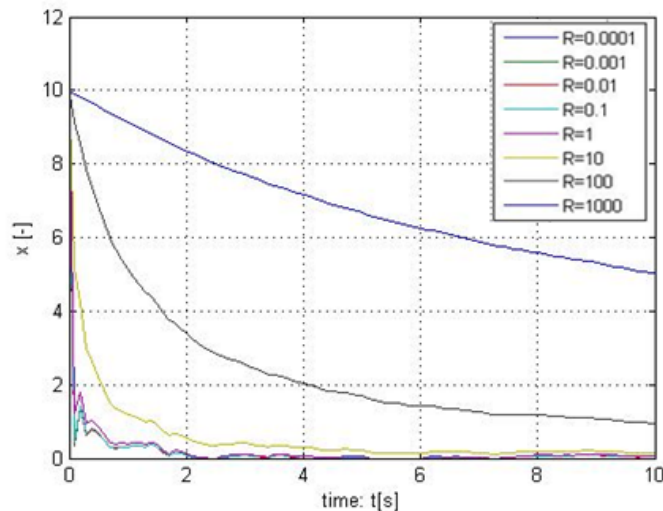


Figure 2 – Effect of measurement noise on filtration of random constant

Estimation should be made for one tenth of measured range otherwise time of reaching final Kalman gain would be prolonged. Filtered constant was set as zero. Measured range was defined by initial value of state variable. In this case initial value of state variable was 10.

Only with adequate knowledge of system function it is possible to make estimation of process noise. It is possible to make estimation from observations of real life behaviour of system. It is also possible to set to which degree estimated process noise would the data. Mentioned effects of estimation are shown on Figure 3 and Figure 4.

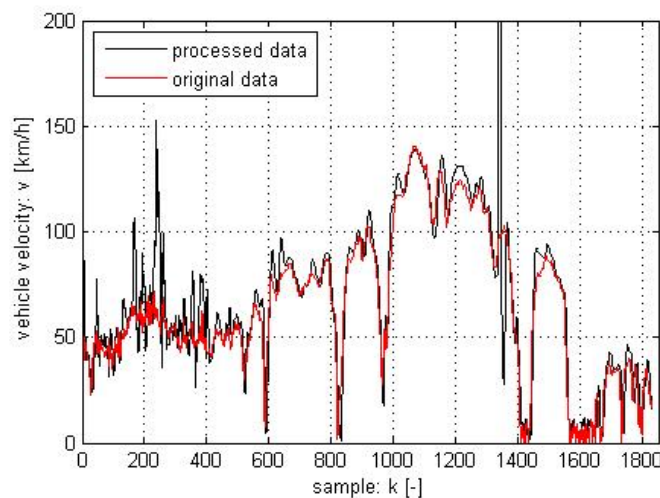


Figure 3 – Non-restricted effect of process noise on velocity calculation

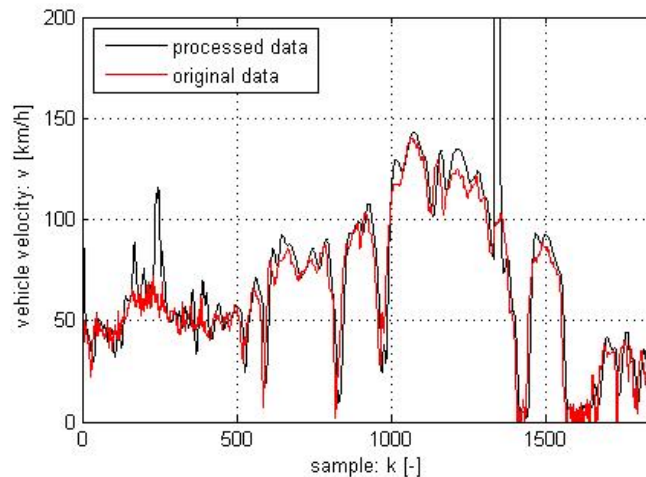


Figure 4 – Restricted effect of process noise on velocity calculation

For this example calculation of vehicle velocity, acceleration could be considered as noise value, as such from data about breaking distance provides possible estimation of maximal acceleration. In Figure 1 effect of noise is not restricted but in Figure 2 rate at which noise affects the signal was lowered to one tenth of its non-restricted value. This estimation affects time delay of observed system.

Distribution covariance matrix could be considered as distrust to measured data. Its values after few initial steps of calculation will become more accurate. Big initial values are recommended for faster calculation of more accurate values of matrix. Zero values could be set only if we are certain that measurement is precise.

5 Application of Kalman filter

To process data affected by noise it is necessary to note that measured data have to be considered as ergodic and static. Dynamic behavior of system can vary. For mentioned reason algorithm of Kalman filter was tested on 3 types of measured signal, constant, ramp function and track record. It was set se goal to examine how much code space realization of filter will take. Mentioned applications of filtration are shown on Figure 5 to Figure 12.

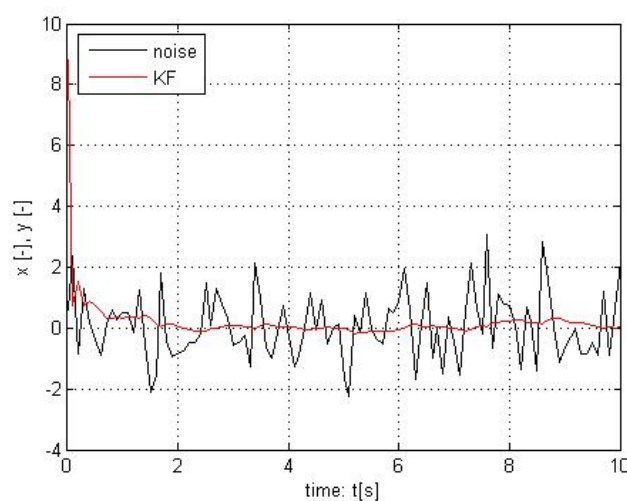


Figure 5 – Filtration of random constant

First application was filtering of constant. Signal was created in tool Simulink of program Matlab. Zero was set as sought constant. Constant was affected by White noise. Initial estimation of state variable and value of distribution covariance matrix were set as 10.

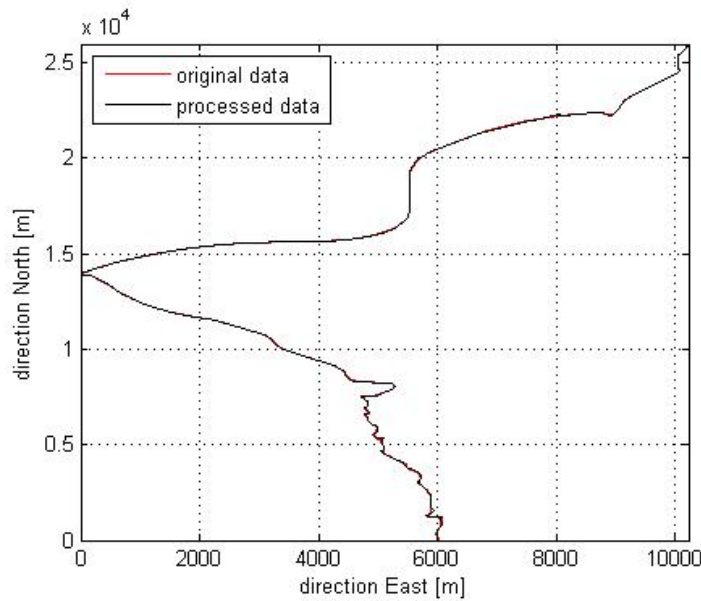


Figure 6 – Data of vehicle track for velocity calculation

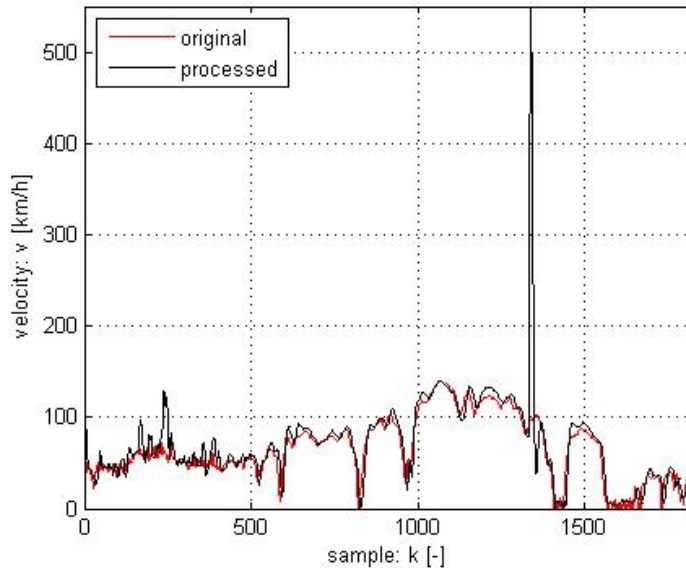


Figure 7 – Original and calculated velocity of vehicle

Second application of filter was calculating vehicle speed from track record. Original track record was recorded by application NoniGPS on handheld PDA. Notable deviations of processed signal were due to measurement disruptions. Velocity for samples 100 to 500 disruption of measurement was due passage of forest. Velocity for samples 1300 to 1350 disruption of measurement was due passage of Klimkovice tunnel. Mentioned track on Figure 6 shows path from Ostrava-Poruba to Štramberk by car. Effects of process and measurement noises are notable in comparison with original signals extracted from PDA.

For second application of filter there was also made second measurement. In track record is recorded path from Ostrava-Jih to Ostrava-Poruba by tram. Original are data about position of tram. Velocity had to be acquired through use of Kalman filter. Data were measured with application SensorLog on handheld device, Smartphone iPhone 4. Data were in geodetic format. For calculation of velocity it was necessary to convert them into metric system. Mentioned application of velocity calculation is shown on Figure 8 to Figure 10.

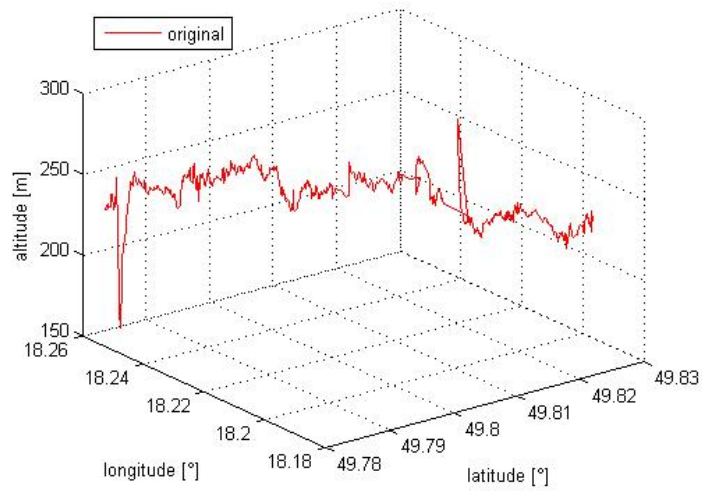


Figure 8 – Data of tram track for position and velocity calculation

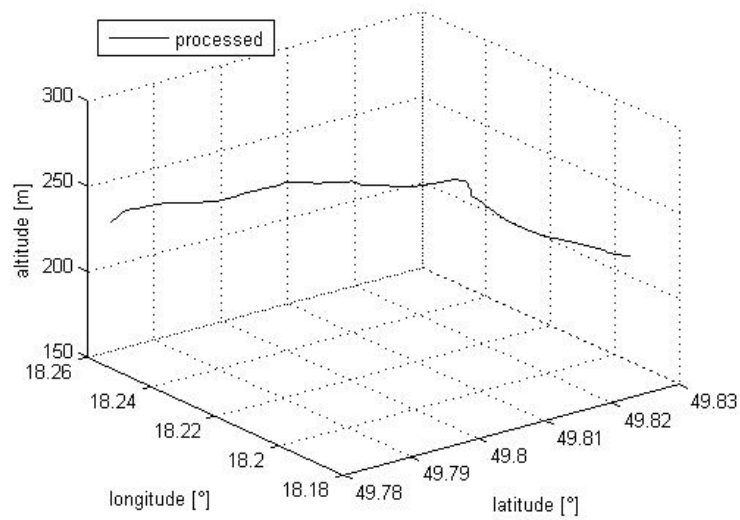


Figure 9 – Calculated position of tram

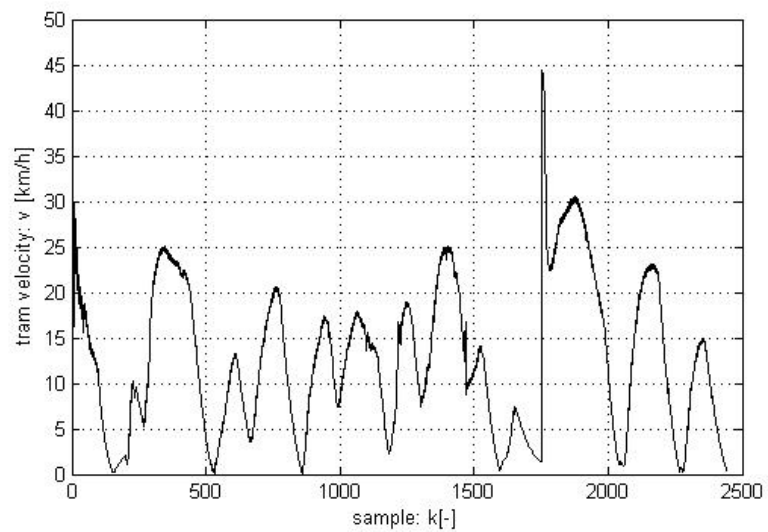


Figure 10 – Calculated velocity of tram

Recorded movement of tram is not very accurate due to measurement disruptions in city (Figure 8). Accuracy of position data were raised from 200 meters to 50 meters. Simplifying effect of this measurement is that tram moves by set path. This means less amount of process noise.

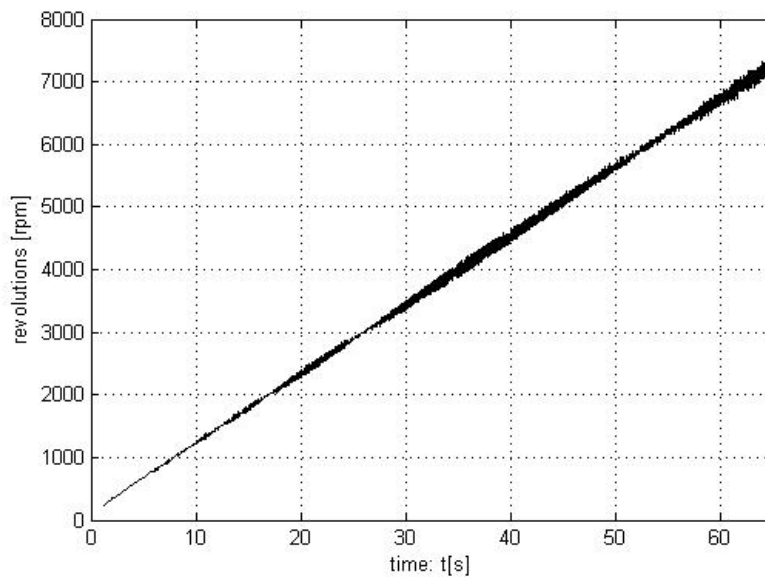


Figure 11 – Measured drive revolutions

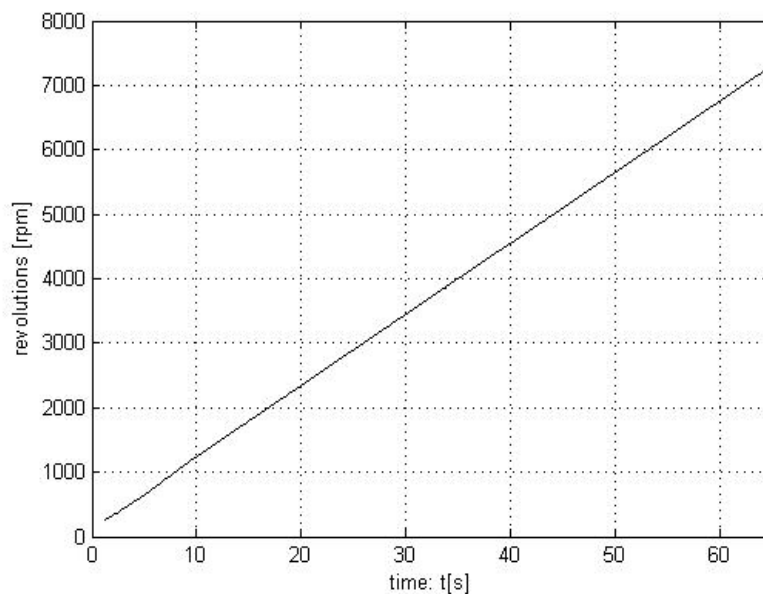


Figure 12 – Processed data of drive revolutions

Third application of filter was reduction of measurement error of ramp function. Values of Kalman gain matrix and distribution covariance matrix reached final their state. Maximal initial inaccuracy reached 20 percent. After 7.1 seconds accuracy reached 3.5 percent. Comparisons were made to ramp function connecting start and end point in vector of data measurement. Signal processing and testing was done in tool M-file of program Matlab.

6 Conclusion

Goal of paper was algorithmization of Kalman filter in program Matlab/M-file. After getting familiar with estimation of parameters, then algorithm was applied on experimental data. Processing and comparing data allowed for evaluating of algorithmization and effect of estimated parameters on filtration.

Filtration is possible for measured data but also for real time use. Algorithm of filter transferred to M-file tool in program Matlab takes only few code lines, so it does not need a lot of computing power. It allows to clear measurement noise caused by measurement method. At the beginning of processing data is period of lower accuracy, that raises after reaching final values of Kalman gain matrix. Calculation of Kalman gain for each processing step is based on dynamic parameters of system. For short data set it is necessary to accurately determine initial conditions and estimations. If initial parameters are not accurate, Kalman gain matrix won't reach final reach final value for processing step. That would cause bad result of filtration.

From application algorithmization of Kalman filter it is safe to assume that it functions correctly. Filtration is precise for consistent measurement with low process noise. It is recommendable for processing navigational data but for slow movement. For more accurate filtration it would better to use some of Kalman filter upgraded forms.

7 References

- TŮMA, J. 2009. *Signal processing*. 1. vyd. Ostrava : VŠB - Technická univerzita, 2009, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2114-6.
- WELCH, G., BISHOP., G. 2001. *An Introduction to the Kalman Filter by Greg Welch and Gary Bishop*. Chapel Hill: SIGGRAPH, 2001. Available from www:
<URL: http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf>
- GREWAL, M., S., ANDREWS, A., P. 2001. *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*. 2. vyd. New York: Wiley, 2001. ISBN 0-471-39254-5.
- SORENSEN, H. W. 1970. Least-squares estimation: From Gauss to Kalman. *Least-squares estimation: From Gauss to Kalman*. 1970, vol. 7, s. 63-68. Available from www:
<URL: <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Sorenson1970.pdf>>
- HAYKIN, S. 2001. *Kalman filtering and neural networks*. New York: Wiley, 2001, xiii, 284 s. ISBN 978-047-1221-548.

Dominantnost pólů regulačního obvodu Dominance of Control System Poles

VÍTEČKOVÁ, Miluše & VÍTEČEK, Antonín

Prof., Ing., CSc., ✉ FS VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika, 💻 e-mail: miluse.viteckova@vsb.cz, antonin.vitecek@vsb.cz

Abstrakt: Příspěvek je věnován využití principu argumentu pro ověření dominantnosti pólů regulačního obvodu. V úvodní části je stručně popsán princip argumentu a je odvozen vztah pro kontrolu dominantnosti zadaného počtu pólů. Jeho použití je ukázáno na regulačním obvodu s proporcionálními soustavami a dopravním zpožděním seřazeným metodou SIMC. V závěru je provedena aproximace anizochronního matematického modelu seřazeného metodou SIMC kmitavou soustavou druhého řádu a dopravním zpožděním.

Klíčová slova: princip argumentu, dominantnost, míra dominance, metoda SIMC, dopravní zpoždění

1 Úvod

Stabilitě systémů s dopravním zpožděním je v odborné literatuře věnována značná pozornost, viz např. [Górecki et al. 1989; Busłowicz 2000; Parks, Hahn 1993; Zítek 1998; Zítek, Vyhlídal 2008; Zítek, Fišer, Vyhlídal 2013 a 2014].

Naproti tomu dominantnosti pólů systémů s dopravním zpožděním se zabývalo do nedávna jen několik publikací, jak např. [Özbay 2005; Wang et al. 2008]. V poslední době se objevily publikace, které řeší problém dominantnosti trojice pólů na základě principu argumentu plně a navíc velmi jednoduše [Zítek, Fišer, Vyhlídal 2013 a 2014].

V referátu je použit princip argumentu pro ověření dominantnosti pólů u retardovaných systémů a použití je ukázáno na regulačních obvodech s proporcionálními soustavami seřazených metodou SIMC [Skogestad 2001 a 2003].

2 Princip argumentu a dominantnost pólů

Princip argumentu lze ve zjednodušené podobě formulovat ve tvaru [Górecki et al. 1989; Parks, Hahn 1993; El'sgol'ts, Norokin 1986; Zítek 1986; Zítek, Víteček 1989; Zítek, Vyhlídal 2008; Zítek, Fišer, Vyhlídal 2013 a 2014]: Má-li analytická funkce komplexní proměnné $N(s)$ uvnitř uzavřené křivky $K n_d$ kořenů (nul), pak při průběhu komplexní proměnné s po této křivce v záporném směru (tj. ve směru pohybu hodinových ručiček) pro změnu jejího argumentu platí

$$\Delta \arg_K N(s) = -2\pi n_d. \quad (1)$$

Dále je uvažován regulační obvod s charakteristickým kvazimnohočlenem

$$N(s) = s^n + \sum_{i=0}^{n-1} a_i s^i e^{-T_{di}s}, \quad (2)$$

kde a_i jsou konstantní koeficienty, $T_{di} \geq 0$ – dopravní zpoždění, n – stupeň charakteristického kvazimnohočlenu.

Charakteristický kvazimnohočlen (2) odpovídá tzv. retardovanému systému [Górecki et al. 1989, Busłowicz 2000; Zítek, Vyhlídal 2008; Pekař 2013].

Pro

$$T_{di} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (3)$$

jde o systém bez dopravního zpoždění a charakteristický kvazimnohočlen (2) přejde na obyčejný mnohočlen

$$N(s) = s^n + \sum_{i=0}^{n-1} a_i s^i. \quad (4)$$

Vzhledem k tomu, že jsou uvažovány charakteristické kvazimnohočleny, resp. mnohočleny regulačních obvodů, jejich kořeny (nuly) budou dále nazývány póly.

Charakteristický kvazimnohočlen (2) je vhodné zapsat ve tvaru

$$N(s) = s^n N_1(s), \quad N_1(s) = 1 + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{a_i}{s^{n-i}} e^{-T_{di}s}. \quad (5)$$

Pro ověření dominantnosti n_d pólů regulačního obvodu s charakteristickým kvazimnohočlenem (2) se použije uzavřená Jordanova křivka K skládající se z části kružnice C a z části přímky L v souladu s obr. 1 a vztahy:

a) Křivka C

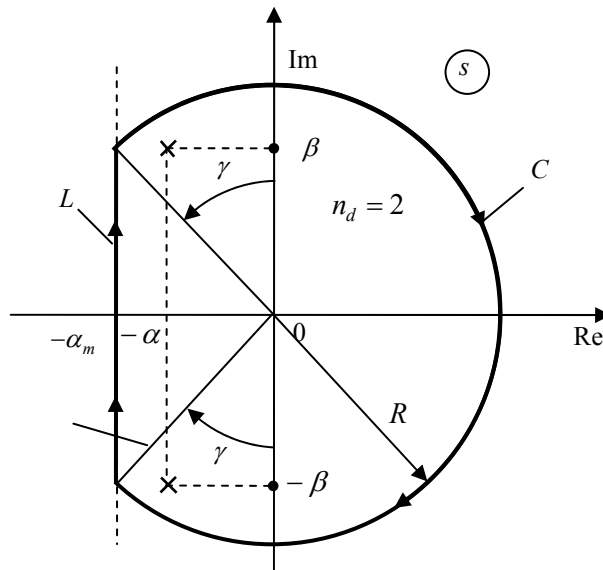
$$s = R e^{j\varphi}, \quad -\frac{\pi}{2} - \gamma < \varphi < \frac{\pi}{2} + \gamma, \quad (6)$$

$$R \rightarrow \infty \Rightarrow \gamma \rightarrow 0.$$

b) Přímka L

$$s = -\alpha_m + j\omega, \quad -R \cos \gamma < \omega < R \cos \gamma, \quad (7)$$

$$R \rightarrow \infty \Rightarrow \gamma \rightarrow 0.$$



Obrázek 1 – Uzavřená křivka $K = C + L$, uvnitř které leží jedna dominantní dvojice pólů

Hodnotu $\alpha_m \geq 0$ je třeba zvolit tak, aby dominantní póly ležely napravo od přímky L (obr. 1).

Na obr. 1 je uvažována jedna dominantní dvojice pólů, tj. $n_d = 2$.

Změna argumentu kvazimnohočlenu (5) při pohybu komplexní proměnné s v záporném směru po uzavřené křivce $K = C + L$ pro n_d dominantních pólů je dána vztahem (1).

Změna argumentu kvazimnohočlenu (5) při pohybu komplexní proměnné s v záporném směru po křivce C (6) pro $R \rightarrow \infty$ je

$$\Delta \arg N(s) = \Delta \arg s^n + \Delta \arg N_1(s) = -\pi n + 0 = -\pi n. \quad (8)$$

Změna argumentu $N_1(s)$ je nulová, protože pro

$$R \rightarrow \infty \Rightarrow N_1(s) = 1 = \Delta \arg 1 = 0,$$

tj.

$$\Delta \arg N(Re^{j\varphi}) = -\pi n. \quad (9)$$

$$-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$$

$$R \rightarrow \infty$$

Změna argumentu kvazimnohočlenu $N(s)$ při pohybu komplexní proměnné s po přímce L zdola nahoru pro $R \rightarrow \infty$ je

$$\Delta \arg N(s) = \Delta \arg N(s) - \Delta \arg N(s) = -2\pi n_d + \pi n = \pi(n - 2n_d),$$

$$L \qquad C+L \qquad C$$

tj.

$$\Delta \arg N(-\alpha_m + j\omega) = \pi(n - 2n_d). \quad (10)$$

$$-\infty < \omega < \infty$$

Protože platí

$$\operatorname{Re} N(-\alpha_m + j\omega) = \operatorname{Re} N(-\alpha_m - j\omega) - \text{sudá funkce},$$

$$\operatorname{Im} N(-\alpha_m + j\omega) = -\operatorname{Im} N(-\alpha_m - j\omega) - \text{lichá funkce},$$

Charakteristický kvazimnohočlen $N(-\alpha_m + j\omega)$ je pro $-\infty < \omega < \infty$ symetrickou funkcí podle reálné osy, a proto vztah (10) lze zjednodušit

$$\Delta \arg N(-\alpha_m + j\omega) = \pi \left(\frac{n}{2} - n_d \right). \quad (11)$$

$$0 \leq \omega < \infty$$

Je zřejmé, že pro $\alpha_m = 0$ se dostane Michajlovovo kritérium stability pro retardované systémy [Szymkat 1993; Pekař 2013]

$$\Delta \arg N(j\omega) = \pi \left(\frac{n}{2} - n_d \right), \quad (12)$$

$$0 \leq \omega < \infty$$

kde n_d je počet nestabilních pólů.

Pro stabilní systémy platí $n_d = 0$, a proto Michajlovovo kritérium stability pro retardované systémy (i pro systémy bez dopravného zpoždění) má velmi jednoduchý a všeobecně známý tvar

$$\Delta \arg N(j\omega) = \pi \frac{n}{2}. \quad (13)$$

$$0 \leq \omega < \infty$$

3 Metoda SIMC

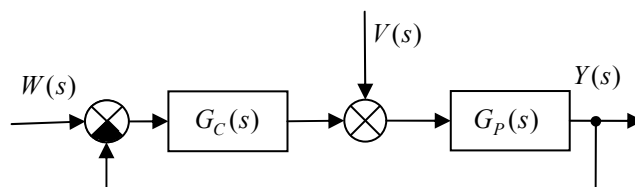
Metoda SIMC patří mezi jednoduché a efektivní metody seřizování konvenčních analogových regulátorů [Skogestad 2001 a 2003]. Zde bude stručně popsána pouze pro návrh a seřízení regulátorů uvedených v tab. 1 a pro proporcionální soustavy uvedené v tab. 2, kde T_1 a T_2 jsou časové konstanty, T_d – dopravní zpoždění, k_1 – koeficient přenosu, ξ_1 – relativní tlumení, K_p – zesílení regulátoru, T_I – integrační časová konstanta regulátoru, T_D – derivační časová konstanta regulátoru.

Metoda SIMC pro určení přenosu vhodného regulátoru a určení hodnot jeho stavitelných parametrů používá vztah pro přímou syntézu (obr. 2)

$$G_C(s) = \frac{1}{G_P(s)} \frac{G_{wy}(s)}{1 - G_{wy}(s)}, \quad (14a)$$

$$G_P(s) = G'_P(s) e^{-T_d s}, \quad G_{wy}(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{1}{T_w s + 1} e^{-T_d s}, \quad (14b)$$

kde $G_{wy}(s)$ je požadovaný přenos řízení, $G_P(s)$ – přenos soustavy, $G'_P(s)$ – přenos soustavy bez dopravního zpoždění (invertibilní část přenosu soustavy), T_w – časová konstanta uzavřeného regulačního obvodu, $W(s)$ – obraz žádané veličiny $w(t)$, $V(s)$ – obraz poruchové veličiny $v(t)$, $Y(s)$ – obraz regulované veličiny $y(t)$.



Obrázek 2 – Regulační obvod

Tabulka 1: Přenosy konvenčních analogových regulátorů

	Typ	Přenos
1	I	$\frac{1}{T_I s}$
2	PI	$K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$
3	PID	$K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$

Tabulka 2: Hodnoty stavitelných parametrů regulátorů pro metodu SIMC

Regulovaná soustava $T_1 \leq 8T_d$		Regulátor			
		Typ	K_P^*	T_i^*	T_D^*
1	$k_1 e^{-T_d s}$	I	–	$2k_1 T_d$	–
2	$\frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s}$	PI	$\frac{T_1}{2k_1 T_d}$	T_1	–
3	$\frac{k_1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-T_d s}$, $T_1 \geq T_2$	PID	$\frac{T_1 + T_2}{2k_1 T_d}$	$T_1 + T_2$	$\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$
4	$\frac{k_1}{T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1} e^{-T_d s}$, $\xi_1 \leq 1$	PID	$\frac{2\xi_1 T_1}{2k_1 T_d}$	$2\xi_1 T_1$	$\frac{T_1}{2\xi_1}$

Po dosazení (14b) do (14a) a po použití aproximace

$$e^{-T_d s} \approx 1 - T_d s$$

se dostane

$$G_C(s) = \frac{1}{G'_P(s)} \frac{1}{(T_w + T_d)s}. \quad (15)$$

Pro $T_1 \leq 8T_d$ se doporučuje volit $T_w = T_d$ [Skogestad 2001 a 2003], a proto vztah (15) se zjednoduší

$$G_C(s) = \frac{1}{2T_d s} \frac{1}{G'_p(s)}. \quad (16)$$

Po dosažení přenosu soustavy bez dopravního zpoždění z tab. 2 do vztahu (16) a po jednoduché úpravě na tvar vhodného přenosu regulátoru z tab. 1 se obdrží jeho hodnoty stavitelných parametrů pro metodu SIMC. Tyto hodnoty jsou v tab. 2 označeny hvězdičkou *.

4 Ověření dominantnosti pólů pro metodu SIMC

Metoda SIMC pro proporcionální soustavy z tab. 1 je kompenzační, která vede na přenos řízení ve tvaru anizochronního matematického modelu [Zítek, Víteček 1999]

$$G_{wy}(s) = \frac{k_o^*}{s + k_o^*} e^{-T_d s}, \quad k_o^* = \frac{1}{2T_d}, \quad (17)$$

kde k_o^* je zesílení otevřeného regulačního obvodu pro metodu SIMC.

Vzhledem k tomu, že regulační obvod s dopravním zpožděním má nekonečně mnoho pólů, vzniká problém, kolik pólů určuje vlastnosti regulačního obvodu seřazeného metodou SIMC s přenosem (17) a zda tyto póly jsou dominantní.

Charakteristický kvazimnohočlen pro obecné zesílení otevřeného regulačního obvodu k_o je dán jmenovatelem přenosu řízení (17), tj.

$$N(s) = s + k_o e^{-T_d s}. \quad (18)$$

Rozložení pólů kvazimnohočlenu (18) pro různá zesílení otevřeného regulačního obvodu k_o je uvedeno např. v [Vítečková, Hanuš, Hernych 1999].

Řešením soustavy rovnic

$$N(s) = 0, \quad \frac{dN(s)}{ds} = 0$$

se získá dvojnásobný záporný reálný pól

$$s_2 = -\frac{1}{T_d} \quad (19)$$

a jemu odpovídající zesílení otevřeného regulačního obvodu

$$k_o = \frac{1}{eT_d}, \quad (20)$$

které zajistí nekmitavý regulační proces.

Protože platí

$$k_o = \frac{1}{eT_d} < k_o^* = \frac{1}{2T_d}, \quad (21)$$

je zřejmé, že přechodný proces regulačního obvodu seřazeného metodou SIMC bude kmitavý a že je určen dvojicí komplexně sdružených pólů

$$s_{1,2} = -\alpha_d \pm j\beta_d. \quad (22)$$

Charakteristický kvazimnohočlen (18) pro k_o^* odpovídá retardovanému systému, a proto pro ověření dominantnosti dvojice komplexně sdružených pólů (22) lze použít podmínku (11), která pro $n_d = 2$ a $n = 1$ má tvar

$$N(-\alpha_m \pm j\omega) = -\frac{3}{2} \pi, \quad 0 \leq \omega < \infty \quad (23)$$

Na základě vztahů (19) a (21) lze zvolit

$$\alpha_m = \frac{1}{T_d} > \alpha_d > 0. \quad (24)$$

V souladu s (18) lze tedy psát

$$N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega\right) = -\frac{1}{T_d} + j\omega + \frac{e}{2T_d} e^{-jT_d\omega}. \quad (25)$$

Použitím Eulerova vztahu

$$e^{-jx} = \cos x - j\sin x$$

se dostane

$$N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega\right) = \operatorname{Re} N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega\right) + j\operatorname{Im} N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega\right), \quad (26a)$$

$$\operatorname{Re} N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega\right) = -\frac{1}{T_d} + \frac{e}{2T_d} \cos(T_d\omega), \quad (26b)$$

$$\operatorname{Im} N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega\right) = \omega - \frac{e}{2T_d} \sin(T_d\omega). \quad (26c)$$

Protože pro

$$\omega = 0 \Rightarrow N\left(-\frac{1}{T_d}\right) = \frac{1}{2T_d}(e - 2) > 0$$

a pro

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega\right) \rightarrow j\omega$$

je zřejmé, že aby platila podmínka (23) musí existovat takový nejmenší úhlový kmitočet ω_1 , pro který

$$\operatorname{Re} N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega_1\right) = 0 \quad \text{a} \quad \operatorname{Im} N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega_1\right) < 0. \quad (27)$$

Úhlový kmitočet ω_1 se určí snadno

$$\operatorname{Re} N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega_1\right) = 0 \Rightarrow \omega_1 = \frac{1}{T_d} \arccos \frac{2}{e}.$$

Lze tedy psát

$$\operatorname{Im} N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega_1\right) = \frac{1}{T_d} \left(\arccos \frac{2}{e} - \frac{e}{2} \sin \arccos \frac{2}{e} \right) < 0.$$

Dvojice komplexně sdružených pólů (22) pro regulační obvod seřizený metodou SIMC je skutečně dominantní. Průběh funkce $T_d N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega\right)$ pro $0 \leq \omega < \infty$ je na obr. 3.

Míra dominantnosti dvojice pólů (22) je dána podílem absolutní velikosti reálné části α_n první nedominantní dvojice pólů, příp. prvního nedominantního pólu a absolutní velikosti reálné části α_d dominantní dvojice pólů (22), tj.

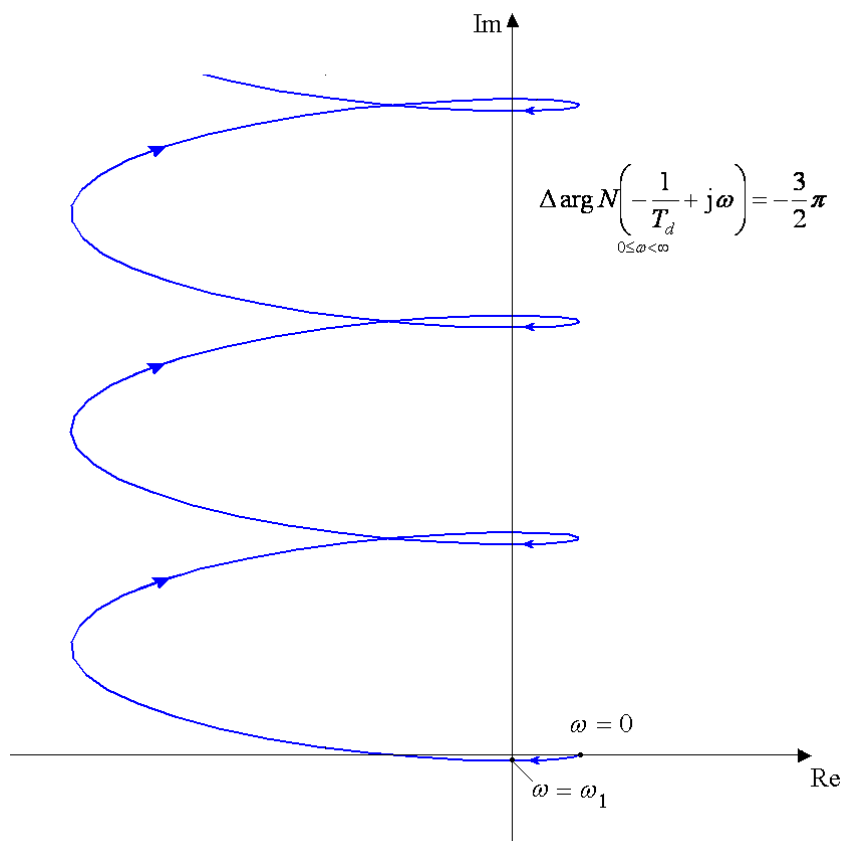
$$d = \frac{\alpha_n}{\alpha_d}. \quad (28)$$

Hodnoty α_n a α_d se získají řešením soustavy dvou rovnic

$$\operatorname{Re} N\left(-\frac{m}{T_d} + j\omega\right) = 0 \Rightarrow -m + \frac{1}{2} e^m \cos T_d\omega = 0, \quad (29)$$

$$\operatorname{Im} N\left(-\frac{m}{T_d} + j\omega\right) = 0 \Rightarrow T_d\omega - \frac{1}{2} e^m \sin T_d\omega = 0$$

pro první dvě dvojice řešení (ω_d, m_d) a (ω_n, m_n) s nejmenšími úhlovými kmitočty $0 < \omega_d < \omega_n$.



Obrázek 3 – Průběh funkce $T_d N\left(-\frac{1}{T_d} + j\omega\right)$

Řešení soustavy rovnic (29) lze provést s výhodou graficky pomocí programu MATLAB. Byly obdrženy hodnoty

$$\omega_d = 0,77 \text{ a } m_d = 0,79 \Rightarrow \alpha_d = \frac{0,79}{T_d} \approx \frac{\pi}{4T_d}, \quad (30)$$

$$\omega_n = 7,50 \text{ a } m_n = 2,77 \Rightarrow \alpha_n = \frac{2,77}{T_d},$$

$$\alpha = \frac{\alpha_n}{\alpha_d} = \frac{m_n}{m_d} \doteq 3,5.$$

Podle [Wang et al. 2008] míra dominantnosti by měla být v rozsahu 3 – 5, což je splněno.

5 Aproximace přenosu řízení

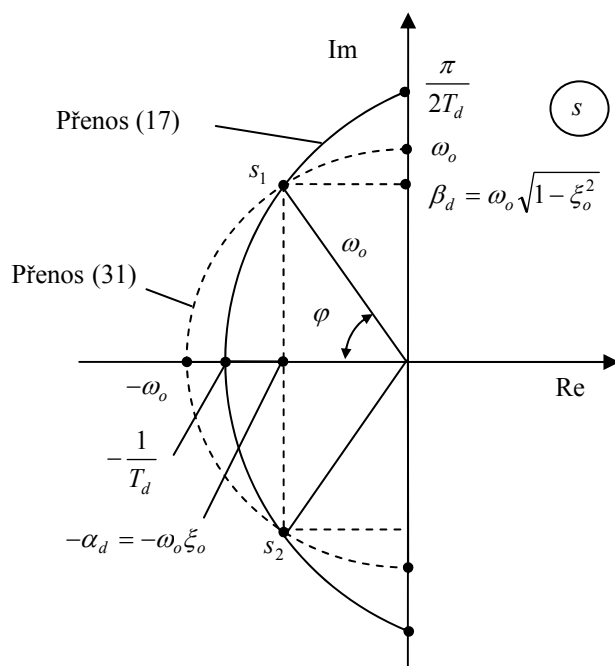
Přenos řízení regulačního obvodu seřízeného metodou SIMC (17) má tvar anizochronního modelu [Zítek, Víteček 1999], a proto je vhodné zastoupit ho jednodušším modelem. Vzhledem k tomu, že jeho dynamické vlastnosti určuje dominantní dvojice komplexně sdružených pólů (22), je možné vyjádřit přenos řízení (17) přibližně ve tvaru

$$G_{wy}(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi_0\omega_0s + \omega_0^2} e^{-T_{d0}s} = \frac{\alpha_d^2 + \beta_d^2}{s^2 + 2\alpha_d s + \alpha_d^2 + \beta_d^2} e^{-T_{d0}s}, \quad (31)$$

kde ω_0 je úhlový kmitočet netlumených kmitů, ξ_0 – poměrné tlumení, T_{d0} – náhradní dopravní zpoždění.

Hodnoty α_d a β_d dominantní dvojice komplexně sdružených pólů (22) v přenosech (17) a (31) se získají na základě obr. 4.

V souladu s obr. 4 lze psát



Obrázek 4 – Poloha dominantní dvojice pólů

$$\alpha_d = \omega_0 \xi_0, \beta_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi_0^2} \Rightarrow$$

$$\frac{\beta_d}{\alpha_d} = \frac{\sqrt{1 - \xi_0^2}}{\xi_0}, \frac{\beta_d}{\alpha_d} = \operatorname{tg} \varphi. \quad (32)$$

Po dosazení dvojice pólů (22) do charakteristického kvazimnohočlenu (18) pro k_o^* a úpravě se dostane

$$\left. \begin{aligned} -2T_d \alpha_d + e^{-T_d \alpha_d} \cos(T_d \beta_d) &= 0 \\ -2T_d \beta_d + e^{-T_d \alpha_d} \sin(T_d \beta_d) &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\beta_d}{\alpha_d} = \operatorname{tg}(T_d \beta_d). \quad (33)$$

Protože přibližně platí (30), tj.

$$\alpha_d = \frac{\pi}{4T_d}$$

po dosazení do (33) se dostane rovnice

$$\frac{4}{\pi} T_d \beta_d = \operatorname{tg}(T_d \beta_d),$$

jejíž řešení je

$$T_d \beta_d = \frac{\pi}{4} \Rightarrow \alpha_d = \beta_d = \frac{\pi}{4T_d}. \quad (34)$$

Ze vztahů (32) se pak dostane

$$\xi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \varphi = \frac{\pi}{4}, \quad \omega_0 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}T_d}. \quad (35)$$

V souladu se vztahy (17), (31), (34) a (35) lze psát

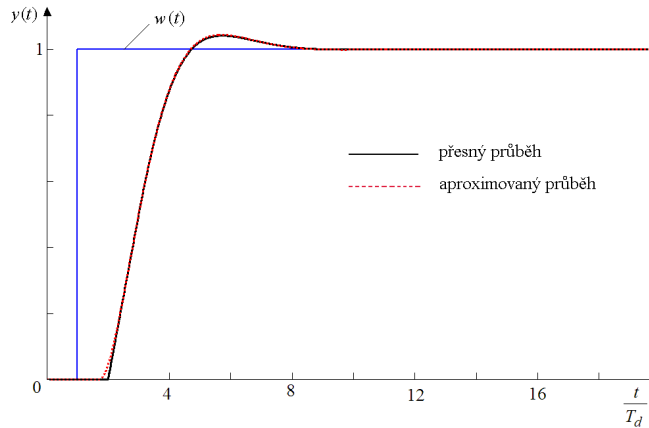
$$G_{wy}(s) = \frac{1}{2T_d s + e^{-T_d s}} e^{-T_d s} \approx \frac{1}{\frac{8T_d^2}{\pi^2} s^2 + \frac{4T_d}{\pi} s + 1} e^{-\frac{T_d}{\sqrt{2}} s} \quad (36)$$

Překmit přechodové charakteristiky pro přenos (31) [resp. přibližný přenos (36)] je dán známým vztahem

$$\kappa = e^{-\pi \frac{\xi_0}{\sqrt{1-\xi_0^2}}} = e^{-\pi} \doteq 0,043. \quad (37)$$

Náhradní dopravní zpoždění v přibližném přenosu (36) bylo určeno časovým přízpůsobením.

Na obr. 5 jsou ukázány průběhy přechodových charakteristik získaných z původního (17) a aproximovaného (36) přenosu řízení pro regulační obvod seřízený metodou SIMC.



Obrázek 5 – Porovnání přechodových charakteristik získaných z přesného a aproximovaného přenosu řízení pro metodu SIMC

6 Závěr

V příspěvku je využit princip argumentu pro ověření dominantnosti zvolených pólů. Použití je ukázáno na regulačním obvodu s proporcionálními soustavami a dopravním zpožděním seřízeným metodou SIMC. Toto seřízení dává regulační obvod, jehož vlastnosti se dají popsat dominantní dvojicí komplexně sdružených pólů.

Příspěvek vznikl za podpory projektu GAČR č. 101/12/2520.

9 Použitá literatura

BUSŁOWICZ, M. Robust Stability of Linear Time-Delayed Systems (in Polish). Dział Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej, Warszawa – Białystok, 2000

EL'SGOL'TS, L. E. NORKIN, S. B. Introduction to the Theory and Application of Differential Equations with Deviating Arguments. Academic Press, New York, 1973

GÓRECKI, H. Analysis and Synthesis of Control Systems with Delay (in Polish). Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1971

GÓRECKI, H., FUKSA, S. GRABOWSKI, P., KORYTOWSKI, A. Analysis and Synthesis of Time Delay Systems. PWN – Polish Scientific Publisher – Warszawa, John Wiley & Sons – Chichester, 1989

ÖZBAY, H. 11.4 The Root Locus Method. In: Systems, Controls, Embedded Systems, Energy, and Machines. Third Edition, DORF, R. C. (Editor) CRC Taylor & Francis, Boca Raton, 2005, p. 11-34-11-58

PARKS, P. C., HAHN, V. Stability Theory. Prentice Hall, New York, 1993

PEKAŘ, L. Control of Time Delay Systems – An Algebraic Approach. Doctoral Thesis. Faculty of Applied Informatics, Tomas Bata University in Zlín, 2013

SKOGESTAD, S. Probably the best simple PID tuning rules in the world. Paper No. 2764 presented at AICHE Annual meeting. Reno, NU, USA, November 19, 2001, p. 1-28

SKOGESTAD, S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. Journal of Process Control, 13, 2003, p. 291-309

SZYMKAT, M. Algorithm for Stability Analysis of Linear Systems. Chapter 7, p. 151-201. In: Górecki, H., Korytowski, A. (Editors) Advanced in Optimization and Stability Analysis of Dynamical Systems. Wydawnictwo AGH, Kraków, 1993

VÍTEČKOVÁ, M., HANUŠ, B., HERNYCH, M. “Appendix to article – Vítečková, M. Digital and analog controller tuning for controlled systems with time delay” (in Czech). Automatizace, Vol. 42, No. 2, 1999, p. 112

WANG, Q. G., ZHANG, Z., ÅSTRÖM, K. J., ZHANG, Y., ZHANG, Y. Guaranteed Dominant Pole Placement with PID Controller: In: Proceedings of the 14th World Congress-IFAC, Soul, Korea, July 6-11, 2008, p. 5842-5845

ZÍTEK, P. Anisochronic Modelling and Stability Criterion of Hereditary Systems. I: Problems of Control and Information Theory, Vol. 15 (6), 1986, p. 413-423

ZÍTEK, P. Time Delay Control System Design Using Functional State Models. CTU Reports, No. 1/1998

ZÍTEK, P., FISCHER, J., VYHLÍDAL, T. Dimensional analysis approach to dominant three-pole placement in delayed PID control loops. Journal of Process Control, 23, 2013, p. 1063-1074

ZÍTEK, P., FISCHER, J., VYHLÍDAL, T. Dominant trio poles assignment in delayed PID control loop. In: Delay Systems from Theory to Numerics and Applications. Vyhlídal, T., Lafay, J., F., Sipany, R. (Editors) Springer, Heidelberg, 2014, p. 57-69

ZÍTEK, P., VÍTEČEK, A. Control Design of Systems with Time Delays and Nonlinearities (in Czech). CTU Publishing, Prague, 1999

ZÍTEK, P., VYHLÍDAL, T. Argument – increment based stability criterion for neutral time delay systems. In: Proceedings of the 16th Mediterranean Conference on Control and Automation. Congress Centre, Ajaccio, France, June 25-27, 2008, p. 824-829

Author index

B	
BARANOVÁ, Vladena	5
BARBOLYAS, Boris	123
BARTALSKÝ Lukáš	123
BUŠEK Jaroslav	72
D	
DUBJÁK, Ján	12
DUŠEK, František	63
F	
FARANA, Radim	20
FOJTÍK, David	80
FUTÓ, Jozef	5
G	
GRÚBEROVÁ, Michaela	28, 123
H	
HÝL, Radim	38
J	
JANEČKA, Patrik	50
JANOŠEK, Michal	20
K	
KUČERA Vladimír	72
L	
LANDRYOVÁ, Lenka	5, 115
LIGUŠOVÁ, Jana	63
LIGUŠ, Ján	63
LORENZ, Filip	58
M	
MAHDAL, Miroslav	101
MARIŠKA, Martin	63
MICHAL, Peter	66
P	
PODEŠVA, Petr	80
PILBAUER Dan	72
S	
SHARMA, Rahul	88
Š	
ŠEMINSKÝ, Jaroslav	95
ŠURÁNEK, Pavel	101
T	
TÓTHOVÁ, Mária	108
TŮMA, Jiří	101
U	
URBAN, Patrik	115
V	
VASILEV, Andrey	133
VAJSÁBEL, Michal	28, 123
VÍTEČEK, Antonín	142
VÍTEČKOVÁ, Miluše	142
VYHLÍDAL Tomáš	72
W	
WAGNEROVÁ, Renata	38
WALEK, Bogdan	20
Ž	
ŽÁČEK, Jaroslav	20

Autor:	Kolektiv autorů	
Editor:	Ing. Pavel Smutný, PhD.	
Katedra, institut:	Katedra automatizační techniky a řízení	352
Název:	XXXIII. Seminar ASR '2014 "Instruments and Control"	
Místo, rok, vydání:	Ostrava, 2014, 1. vydání	
Počet stran:	152	
Vydala:	VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA	
Tisk:	Katedra ATR-352, VŠB-TUO, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba	
Náklad:	200 ks	

Neprodejné

Text neprošel jazykovou úpravou, za věcnou správnost příspěvků odpovídají autoři.

Tato publikace ani její části nesmí být reprodukovány a přepisovány bez písemného svolení vydavatele a autorů příspěvků.

ISBN 978-80-248-3398-9