

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA AUTOMATIZAČNÍ TECHNIKY A ŘÍZENÍ



XLI. Seminar ASR '2016 **“Instruments and Control”**

Ostrava, April 22, 2016

Programme Committee

R. FARANA	Ostravská univerzita v Ostravě
K. JARACZ	Pedagogic Academy Krakow, Poland
M. JAVŮREK.	Univerzita Pardubice
V. KEBO	HGF VŠB-TU Ostrava
K. KOSTŮR	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/2016/asr2016/>

Proceedings Editors

P. SMUTNÝ

ISBN 978-80-248-3910-3

Table of Contents

System Approach in Determining of Fuel Amount.....	5
<i>BALONOVÁ, Katarína, KLVÁČOVÁ, Simona & ĎURIŠ, Stanislav</i>	
The Key Performance Indicators of the Technological Processes	20
<i>BARANOVÁ, Vladena & LANDRYOVÁ, Lenka</i>	
Návrh řídicího systému pro model Helicopter	30
<i>CZEBE, Jiří & ŠKUTA, Jaromír</i>	
Tepelná bilancia formy ako nástroj validácie technologických parametrov	39
<i>DUBJÁK, Ján & ZBIHLEJ, Jozef</i>	
Použití grafů v úlohách vícekritériální analýzy variant.....	47
<i>FARANA, Radim</i>	
The High Speed Current Sensing System	54
<i>GEBAUER, Jan, FOJTÍK, David & PODEŠVA, Petr</i>	
Simulation Methods and Design of Experiments to Evaluate Accuracy of Industrial Robots	62
<i>GRÚBEROVÁ, Michaela, PALENČÁR, Jakub & PALENČÁR, Rudolf</i>	
Implementace prediktivního řízení do PLC systému	68
<i>HÝL, Radim & WAGNEROVÁ, Renata</i>	
Temperature Measurement Process of Freezing Food	81
<i>KRŠÍKOVÁ, Jana, KLVÁČOVÁ, Simona & ĎURIŠ, Stanislav</i>	
Monitorovanie technologického procesu delenia hydroabrazívnym prúdom	88
<i>MOLITORIS, Matúš & HLOCH, Sergej</i>	
Automaticky přeladitelný pásmový filtr.....	97
<i>PAWLENKA, Miroslav & TŮMA, Jiří</i>	
Návrh a simulace 2DOF regulátorů.....	105
<i>SLADKÁ, Karla & VÍTEČKOVÁ, Miluše</i>	
Simulácia pneumatického aktuátora využitím rôznych aproximácií statických charakteristík umelého svalu	117
<i>TÓTHOVÁ, Mária & DUBJÁK, Ján</i>	
Development and Testing of Algorithm for EEMUA 191	123
<i>URBAN, Patrik & LANDRYOVÁ, Lenka</i>	
Application Monte Carlo Method in the Evaluation of Telescopic Rod Tricept	128
<i>VAJSÁBEL, Michal, JAVORSKÁ, Alexandra & KUREKOVÁ, Eva</i>	
Návrh robustního řízení nelineárních systémů	138
<i>VÍTEČKOVÁ, Miluše & VÍTEČEK, Antonín</i>	
Analýza nástrojů, prostředků a technik pro tvorbu WIS a jejich reálná aplikace	147
<i>VOJTEK, Tomáš & DANEL, Roman</i>	
Motion States of Nonlinear Unstable System Simulation, Connections between SolidWorks-Matlab/Simulink-SimMechanics-3D Animation	163
<i>ZÁTOPEK, Jiří</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 2016, was held forty-one 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 2016 the Seminary of ASR is split into two parts. The first one is a student competition – STOČ 2016 as the 21st Student Science Workshop and the second part is a traditional XLIst Seminary of ASR “Instruments & Control” as a Ph.D. seminary and student competition.

The goal of Seminary of ASR'16 "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'2016 “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)


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


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

System Approach in Determining of Fuel Amount

BALONOVÁ, Katarína¹, KLVAČOVÁ, Simona² & ĎURIŠ, Stanislav³

¹ Ing., ✉ Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of automation, measurement and applied informatics, Námestie Slobody 1, Bratislava, Slovakia,  katarina.balonova@stuba.sk

² Ing., ✉ Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of automation, measurement and applied informatics, Námestie Slobody 1, Bratislava, Slovakia,  simona.klvacova@stuba.sk

³ doc. Ing. PhD., ✉ Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of automation, measurement and applied informatics, Námestie Slobody 1, Bratislava, Slovakia,  stanislav.duris@stuba.sk

Abstract: *Petroleum as a result of long-lasting natural processes in the 21st century is irreplaceable and integral part not only for industry, but also for the whole society. It also represents the basic raw material for production of petroleum products such as diesel, petrol and mineral oils. The basic property of liquids and mineral oil in the case of petrol and diesel is the change of volume dependent on temperature changes. In general, the thermal expansion of petrol is higher than that of diesel because of a different chemical composition. There are a lot of changes of temperature of petroleum products during distribution process starting in refinery and ending in underground storage tanks at petrol stations. It was necessary to define corresponding measurements for determination of real volume. The measurements are influenced by different factors that shall be analysed and quantified. This contribution is aimed on the solution of corresponding measurements with the focus on the determination of real changes of volumes. The measurements are described by mathematic model. All measurements take into account evaluation of corresponding uncertainties.*

Keywords: *Fuel, temperature, uncertainty, reference temperature.*

1 Introduction

During the last decades petroleum and product originating from it has gained financial importance on a regional and international level. This fact puts emphasis on the precise amount of sold petrol as divergence from exact values of sold amount of this commodity can cause great financial losses (especially on large scale). This paper deals with this problematic by means of creating a mathematical model which describes individual component of the whole logistic chain from the view of measurement uncertainty. This chain includes all the involved steps that are commonly used in most petroleum transport cycles from the source of the product up to the end consumer. The individual components that were taken into consideration are as follows: the manufacturer of fuel, transport logistic, storage at petrol stations and the process of selling the fuel to the end consumer.

The second part of this paper is dedicated to a model which describes these logistic components by means of measurement systems that are used in individual area. The measurements within these systems are the measurements of fuel temperature, flow measurement of fuel during its sale from the manufacturer to the consumer and the fuel level measurement in storage containers at petrol stations. Each logistic component is defined by its influential factor that is connected with process of selling diesel and petrol fuels when we view them from the measurement systems perspective.

2 Model of fuel volume determination in the chain Manufacturer – Transport logistic – Consumer

The model of total volume determination of fuels (1) presented originates from the knowledge that it is strongly dependant on temperature of the material t , its volume V during the re-pumping and the level of the liquid material in a container during storage. The model of total volume determination of fuels (1) previously described can be seen below:

$$V = f(t; V; h) \quad (1)$$

By this model we are able to analyse the current state of fuel volume determination in real conditions by the usage of currently used measurement procedures. In the following Table 1. we can see the overview of volumes that enter into the logistic transport chain of fuels. By each individual component of the chain we can identify a certain volume of the material that needs to be determined by the use of metrological methods. As can be also seen from the Table. 1 the volumes that have been considered were those affected by factors originating from the worst possible conditions, ideal conditions. Based on these two end limits we are able to suggest possible improvements in the volume measurements. It can be furthermore observed that individual monitored volume differs for each chain component even when the volume originating from the manufacturer and the end user should be identical (in ideal conditions). The volume originating from the manufacturer was assigned with the volume symbol V_M . This volume changes as it is taken over by the transporter to a volume V_P . The fuel volume that is stored then at a petrol pump storage container is represented by a volume V_Z and the end user volume is assigned the symbol V_C . After the proposition of the improvement of volume measurement each of the mentioned volumes (V_M, V_P, V_Z, V_C) a correction and the appropriate uncertainty needs to be determined.

Table 1. List of individual volumes that enter the logistic transpiration chain of fuel.

	NOW	IDEAL CONDITION	IMPROVEMENT
REFINERY	V_V	V_{vi}	$V_{KOR1} = V_{VI} - V_V$
			$V_{VYST} = V_{KOR} + V$
TRANSPORT	V_P	V_{pi}	$V_{KOR2} = V_{VI} - V_{V1}$
			$V_{VYST} = V_{KOR} + V_1$
UNDERGROUND TANKS	V_Z	V_{zi}	$V_{KOR3} = V_{VI} - V_{V2}$
			$V_{VYST} = V_{KOR} + V_2$
CUSTOMER	V_S	V_{si}	$V_{KOR4} = V_{VI} - V_{V3}$
			$V_{VYST} = V_{KOR} + V_3$

The resulting uncertainty of volume determination is affected by multiple factors that can vary according to the measured quantity. Tables 2. to 4. list the influential factors that have the potential (low of high) to affect the measured quantities.

The problematic of temperature expansion of materials such as fuels (petrol and diesel) is well known and the temperature volume correction of fuels is a standard procedure used in most field of trade with this commodity. Slovakia is no exception in this case and the standardised correction procedures which include the volume recalculation to 15°C based on the thermal expansion coefficient of standardised petrol and diesel fuels are used on regular basis. The main problem that arises is that these corrections are applied only in the trade that is made between the refinery and the buyer (in most cases petrol station) which usually handle large volumes of the commodity. On a smaller scale of trade there practices (volume recalculation to 15°C) are not that common and can in end result in volume discrepancies originating from temperature changes. The influence of temperature on the volume of reference petrol and diesel fuels can be seen in Fig. 1. Based on the presented graph a change of 1 °C causes either in positive or negative fashion from the reference temperature of 15 °C causes an identical change of the volume by 10l for both petrol and diesel fuels. When considering that the amount of change has a linear tendency the imprecise measurements of temperature can cause significant discrepancies in the actual volume of the fuel.

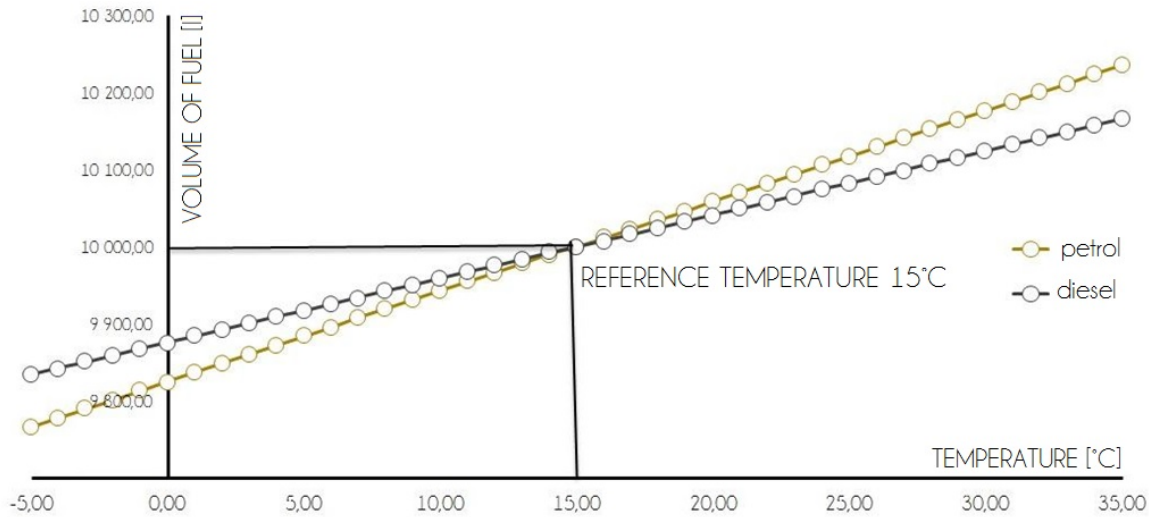


Fig. 1 The temperature volume dependence of car fuels (petrol, diesel).

3 Model of uncertainty determination from the measurement system perspective

In the following Table 2. a list of all the most probable factors that affect the temperature measurements in fuels is presented. As can be seen temperature is monitored and measured in each part of the logistic transportation chain. This is caused by the need to recalculate the volume at every chain segment to 15 °C so the uniformity of the sold fuel volume is ensured. During the establishment of these factors we have taken into account the worse possible conditions to include the widest range of influential factors. The result of this approach of factors determination; is that the fuels are affected by the highest number of influences during the transportation from the manufacturer to the petrol station. This is mainly caused by the fact of large temperature difference between two places that are created when the transported fuel is exposed due the transportation from the source (refinery) to the customer (petrol pump). This significant influential factor does not occur in other chain parts which makes the transportation chain part an important segment for further investigation.

Table 2. List of influential factors that affect the temperature measurements.

PRODUCER	TRANSPORT	STORAGE TANKS	CUSTOMER
temperature in storage tanks $u_{\Delta\tau_Z}$	ambient temperature $u_{\Delta\tau_D}$	ambient temperature $u_{\Delta\tau_D}$	ambient temperature $u_{\Delta\tau_D}$
ambient temperature $u_{\Delta\tau_D}$	temperature of transport tanks $u_{\Delta\tau_C}$	fuel temperature $u_{\Delta\tau_M}$	temperature in the pipeline $u_{\Delta\tau_P}$
temperature in the pipeline $u_{\Delta\tau_P}$	fuel temperature $u_{\Delta\tau_M}$	sensor location $u_{\Delta\tau_{US}}$	temperature in storage tanks $u_{\Delta\tau_N}$
temperature compensation to 15°C $u_{\Delta\tau_{PP}}$	temperature in the pipeline $u_{\Delta\tau_P}$	error of measuring instruments $u_{\Delta\tau_{CHM}}$	temperature compensation to 15°C $u_{\Delta\tau_{PP}}$
homogeneity of the fuel $u_{\Delta\tau_H}$	density of the fuel $u_{\Delta\tau_{\rho B/N}}$	density of the fuel $u_{\Delta\tau_{\rho B/N}}$	homogeneity of the fuel $u_{\Delta\tau_H}$
	error of measuring instruments $u_{\Delta\tau_{CHM}}$	homogeneity of the fuel $u_{\Delta\tau_H}$	
	temperature compensation to 15°C $u_{\Delta\tau_{PP}}$		

Table 3. presents the influential factors that are most likely to be present during the measurements of flow volume within the logistic transportation chain. It is important to note that during the

analysis of the influential factors no factors could be specified within the storage part of the chain as no flow volume measurements are performed.

Table 3. List of influential factors that affect the flow volume measurements.

PRODUCER	TRANSPORT	STORAGE TANKS	CUSTOMER
fluid flow $u_{\Delta Re}$	fluid flow $u_{\Delta Re}$		fluid flow $u_{\Delta Re}$
temperature of the fuel $u_{\Delta tN}$	temperature of the fuel $u_{\Delta tN}$		temperature of the fuel $u_{\Delta tN}$
pressure pumping $u_{\Delta PC}$	pressure pumping $u_{\Delta PC}$		pressure pumping $u_{\Delta PC}$
atmospheric pressure $u_{\Delta tPA}$	atmospheric pressure $u_{\Delta tPA}$		atmospheric pressure $u_{\Delta tPA}$
ambient temperature $u_{\Delta tO}$	ambient temperature $u_{\Delta tO}$		ambient temperature $u_{\Delta tO}$
temperature of transport tanks $u_{\Delta tC}$	temperature of transport tanks $u_{\Delta tC}$		temperature in storage tanks $u_{\Delta tN}$
pipe friction $u_{\Delta FP}$	pipe friction $u_{\Delta FP}$	-	pipe friction $u_{\Delta FP}$
friction in a pipe elbow $u_{\Delta FK}$	density of the fuel $u_{\Delta \rho N}$		friction in a pipe elbow $u_{\Delta FK}$
friction in the joints $u_{\Delta FS}$	error of measuring instruments $u_{\Delta CHM}$		density of the fuel $u_{\Delta \rho N}$
density of the fuel $u_{\Delta \rho N}$	start-up of the flowmeter $u_{\Delta NP}$		error of measuring instruments $u_{\Delta CHM}$
error of measuring instruments $u_{\Delta CHM}$	homogeneity of the fuel $u_{\Delta H}$		wear blades flowmeter $u_{\Delta OL}$
homogeneity of the fuel $u_{\Delta H}$			distance of fuel dispenser $u_{\Delta VSt}$
			homogeneity of the fuel $u_{\Delta H}$

The last measurement process that influential factors were analysed and listed is the measurement of fuel level. The list of all the factors that affect this type of measurements is presented in Table 4. and as can be seen the factors only occur in the storage chain part.

Table 4. List of influential factors that affect the fuel level measurements.

PRODUCER	TRANSPORT	STORAGE TANKS	CUSTOMER
		error of measuring instruments $u_{\Delta CHM}$	
		volume of the tank $u_{\Delta ON}$	
		shape of the tank $u_{\Delta TN}$	
		incline of the tank $u_{\Delta N}$	
		deformation of the tank $u_{\Delta D}$	
		corrosion in the tank $u_{\Delta K}$	
-	-	temperature of the fuel $u_{\Delta tM}$	-
		density of the fuel $u_{\Delta H}$	
		atmospheric pressure $u_{\Delta PA}$	
		subsoil under tanks $u_{\Delta P}$	
		water in the tank $u_{\Delta VN}$	
		shape of the measuring bar $u_{\Delta TT}$	
		point of contact bar $u_{\Delta MD}$	

In the following section we will continue with the model creation that will enable us to determine the individual uncertainty components that are linked to the measurements of temperature, flow volume and fuel level as the knowledge of uncertainty is an essential metrological property that needs to be assigned to a certain measurement method for the purpose of the precision determination.

4 Model of uncertainty evaluation created on the worst possible scenario

Model of uncertainty determination dependant on temperature measurement u_t

$$\mathbf{u}_t = f(u_{tV}; u_{tP}; u_{tZ}; u_{tS})^T \quad (2)$$

The presented model (2) is based on a study where the final volume of fuel is dependent on the measured temperature in each separate segment of the logistic transportation chain. Based on this condition it is a function of volume determination made by the manufacturer u_{tV} , transporter u_{tP} , storage at a petrol station u_{tZ} and form the determination of the sold volume to the end consumer u_{tS} .

Model of uncertainty determination dependant on temperature originating form manufacturer u_{tV} , transporter u_{tP} , fuel storage u_{tZ} and end consumer u_{tS}

$$\begin{aligned} u_{tV} &= u_{\Delta tZ} + u_{\Delta tQ} + u_{\Delta tP} + u_{\Delta tPF} + u_{\Delta tH} \\ u_{tP} &= u_{\Delta tQ} + u_{\Delta tC} + u_{\Delta tM} + u_{\Delta tP} + u_{\Delta tRBN} + u_{\Delta tCHM} + u_{\Delta tPF} + u_{\Delta tH} \\ u_{tZ} &= u_{\Delta tQ} + u_{\Delta tM} + u_{\Delta tUS} + u_{\Delta tCHM} + u_{\Delta tRM} + u_{\Delta tH} \\ u_{tS} &= u_{\Delta tQ} + u_{\Delta tPF} + u_{\Delta tN} + u_{\Delta tP} + u_{\Delta tH} \end{aligned}$$

The presented model originates form the analysis of weaknesses in temperature measurements of individual components within the logistic transportation chain of fuels.

Matrix model of uncertainty determination dependant on temperature originating from the manufacturer u_{tV}

$$\mathbf{U}_{tV} = \mathbf{A} \mathbf{U}_{tV} \mathbf{A}^T \quad (3)$$

The design matrix of fuel volume uncertainty caused by temperature change is created by a partial derivation of the previously set model (3) for each individual variable. The partial derivation that leads to the design matrix (5) can be seen in the equation (4).

$$\mathbf{A} = \frac{\partial u_{tV}}{\partial \Delta} = \frac{\partial (u_{\Delta tZ} + u_{\Delta tQ} + u_{\Delta tP} + u_{\Delta tPF} + u_{\Delta tH})}{\partial \Delta} \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = (1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1) \quad (5)$$

The covariance matrix of fuel volume uncertainty caused by temperature change (6) has the following shape:

$$\mathbf{U}_{tV} = \begin{pmatrix} u_{\Delta tZ}^2 & u_{(\Delta tZ \Delta tQ)} & u_{(\Delta tZ \Delta tP)} & u_{(\Delta tZ \Delta tPF)} & u_{(\Delta tZ \Delta tH)} \\ u_{(\Delta tZ \Delta tQ)} & u_{\Delta tQ}^2 & u_{(\Delta tQ \Delta tP)} & u_{(\Delta tQ \Delta tPF)} & u_{(\Delta tQ \Delta tH)} \\ u_{(\Delta tZ \Delta tP)} & u_{(\Delta tQ \Delta tP)} & u_{\Delta tP}^2 & u_{(\Delta tP \Delta tPF)} & u_{(\Delta tP \Delta tH)} \\ u_{(\Delta tZ \Delta tPF)} & u_{(\Delta tQ \Delta tPF)} & u_{(\Delta tP \Delta tPF)} & u_{\Delta tPF}^2 & u_{(\Delta tPF \Delta tH)} \\ u_{(\Delta tZ \Delta tH)} & u_{(\Delta tQ \Delta tH)} & u_{(\Delta tP \Delta tH)} & u_{(\Delta tPF \Delta tH)} & u_{\Delta tH}^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

The transpose of the design matrix (5) has the form that can be seen in relation (7).

$$\mathbf{A}^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Matrix model of uncertainty determination dependant on temperature originating from the transporter u_{tP}

$$U_{tP} = A U_{tP} A^T \quad (8)$$

The design matrix of fuel volume uncertainty caused by temperature change is created by a partial derivation of the previously set model (8) for each individual variable. The partial derivation that leads to the design matrix (10) can be seen in the equation (9).

$$A = \frac{\partial u_{tP}}{\partial \Delta} = \frac{\partial (w_{\Delta tO} + w_{\Delta tC} + w_{\Delta tM} + w_{\Delta tF} + w_{\Delta t_{EB/IN}} + w_{\Delta t_{CHM}} + w_{\Delta t_{FF}} + w_{\Delta tH})}{\partial \Delta} \quad (9)$$

$$A = (1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1) \quad (10)$$

The covariance matrix of fuel volume uncertainty caused by temperature change (11) has the following shape:

$$U_{tP} = \begin{pmatrix} w_{\Delta tO}^2 & w_{\Delta tO}w_{\Delta tC} & w_{\Delta tO}w_{\Delta tM} & w_{\Delta tO}w_{\Delta tF} & w_{\Delta tO}w_{\Delta t_{EB/IN}} & w_{\Delta tO}w_{\Delta t_{CHM}} & w_{\Delta tO}w_{\Delta t_{FF}} & w_{\Delta tO}w_{\Delta tH} \\ w_{\Delta tO}w_{\Delta tC} & w_{\Delta tC}^2 & w_{\Delta tC}w_{\Delta tM} & w_{\Delta tC}w_{\Delta tF} & w_{\Delta tC}w_{\Delta t_{EB/IN}} & w_{\Delta tC}w_{\Delta t_{CHM}} & w_{\Delta tC}w_{\Delta t_{FF}} & w_{\Delta tC}w_{\Delta tH} \\ w_{\Delta tO}w_{\Delta tM} & w_{\Delta tC}w_{\Delta tM} & w_{\Delta tM}^2 & w_{\Delta tM}w_{\Delta tF} & w_{\Delta tM}w_{\Delta t_{EB/IN}} & w_{\Delta tM}w_{\Delta t_{CHM}} & w_{\Delta tM}w_{\Delta t_{FF}} & w_{\Delta tM}w_{\Delta tH} \\ w_{\Delta tO}w_{\Delta tF} & w_{\Delta tC}w_{\Delta tF} & w_{\Delta tM}w_{\Delta tF} & w_{\Delta tF}^2 & w_{\Delta tF}w_{\Delta t_{EB/IN}} & w_{\Delta tF}w_{\Delta t_{CHM}} & w_{\Delta tF}w_{\Delta t_{FF}} & w_{\Delta tF}w_{\Delta tH} \\ w_{\Delta tO}w_{\Delta t_{EB/IN}} & w_{\Delta tC}w_{\Delta t_{EB/IN}} & w_{\Delta tM}w_{\Delta t_{EB/IN}} & w_{\Delta tF}w_{\Delta t_{EB/IN}} & w_{\Delta t_{EB/IN}}^2 & w_{\Delta t_{EB/IN}}w_{\Delta t_{CHM}} & w_{\Delta t_{EB/IN}}w_{\Delta t_{FF}} & w_{\Delta t_{EB/IN}}w_{\Delta tH} \\ w_{\Delta tO}w_{\Delta t_{CHM}} & w_{\Delta tC}w_{\Delta t_{CHM}} & w_{\Delta tM}w_{\Delta t_{CHM}} & w_{\Delta tF}w_{\Delta t_{CHM}} & w_{\Delta t_{EB/IN}}w_{\Delta t_{CHM}} & w_{\Delta t_{CHM}}^2 & w_{\Delta t_{CHM}}w_{\Delta t_{FF}} & w_{\Delta t_{CHM}}w_{\Delta tH} \\ w_{\Delta tO}w_{\Delta t_{FF}} & w_{\Delta tC}w_{\Delta t_{FF}} & w_{\Delta tM}w_{\Delta t_{FF}} & w_{\Delta tF}w_{\Delta t_{FF}} & w_{\Delta t_{EB/IN}}w_{\Delta t_{FF}} & w_{\Delta t_{CHM}}w_{\Delta t_{FF}} & w_{\Delta t_{FF}}^2 & w_{\Delta t_{FF}}w_{\Delta tH} \\ w_{\Delta tO}w_{\Delta tH} & w_{\Delta tC}w_{\Delta tH} & w_{\Delta tM}w_{\Delta tH} & w_{\Delta tF}w_{\Delta tH} & w_{\Delta t_{EB/IN}}w_{\Delta tH} & w_{\Delta t_{CHM}}w_{\Delta tH} & w_{\Delta t_{FF}}w_{\Delta tH} & w_{\Delta tH}^2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

The transpose of the design matrix (10) has the form that can be seen in relation (12).

$$A^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Matrix model of uncertainty determination dependant on temperature originating form fuel storage u_{tZ}

$$U_{tZ} = A U_{tZ} A^T \quad (13)$$

The design matrix of fuel volume uncertainty caused by temperature change is created by a partial derivation of the previously set model (13) for each individual variable. The partial derivation that leads to the design matrix (15) can be seen in the equation (14).

$$A = \frac{\partial u_{tZ}}{\partial \Delta} = \frac{\partial (w_{\Delta tO} + w_{\Delta tM} + w_{\Delta tUS} + w_{\Delta t_{CHM}} + w_{\Delta t_{PM}} + w_{\Delta tH})}{\partial \Delta} \quad (14)$$

$$A = (\mathbf{1} \ \mathbf{1} \ \mathbf{1} \ \mathbf{1} \ \mathbf{1} \ \mathbf{1}) \quad (15)$$

The covariance matrix of fuel volume uncertainty caused by temperature change (16) has the following shape:

$$U_{t_Z} = \begin{pmatrix} u_{\Delta t_Q^2} & u_{(\Delta t_Q \Delta t_M)} & u_{(\Delta t_Q \Delta t_{US})} & u_{(\Delta t_Q \Delta t_{CHM})} & u_{(\Delta t_Q \Delta t_{\rho M})} & u_{(\Delta t_Q \Delta t_H)} \\ u_{(\Delta t_Q \Delta t_M)} & u_{\Delta t_M^2} & u_{(\Delta t_M \Delta t_{US})} & u_{(\Delta t_M \Delta t_{CHM})} & u_{(\Delta t_M \Delta t_{\rho M})} & u_{(\Delta t_M \Delta t_H)} \\ u_{(\Delta t_Q \Delta t_{US})} & u_{(\Delta t_M \Delta t_{US})} & u_{\Delta t_{US}^2} & u_{(\Delta t_{US} \Delta t_{CHM})} & u_{(\Delta t_{US} \Delta t_{\rho M})} & u_{(\Delta t_{US} \Delta t_H)} \\ u_{(\Delta t_Q \Delta t_{CHM})} & u_{(\Delta t_M \Delta t_{CHM})} & u_{(\Delta t_{US} \Delta t_{CHM})} & u_{\Delta t_{CHM}^2} & u_{(\Delta t_{CHM} \Delta t_{\rho M})} & u_{(\Delta t_{CHM} \Delta t_H)} \\ u_{(\Delta t_Q \Delta t_{\rho M})} & u_{(\Delta t_M \Delta t_{\rho M})} & u_{(\Delta t_{US} \Delta t_{\rho M})} & u_{(\Delta t_{CHM} \Delta t_{\rho M})} & u_{\Delta t_{\rho M}^2} & u_{(\Delta t_{\rho M} \Delta t_H)} \\ u_{(\Delta t_Q \Delta t_H)} & u_{(\Delta t_M \Delta t_H)} & u_{(\Delta t_{US} \Delta t_H)} & u_{(\Delta t_{CHM} \Delta t_H)} & u_{(\Delta t_{\rho M} \Delta t_H)} & u_{\Delta t_H^2} \end{pmatrix} \quad (16)$$

The transpose of the design matrix (15) has the form that can be seen in relation (17).

$$A^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Matrix model of uncertainty determination dependant on temperature originating form end consumer u_{t_S}

$$U_{t_S} = A U_{t_Z} A^T \quad (18)$$

The design matrix of fuel volume uncertainty caused by temperature change is created by a partial derivation of the previously set model (18) for each individual variable. The partial derivation that leads to the design matrix (20) can be seen in the equation (19).

$$A = \frac{\partial u_{t_S}}{\partial \Delta} = \frac{\partial (u_{\Delta t_Q} + u_{\Delta t_{FF}} + u_{\Delta t_N} + u_{\Delta t_P} + u_{\Delta t_H})}{\partial \Delta} \quad (19)$$

$$A = (\mathbf{1} \ \mathbf{1} \ \mathbf{1} \ \mathbf{1} \ \mathbf{1}) \quad (20)$$

The covariance matrix of fuel volume uncertainty caused by temperature change (21) has the following shape:

$$U_{t_S} = \begin{pmatrix} u_{(\Delta t_Q)^2} & u_{(\Delta t_Q \Delta t_{FF})} & u_{(\Delta t_Q \Delta t_N)} & u_{(\Delta t_Q \Delta t_P)} & u_{(\Delta t_Q \Delta t_H)} \\ u_{(\Delta t_Q \Delta t_{FF})} & u_{(\Delta t_{FF})^2} & u_{(\Delta t_{FF} \Delta t_N)} & u_{(\Delta t_{FF} \Delta t_P)} & u_{(\Delta t_{FF} \Delta t_H)} \\ u_{(\Delta t_Q \Delta t_N)} & u_{(\Delta t_{FF} \Delta t_N)} & u_{\Delta t_N^2} & u_{(\Delta t_N \Delta t_P)} & u_{(\Delta t_N \Delta t_H)} \\ u_{(\Delta t_Q \Delta t_P)} & u_{(\Delta t_{FF} \Delta t_P)} & u_{(\Delta t_N \Delta t_P)} & u_{\Delta t_P^2} & u_{(\Delta t_P \Delta t_H)} \\ u_{(\Delta t_Q \Delta t_H)} & u_{(\Delta t_{FF} \Delta t_H)} & u_{(\Delta t_N \Delta t_H)} & u_{(\Delta t_P \Delta t_H)} & u_{\Delta t_H^2} \end{pmatrix} \quad (21)$$

The transpose of the design matrix (20) has the form that can be seen in relation (22).

$$A^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Model of uncertainty determination dependant on volume flow u_V

$$u_V = f(u_{VV}; u_{VP}; u_{VS})^T \quad (23)$$

The presented model (23) is based on a study where the final volume of fuel is dependent on the measured volume flow in each separate segment of the logistic transportation chain. Based on this condition it is a function of volume determination made by the manufacturer u_{VV} , transporter u_{VP} , and the determination of the sold volume to the end consumer u_{VS} .

Model of uncertainty determination dependant on volume flow originating from manufacturer u_{VV} , transporter u_{VP} , and end consumer u_{VS}

$$u_{VV} = u_{\Delta RE} + u_{\Delta CN} + u_{\Delta FC} + u_{\Delta FFA} + u_{\Delta IO} + u_{\Delta IC} + u_{\Delta FF} + u_{\Delta FK} + u_{\Delta FS} + u_{\Delta PN} + u_{\Delta CHM} + u_{\Delta H}$$

$$u_{VP} = u_{\Delta RE} + u_{\Delta CN} + u_{\Delta FC} + u_{\Delta FFA} + u_{\Delta IO} + u_{\Delta IC} + u_{\Delta FF} + u_{\Delta PN} + u_{\Delta CHM} + u_{\Delta NF} + u_{\Delta H}$$

$$u_{VS} = u_{\Delta RE} + u_{\Delta CN} + u_{\Delta FC} + u_{\Delta FFA} + u_{\Delta IO} + u_{\Delta IC} + u_{\Delta FF} + u_{\Delta FK} + u_{\Delta PN} + u_{\Delta CHM} + u_{\Delta OL} + u_{\Delta VSc} + u_{\Delta H}$$

The presented model originates from the analysis of weaknesses in volume flow measurements of individual components within the logistic transportation chain of fuels. The chain segment dedicated to the storage of fuels was excluded due to the fact that volume flow is not measured in this specific chain part.

Matrix model of uncertainty determination dependant on volume originating from the manufacturer u_{VV}

$$U_{VV} = A U_{VV} A^T \quad (24)$$

The design matrix of fuel volume uncertainty caused by volume flow measurements is created by a partial derivation of the previously set model (24) for each individual variable. The partial derivation that leads to the design matrix (26) can be seen in the equation (25).

$$A = \frac{\partial u_{VV}}{\partial \Delta} = \frac{\partial (u_{\Delta RE} + u_{\Delta CN} + u_{\Delta FC} + u_{\Delta FFA} + u_{\Delta IO} + u_{\Delta IC} + u_{\Delta FF} + u_{\Delta FK} + u_{\Delta FS} + u_{\Delta PN} + u_{\Delta CHM} + u_{\Delta H})}{\partial \Delta} \quad (25)$$

$$A = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1) \quad (26)$$

The covariance matrix of fuel volume uncertainty caused by volume flow measurements (27) has the following shape:

The presented model originates from the analysis of weaknesses in fuel level measurements of fuel storage component within the logistic transportation chain of fuels.

Matrix model of uncertainty determination of fuel volume dependant on fuel level measurements originating from the fuel storage

$$U_{h,E} = A U_{h,z} A^T \tag{40}$$

The design matrix of fuel volume uncertainty caused by volume flow measurements is created by a partial derivation of the previously set model (40) for each individual variable. The partial derivation that leads to the design matrix (42) can be seen in the equation (41).

$$A = \frac{\partial u_{h,z}}{\partial \Delta} = \frac{\partial (u_{\Delta CHM} + u_{\Delta QN} + u_{\Delta FX} + u_{\Delta N} + u_{\Delta D} + u_{\Delta K} + u_{\Delta IM} + u_{\Delta H} + u_{\Delta FA} + u_{\Delta F} + u_{\Delta VN} + u_{\Delta TT} + u_{\Delta ND})}{\partial \Delta} \tag{41}$$

$$A = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1) \tag{42}$$

The covariance matrix of fuel volume uncertainty caused by volume flow measurements (43) has the following shape:

$$U_{h,z} = \begin{pmatrix} u_{\Delta CHM}^2 & u_{\Delta CHM}u_{\Delta QN} & u_{\Delta CHM}u_{\Delta FX} & u_{\Delta CHM}u_{\Delta N} & u_{\Delta CHM}u_{\Delta D} & u_{\Delta CHM}u_{\Delta K} & u_{\Delta CHM}u_{\Delta IM} & u_{\Delta CHM}u_{\Delta H} & u_{\Delta CHM}u_{\Delta FA} & u_{\Delta CHM}u_{\Delta F} & u_{\Delta CHM}u_{\Delta VN} & u_{\Delta CHM}u_{\Delta TT} & u_{\Delta CHM}u_{\Delta ND} \\ u_{\Delta CHM}u_{\Delta QN} & u_{\Delta QN}^2 & u_{\Delta QN}u_{\Delta FX} & u_{\Delta QN}u_{\Delta N} & u_{\Delta QN}u_{\Delta D} & u_{\Delta QN}u_{\Delta K} & u_{\Delta QN}u_{\Delta IM} & u_{\Delta QN}u_{\Delta H} & u_{\Delta QN}u_{\Delta FA} & u_{\Delta QN}u_{\Delta F} & u_{\Delta QN}u_{\Delta VN} & u_{\Delta QN}u_{\Delta TT} & u_{\Delta QN}u_{\Delta ND} \\ u_{\Delta CHM}u_{\Delta FX} & u_{\Delta QN}u_{\Delta FX} & u_{\Delta FX}^2 & u_{\Delta FX}u_{\Delta N} & u_{\Delta FX}u_{\Delta D} & u_{\Delta FX}u_{\Delta K} & u_{\Delta FX}u_{\Delta IM} & u_{\Delta FX}u_{\Delta H} & u_{\Delta FX}u_{\Delta FA} & u_{\Delta FX}u_{\Delta F} & u_{\Delta FX}u_{\Delta VN} & u_{\Delta FX}u_{\Delta TT} & u_{\Delta FX}u_{\Delta ND} \\ u_{\Delta CHM}u_{\Delta N} & u_{\Delta QN}u_{\Delta N} & u_{\Delta FX}u_{\Delta N} & u_{\Delta N}^2 & u_{\Delta N}u_{\Delta D} & u_{\Delta N}u_{\Delta K} & u_{\Delta N}u_{\Delta IM} & u_{\Delta N}u_{\Delta H} & u_{\Delta N}u_{\Delta FA} & u_{\Delta N}u_{\Delta F} & u_{\Delta N}u_{\Delta VN} & u_{\Delta N}u_{\Delta TT} & u_{\Delta N}u_{\Delta ND} \\ u_{\Delta CHM}u_{\Delta D} & u_{\Delta QN}u_{\Delta D} & u_{\Delta FX}u_{\Delta D} & u_{\Delta N}u_{\Delta D} & u_{\Delta D}^2 & u_{\Delta D}u_{\Delta K} & u_{\Delta D}u_{\Delta IM} & u_{\Delta D}u_{\Delta H} & u_{\Delta D}u_{\Delta FA} & u_{\Delta D}u_{\Delta F} & u_{\Delta D}u_{\Delta VN} & u_{\Delta D}u_{\Delta TT} & u_{\Delta D}u_{\Delta ND} \\ u_{\Delta CHM}u_{\Delta K} & u_{\Delta QN}u_{\Delta K} & u_{\Delta FX}u_{\Delta K} & u_{\Delta N}u_{\Delta K} & u_{\Delta D}u_{\Delta K} & u_{\Delta K}^2 & u_{\Delta K}u_{\Delta IM} & u_{\Delta K}u_{\Delta H} & u_{\Delta K}u_{\Delta FA} & u_{\Delta K}u_{\Delta F} & u_{\Delta K}u_{\Delta VN} & u_{\Delta K}u_{\Delta TT} & u_{\Delta K}u_{\Delta ND} \\ u_{\Delta CHM}u_{\Delta IM} & u_{\Delta QN}u_{\Delta IM} & u_{\Delta FX}u_{\Delta IM} & u_{\Delta N}u_{\Delta IM} & u_{\Delta D}u_{\Delta IM} & u_{\Delta K}u_{\Delta IM} & u_{\Delta IM}^2 & u_{\Delta IM}u_{\Delta H} & u_{\Delta IM}u_{\Delta FA} & u_{\Delta IM}u_{\Delta F} & u_{\Delta IM}u_{\Delta VN} & u_{\Delta IM}u_{\Delta TT} & u_{\Delta IM}u_{\Delta ND} \\ u_{\Delta CHM}u_{\Delta H} & u_{\Delta QN}u_{\Delta H} & u_{\Delta FX}u_{\Delta H} & u_{\Delta N}u_{\Delta H} & u_{\Delta D}u_{\Delta H} & u_{\Delta K}u_{\Delta H} & u_{\Delta IM}u_{\Delta H} & u_{\Delta H}^2 & u_{\Delta H}u_{\Delta FA} & u_{\Delta H}u_{\Delta F} & u_{\Delta H}u_{\Delta VN} & u_{\Delta H}u_{\Delta TT} & u_{\Delta H}u_{\Delta ND} \\ u_{\Delta CHM}u_{\Delta FA} & u_{\Delta QN}u_{\Delta FA} & u_{\Delta FX}u_{\Delta FA} & u_{\Delta N}u_{\Delta FA} & u_{\Delta D}u_{\Delta FA} & u_{\Delta K}u_{\Delta FA} & u_{\Delta IM}u_{\Delta FA} & u_{\Delta H}u_{\Delta FA} & u_{\Delta FA}^2 & u_{\Delta FA}u_{\Delta F} & u_{\Delta FA}u_{\Delta VN} & u_{\Delta FA}u_{\Delta TT} & u_{\Delta FA}u_{\Delta ND} \\ u_{\Delta CHM}u_{\Delta F} & u_{\Delta QN}u_{\Delta F} & u_{\Delta FX}u_{\Delta F} & u_{\Delta N}u_{\Delta F} & u_{\Delta D}u_{\Delta F} & u_{\Delta K}u_{\Delta F} & u_{\Delta IM}u_{\Delta F} & u_{\Delta H}u_{\Delta F} & u_{\Delta FA}u_{\Delta F} & u_{\Delta F}^2 & u_{\Delta F}u_{\Delta VN} & u_{\Delta F}u_{\Delta TT} & u_{\Delta F}u_{\Delta ND} \\ u_{\Delta CHM}u_{\Delta VN} & u_{\Delta QN}u_{\Delta VN} & u_{\Delta FX}u_{\Delta VN} & u_{\Delta N}u_{\Delta VN} & u_{\Delta D}u_{\Delta VN} & u_{\Delta K}u_{\Delta VN} & u_{\Delta IM}u_{\Delta VN} & u_{\Delta H}u_{\Delta VN} & u_{\Delta FA}u_{\Delta VN} & u_{\Delta F}u_{\Delta VN} & u_{\Delta VN}^2 & u_{\Delta VN}u_{\Delta TT} & u_{\Delta VN}u_{\Delta ND} \\ u_{\Delta CHM}u_{\Delta TT} & u_{\Delta QN}u_{\Delta TT} & u_{\Delta FX}u_{\Delta TT} & u_{\Delta N}u_{\Delta TT} & u_{\Delta D}u_{\Delta TT} & u_{\Delta K}u_{\Delta TT} & u_{\Delta IM}u_{\Delta TT} & u_{\Delta H}u_{\Delta TT} & u_{\Delta FA}u_{\Delta TT} & u_{\Delta F}u_{\Delta TT} & u_{\Delta VN}u_{\Delta TT} & u_{\Delta TT}^2 & u_{\Delta TT}u_{\Delta ND} \\ u_{\Delta CHM}u_{\Delta ND} & u_{\Delta QN}u_{\Delta ND} & u_{\Delta FX}u_{\Delta ND} & u_{\Delta N}u_{\Delta ND} & u_{\Delta D}u_{\Delta ND} & u_{\Delta K}u_{\Delta ND} & u_{\Delta IM}u_{\Delta ND} & u_{\Delta H}u_{\Delta ND} & u_{\Delta FA}u_{\Delta ND} & u_{\Delta F}u_{\Delta ND} & u_{\Delta VN}u_{\Delta ND} & u_{\Delta TT}u_{\Delta ND} & u_{\Delta ND}^2 \end{pmatrix} \tag{43}$$

The transpose of the design matrix (34) has the form that can be seen in relation (44).

$$A^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{44}$$

5 Conclusions

The intention of the presented study is to include all the most probable factors that may affect the precision of fuel volume determination. Further part of the study is dedicated to identify weak spots of measuring processes that are involved in the final fuel volume determination together with the transformation of these findings into an uncertainty of fuel volume determination. Based on the determined system relations, taking into account the selected resolution level the system is divided into individual parts. The investigation of these parts was done under the condition that they act as one system including their goals, which is the deamination of the overall uncertainty of fuel volume measurement. The subject under investigation is seen as a dynamic one what means that the changes of state, behaviour and structure like the change of surrounding environment, material properties and measuring devices are accounted for. The presented mathematical model of uncertainty evaluation describes the largest possible value of uncertainty of fuel volume determination that is based on all the possible influences that could affect this measured quantity. It is possible to eliminate these influences when individual parts of the logistic transportation chain are analysed and properly modified. This fact means that the model can consist only of such a number of influential factors as how many will be appropriate for the individual case. A model constructed in such fashion can be modified to any fuel volume measuring process, which can help to obtain the uncertainty and the precision of the measured fuel volume, can also be tool for the possible modification in the measurements of monitored quantities within the logistic transport chain and can bring a reduction of financial losses caused by distorted fuel volume values.

6 Acknowledgment

The authors would like to thank the Faculty of Engineering of the Slovak University of Technology, the grant agency VEGA – grant No. 1/0604/15, No. 1/0748/15 and KEGA project No. 014STU-4/2015 and furthermore to the SAPPO - Slovak Association of Petroleum Industry and Trade for their support that made the creation of this paper possible.

7 References

- [1] CHUDÝ, V. – PALENČÁR, R. – KUREKOVÁ, E. – HALAJ, M.: *Meranie technických veličín*, STU Bratislava, 1999, ISBN 80-227-1275-2.

- [2] ĎURIŠ, S. – MUSIL, S. 2002. *Metrológia a kvalita*. Bratislava: Grafické štúdio Ing. Peter Juriga, 2002, ISBN 80-89112-00-5
- [3] DOVICA, M. a kol.: *Metrológia v strojárstve*, Emilena Košice, 2006, ISBN 80-8073-4070
- [4] PALENČÁR R., RUIZ J. M., JANIGA I., HORNÍKOVÁ A.: *Štatistické metódy v metrologických a skúšobných laboratóriách*. Grafické štúdio Ing. Peter Juriga Bratislava, 2001. ISBN 80-968449-3-8.
- [5] BLAŽEK, J., RÁBL, V., *Základy zpracování a využití ropy*. 2. vydání. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Praha 2006. 254 s. ISBN 80-7080-619-2+

The Key Performance Indicators of the Technological Processes

BARANOVÁ, Vladena¹, LANDRYOVÁ, Lenka²

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

² doc. Ing. CSc. ✉ Department of Control Systems and Instrumentation VSB – Technical University Ostrava, Ostrava, Czech Republic, 📧 lenka.landryova@vsb.cz

Abstract: nowadays the creation of the researched process mathematical models is needed especially for the research area. The process (processing system) mathematical modeling and their subsequent simulation provides the possibility of comparison (validation) of the monitored required and target values with the actually measured values. Demands on the created models accuracy increase due to increasing demands on the quality of the monitored process. For the technologically difficult processes in the metallurgy and mining areas the quality process is important in order to optimizing them from the point of view of the energetic, material or time savings.

The article deals with determining key performance indicators KPIs of the difficult technological processes. There are the refining steel process in oxygen converter, the rock disintegration process by rotary drilling and the rock boring by TBM method. The starting point for the research of the rock disintegration process by TBM method used by the exploratory gallery boring of the tunnel Branisko, were the findings gained during the rock disintegration process by drilling on the experimental stand in the Institute of Geotechnics of the Slovak Academy of Sciences in Košice. The objective of analysis and mentioned process models creation was their optimization and strategically important input and output variables visualization at different control levels.

Keywords: KPI, process, model, system boring machine – rock, visualization

1 Introduction

The basis of the research project, which dealt with development of support systems for the steelmaking in the oxygen converter, focused on negative phenomena of optical recording (outbursts and ejections) by two industrial cameras. The intention was to assess its suitability for this negative phenomena prediction [KOSTÚR A KOL., 1997].

The next project analyzed a process of the rock disintegration by the rotary drilling on the experimental stand, realized in the Institute of Geotechnics of the Slovak Academy of Sciences in Košice, in order to optimize the disintegration process, with its diagnostics and control using information technology. Due to energetic principles of the rock disintegration the research aimed at the minimum consumption of a specific volume of the disintegration work and maximum life of the disconnecting elements. The findings of the rock disintegration process by the rotary drilling on the experimental stand formed the rock disintegration process analysis by TBM method. The basis for the processing provided data and findings by boring process monitoring of the exploration gallery of tunnel Branisko.

2 The Key Performance Indicators KPIs and its use in the process industry

In the process industry the manufacturing operations are running continuously in time. The process control requires modeling, process variables measurement, feedback control design, process control information system as well as optimization of its output and controlled variable target values. Process and system performance optimization is possible by primary data on – line measurement, its analysis and subsequent transformation into information about exactly defined parameters.

Data and KPIs access can be ensured by user friendly interface providing visualization and separate views of the raw data, KPI analysis or KPI monitoring. Data evaluation from a monitored process give KPIs, which allow faster decision – making with the result of better performance. Continuous KPI analysis is done by local or remote access connection to the process and is ensured by software tool for automatic data collection. Visualization and capability process analysis as well as control of monitored parameters in a real time provides the possibility of early regulatory intervention and prevents material, financial or time loss.

3 The probabilistic mathematical models creation based on the video data processing by refining steel process

The analytical approach advantage in mathematical modeling is the possibility to determine and assess dynamic characteristics before its own object implementation. The obtained models can also be applied for proposal, design and simulation of dynamic systems, which will be shown later in this contribution.

A mathematical model obtained by an analysis of input and output variable courses describes a system as well as input - output object behavior [ROHAL - ILKIV, 1985].

The negative phenomena models of the steel refining process were based on records of 30 heats, where each of them was accompanied by outbursts and at least one ejection. The outburst is spraying and spluttering steel drops visually manifested by whipping flames from the converter neck. The ejection is visually identified as a phenomena, by which the converter is in the flames and from its neck slag and molten pieces are spluttering. Occurrence of outbursts and ejections in the process of refining steel in an oxygen converter is not desirable because of the significant financial, material, time and energy losses. The data analysis obtained by the refining steel process was based on the assumption that the observed phenomena were the result of action of some „unregulated” variables during refining steel process and effected not only the process but also its result [KOSTÚR A KOL., 1997].

In Figure 1 we can see a model that describes the relationship between outbursts and ejections. Strong correlation between model and measured values of outburst or ejections beginning time confirms the correlation coefficient value $R^2 = 0.9628$, respectively coefficient of reliability. After outburst we can expect ejection.

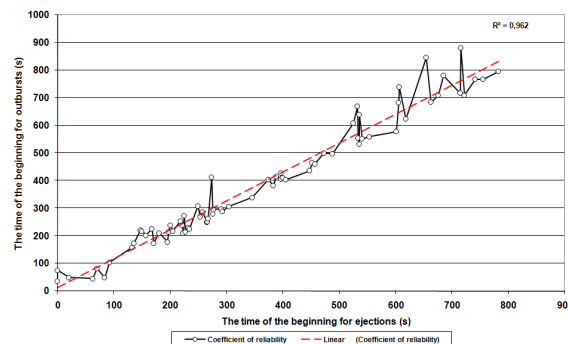


Figure 1- Model of interdependence between outbursts and ejections

Other models may be created in the form of Shewhart control charts and 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. Capability index 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:

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

After calculation $C_{pmoutburst} = 0.575$ and $C_{pmenjection} = 0.5942$, and subsequently after determining the process capability indices, one of the KPI characteristics can be assigned to them. This provides an area for the KPI application in the steelmaking process, assuming that qualitative and quantitative parameters are defined for input as an additive to the slag (C, Si, P, Mn, S_{max} , scrap). The determination of the input KPI is an important factor for a comprehensive process assessment, both in terms of its yield, but also looking at the causes of the reduction in performance. The steelmaking process in oxygen converters is one of many high-tech processes, which highlights the need for knowledge about the process on both the inputs and outputs. The refining process input in the oxygen converter is the slag, which represents individual KPIs. Due to the large amount of input elements in the process, it is advisable to choose a specific KPI, which monitoring is, in terms of its impact on the process, crucial. The output of the process is the desired type of steel in terms of its quality. In a view of the fact that the research project dealt with the negative phenomena videos evaluation of the steelmaking process, without following a defined qualitative and quantitative inputs, mentioned experiences were reflected in the analysis of the similarly complex process, the rock mass disintegration process.

By specifying the input and output rock disintegration process variables of the deep mined drilling and boring, the process can be controlled at its all levels in order to avoid the possible reduction of its performance and to achieve the desired targets.

4 The model creation by rotary rock disintegration on the experimental stand

On the dynamic system indenter - rock two crucial input values affect the process – the downforce F and revolutions n , representing KPIs. Measurable system outputs are the power consumption P_l and drilled length L variables, whose values were recorded as time series.

In general, the indenter – rock system can be described by the equations for operating point and its vicinity:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (2)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{c}^T \mathbf{x}(t) + \mathbf{d}u(t) \quad (3)$$

where (2) is the equation of state, and (3) is an output equation, $\mathbf{x}(t)$ is the vector of state variables dimension n , \mathbf{A} - state matrix (matrix dynamics matrix of the system) of order n , \mathbf{b} - the state vector the input dimension n , \mathbf{c} - output vector status n , \mathbf{d} - constant transfer [VÍTEČKOVÁ, VÍTEČEK, 2008].

Input values system indenter - rock created the need for high capacity constant input values of respect due to the continuous experiments to study rock disintegration by rotary drilling.

Values of input and output derived from experiments are, from the physical point of view, values of a random process, the implementation, whose properties can be described by statistical characteristics [NOSKIEVIČ, 1999]. The mathematical description of the characteristics of a random process is based on probability theory and statistics [BALÁTĚ, 1979 UNBEHAUEN 1995; ISERMANN 1992; TUMA, 1998].

In Figure 2 we can observe the oscillation index values in the range of $C_{pm1} \in (0,029799; 0,030105)$. It is caused by vibrating the value of the monitored signal around its mean value. The index value is moving away or closer to the desired value (in this case higher) and it is possible to follow the trend of the observed variable. All progress is therefore C_{pm1} development index over time, based on which we can determine its value in the desired time interval. Then it is possible to determine whether it satisfies the requirements of the experiment (process) or not. It is also possible to determine the trend of the development, if the index value departs from its desired value or not. Process capability index values for these applications depend on the nature of the process. The value or range of values can be determined a priori and then they can be controlled during the experiment.

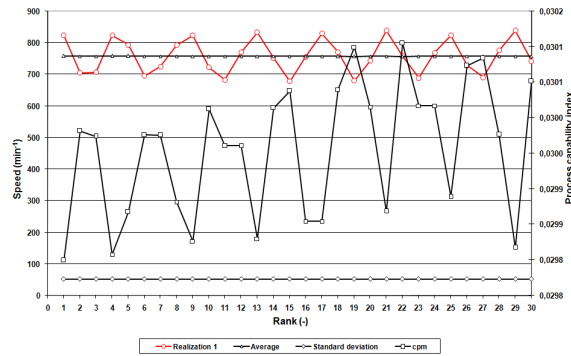


Figure 2 - Realization1 of a course, mean, standard deviation and capacity factor C_{pm1} at time

The conventional way of the optimum determination for the indenter – rock system is the use of rock disintegration energy theory that describes the specific disintegration energy or working capacity isolating tool φ [KUMIČÁKOVÁ, POPPEOVÁ, 1994].

In the search for optimum energy by the disintegration of rock disintegration theory it is based on the instantaneous speed of the process disintegrating tool, specific volume work of disintegration, depending on downforce, respectively revolutions.

Disintegration energy density w is the ratio of the amount of energy delivered to the system and disintegrated rock volume V .

$$w = \frac{P_1}{V} \quad (4)$$

Working ability isolating instrument φ is the ratio of the instantaneous velocity v and disintegration energy density w

$$\varphi = \frac{v}{w} \quad (5)$$

where the ability to work of the disintegrating instrument is dependent on the downforce F and revolutions n .

The optimal mode of the disintegration set operating point and its surroundings is determined by the minimum energy density w or disintegration maximum value of incapacitation isolating tool φ . The energy signal is one of a number of energy signals used in the process of disintegration of the transformed energy fed to the tool [KRÚPA, V., PINKA, J., 1998].

Experiments carried out in laboratory conditions in the Institute of Geotechnics of the Slovak Academy of Sciences in Košice enable the application of evolutionary planning methods in pursuit of two input variables (factors), which were maintained at approximately constant value in the system, namely: downforce and revolutions.

In Figure 3, we can monitor the progress of measuring energy disintegration, which is calculated according to equation (4), depending on speed and downforce $w = f(F, n)$. The two-dimensional surface is characterized by a parabolic section, which is extreme in infinity. The arrow indicates the direction towards the optimum procedure, in this case the minimum energy consumed in the process of disintegration.

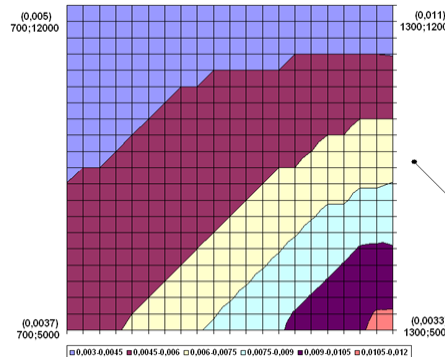


Figure 3- Two-dimensional cut during the disintegration of the specific energy - w

5 The model creation by rotary rock disintegrating by TBM

Boring machines with full engagement called TBM (Tunnel Boring Machine) are full-profile tunneling machines for mechanical rock disintegration through a milling head which disintegrates the whole tunnel face (full profile). TBMs are constructed and specifically tailored to the geological environment survey identifying the rock mass disintegration area. The basis of the boring machine has a boring head, a cutter, which is a circular cross section, which determines the height of the tunnel. The rock disintegration is done by working tools with the boring head. The selection of these working tools depends on the physical - chemical rock properties. For boring in medium hard, hard and very hard rocks the roller bits are used corresponding to the physical - mechanical properties of rocks, made of hard steel. Most of the machines are equipped with a special suction device which sucks dust from the disintegration area [LAZAROVÁ, 1997].

Tunnel Branisko was all bored by NATM (New Austrian Tunneling Method) which uses boring - blasting, and the rules for splitting the face of a rock mass. Before tunneling an exploratory gallery was struck from the west by classical drilling and blasting operations and from the east by the TBM method at a length of about 2300 m by boring machine Wirth TB - II - 330 H / M.

The boring machine - rock system can be described at the operating point and its vicinity by equations (2), (3).

Based on the boring process measured values, it is possible to make a model in order to examine the dynamic properties of the head of the boring machine, respectively the amount of energy consumed per unit volume. As input variables the downforce and revolutions that are desired segment stabilized and output torque of the boring head and power consumption were considered. The time difference of two successive samples of the signal is $\Delta t = 2,03$ s.

Dynamic model creation is based on the characteristics of the input signal downforce, part of which can be considered as a unit step. On the output side we monitor the course of the signal torque, which contains information about the dynamic properties of the system as a result of changes in downforce on the input side of the model.

To simplify the model we neglect the input signal speed, respectively the output signal power consumption. Given the complexity of the system it is impossible to make conclusions from a single pair of these realizations. For the examination of this system we use the medium probability course (6). Its principles are based on using several realizations (repeated measures) for specifying the resulting course.

$$f_i = \frac{\sum_{k=1}^N \text{sign}(\Delta u_k) y_{ik}}{\sum_{k=1}^N |\Delta u_k|} \quad (6)$$

where f_i - means ordinate the resulting transient response in the time $t = i \Delta t$ and Δt is the period of sampling,

y_{ik} - means input, resp. output realizations,

k - means the value of the output variable response system in the i - th sampling interval at the k -th measurement of a number of repeated measurements of transient response in general unequally large step input variable of the object,

Δu_k - means step change of the input variable by the k - measurement of transient response and

i - means the order of sampling points of transient response, $i = 0, 1 \dots m$ [ROHAL - ILKIV, 1985].

By the model creation according to equation (6) it is important to elect an appropriate number of repeated measurements. Its final number is given by statistical and physical regularities of an investigated system. The examples of these courses can be monitored in Figure. 4.

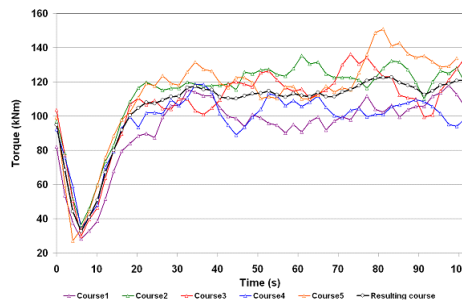


Figure 4 – The courses of transient responses of the repeated measurements and resulting statistical model

Based on this transient characteristics it can be assumed that the wear and damage will largely impact and stress the dynamic boring head and also the number of exchanged discs. In terms of the total cost of the work it has an impact on the process of disintegration especially its optimum mode throughout mined segment as well as on the construction of a disintegrating device. Therefore, there is the effort to get the best information on the continuous process, its mode and instant status updates. It has an important role in the process of monitoring the transfer of collected data, and then evaluating the possibilities and their use in the management of this difficult process in real time [KRÚPA, 1998].

One of the other ways to evaluate the effectiveness of the boring process is to monitor using chisel reliability or models which reflect the impact of the device on its structural elements, depending on the boring mode.

6 Boring process visualization in the systems SCADA / HMI

In the Institute of Geotechnics of the Slovak Academy of Sciences in Košice there was developed and realized a monitoring system prototype which has been programmed for a boring machine. This prototype included besides basic boring variable data collection, its evaluation and archiving, also the optimization algorithm in real time to anticipate the downforce head machine optimum of the tunnel face and then display it for the operator. The system can be considered as research equipment. Its limitations were only technical and

operational conditions, as a result, it did not allow to carry out experimental management interventions in the parameters mode of the machine in areas of extremely high downforces. These interventions could significantly affect disc head boring machine equipment [LAZAROVÁ, 1997].

The application of the recommended optimal downforce guarantees minimalizing the economic costs of the boring process that ensures that the optimal ratio between the speed sequential boring machine, disk consumption and energy consumption. The system has been supplemented by sensing elements, suitable for boring machine Wirth TB – II – 330 H / M.

The optimizer of whole boring process has been proposed as an independent monitoring system that in no way interferes with the boring process, so it does not affect the continuous activities of individual technological operations. Information exchange between the computer, the process and consumer service is designed as the "on - line – loop experiment". This is an automated system that collects all input and output variables in the boring process. Then provides information about the recommended parameter correction by their mathematical processing.

The optimizer is divided into the basic subsystems: the monitoring of input and output boring process variables, data processing, optimal downforce evaluation, evaluation of strength characteristics changes on the tunnel face, diagnostics of selected technical means of a boring machine and information transfer into the central dispatch headquarters. Input and output boring process variables of the monitoring subsystem provide actual values sensing of downforce, torque, revolutions, head position in the range of machine working step (stroke) and boring speed [LAZAROVÁ, 1997].

All optimization algorithms were configured to minimize the rate of drive wear in the boring process. The monitored values of specific volume disintegration work inform about the task fulfillment. This is based on theoretical and experimentally confirmed findings that between specific volume disintegration work and the wear intensity of disintegrating tools there is linear relationship. This is the reason of computer monitoring optimization extension name w – optimizer of boring machine (WORS). This system is based on the same basic concept as an independent monitoring and optimization system, which does not interfere with the boring process and also does not control each technological operation activity. It was used the first time in the boring process of exploratory gallery Branisko and it was situated in the chassis part of the boring machine. This system displayed on the screen of its computer system the variables of bar graphs: eject the machine head, downforce, head speed and torque [LAZAROVÁ, 1997].

Besides the monitoring system, on the boring machine Wirth on Branisko, there was installed also an optimization system. It is based on findings of boring process analysis that if the machine works by a minimum of specific volume disintegration work, the boring process continues with minimum cost. Recommended calculated downforce value F_{dop} corresponded to the optimal mode and was displayed in the operator's cabin with other scanned values (Figure 5), and its acceptance by an operator guaranteed the boring process by a minimum of specific volume disintegration work.

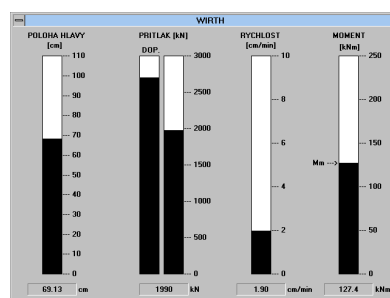


Figure 5 Visualization F_{dop} displayed in operator's cabin

Technological boring process visualization by a boring machine can be described in the levels of division of competences - user roles defined for users with sign - in access to visualization application with defined powers to manage and view the information and data from the process. Before the objects are designed for the visualization, and values that define these objects, it is therefore necessary to define the application's end-user.

1. Level - the operator (mechanic) in a boring machine cabin is able to visualize based on the industrial rock disintegration process and to monitor basic inputs which are the process variables, data about the downforce and revolutions or the torque. Among the inputs it is possible also to include the actual visual inputs, for example from the industrial cameras. These slides can directly display processes in real time (multimedia visualization support) or can be available after the processing, if necessary or after understanding the machine scanned images (machine vision, perception). The operator in the cabin from which he controls a boring machine should have information about those variables (their relationship) that are necessary for process control. The main operator's screen may thus represent a view of the head of the boring machine, tunnel face, disintegrating tools (discs) - optical boring process monitoring in Figure 6.

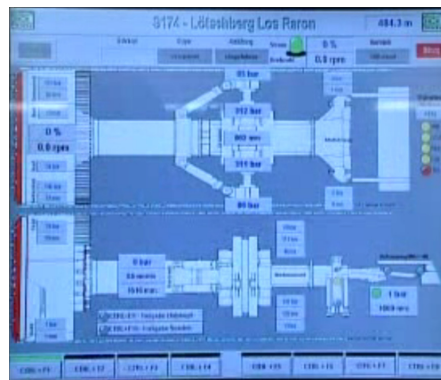


Figure 6 Boring machine visualization by TBM method

The next, second screen can visualize the input and output variables (torque, the length of the drilled rock and the energy needed to rock drill) of the boring process. For a better understanding of the process, the operator should have the screen showing a graph that indicates the direction to the optimum for monitored input and output variables (Box method) for selected KPIs levels (Figure 3).

2. The technologist who assesses the boring technology visually monitor the boring process outputs. These outputs are identified for the person, who enters the boring process control. Based on their interpretation, he controls the controlled system, production, process and boring technology. He assesses an opinion on the monitored process course and warns the operator in case of the need to perform an action intervention. In this sense, he is a manager at various levels of management of industrial information and control systems.

3. A manager of the company at the enterprise level of Director General represents the pinnacle of the pyramid in terms of management and evaluation of the boring process of rock. It mainly deals with economic indicators of the company, for example C_{bm} - standard price per meter [€] for a specified hourly, daily or weekly interval.

For complete connection information and control flows directly related to the industrial process, it is necessary to visually convey the managers at each level of process control actual or historical data and knowledge to support decision making. The aim is for example quality management based on process analysis, real-time visual management of the company to disclose the actual (not planned or anticipated) process data for the marketing and management purposes.

7 Conclusion

In the article were described and analyzed three various complex technological processes, by which there was monitored the variables input and output effects by using some key performance indicators of the processes in order to create models.

The first monitored and analyzed process was steel refining in an oxygen converter. The research project enabled the statistical model creation, which described some mathematical characteristics of negative phenomena outbursts and ejections by the steel refining process based on video recordings. Due to the fact, that for the given process research were provided with output data (video recordings of outbursts and ejections duration) without the continuity on process input (KPIs), at this stage the research was completed, because of a limited information amount. The mentioned experiences were reflected in the analysis in the same complex process, the rock disintegration on an experimental stand, respectively the boring process by the TBM method.

In the case of the static and dynamic model creation, in most cases, these models were of MISO type. By the models creation there was used the process capability index for evaluating the monitored variables and the application of the evolutionary planning Box method on the rock disintegration process. This method allows us to watch the output model variables depending on the values of input variables and their interaction. Its application helps to determine the input variables (indicators) that both have the KPI greatest impact on the process quality and its future development. Apart from the need to identify indicators that are key for process monitoring and important in terms of the process evaluation, it is desirable to reduce their number, especially considering the fact that a multidimensional space (number $n > 3$) is already difficult and for their visualization on a two - dimensional surface it brings new and challenging solutions. The models based on the Box method describe the synergistic effect of two or more input variables on the output variable and allow us to watch the visual progress towards the optimum.

Detailed process analysis and model creation are especially useful for determining the appropriate KPIs as input variables at different control levels and in terms of their visualization. The real KPI advantage is that it provides managers with meaningful information at all control levels and helps in their decision. In the boring process of the rock disintegration it helps management in generally define the right price of a product, and the point of its economic or technological reversal. The costs determined per meter of boring rock influence the decision on the new price for boring rock meter, quantifying the maximum allowable loss for hourly, weekly or otherwise specified interval and so on. Identification of appropriate process KPIs gives information about its current status, and also indicates its likely development and makes an adequate response, or works as an early warning signal.

The boring process visualization is described in the 6th. chapter as a KPI graphic visualization possibility displayed in the operator's cabin. The operator's decision based on the displayed data influences the boring process by the minimum of the specific volume disintegration work of the disintegration process. It ensures the boring mode at the minimum cost.

There is already a wide range of programs, an efficient method and strong graphical support, which enables visual representation of mathematical and statistical functions that allow their interpretation of the status for process management and decision-making to be more understandable.

8 Acknowledgment

This paper was prepared within the project No: SP 2016/84 - “Autonomous Systems Control and Modern Methods of Diagnostic of the Machines” funded by the Ministry of Education, Youth and Sports.

9 References

KOSTÚR A KOL. Vývoj podporných systémov pre výrobu ocele na kyslíkovom konvertore v rámci Výskumnej úlohy P1-31/1 za III. etapu. Marec 1997.

ROHAĽ-ILKIV, B. *Identifikácia sústav*. Bratislava: SVŠT v Bratislave, 1987, 206s., ISBN 85-236-87.

VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A. *Základy automatické regulace*. Přepřacované druhé vydání. Fakulta strojní VŠB-TU Ostrava, 2008.

NOSKIEVIČ, P., *Modelování a identifikace systémů*. Montanex a.s., 1999, s.200, ISBN 80-7225-030-2.

BALÁTĚ, J. *Technická kybernetika*, VUT Brno, 1979.

ISERMANN, R. *Identifikation Dynamischer Systeme 2*. Springer – Verlag Berlin – Heidelberg, 1992, ISBN 3-540-54924-2.

UBERHAUEN, H. *Regelungstechnik III*. Vieweg, Wiesbaden, 1995, ISBN 3-528-43349-3.

TŮMA, J. *Složité systémy řízení, I. Díl: Regulace soustav s náhodnými poruchami*. VŠB TU Ostrava, 1998, ISBN 80-7078-534-9.

KUMIČÁKOVÁ, D., POPPEOVÁ, V. *Možnosti využitia akustickej emisie na monitorovanie rezného process*. Kočovce, Zborník referátov Hluk a vibrácie v praxi, 1994.

KRÚPA, V., PINKA, J. *Rozpojovanie hornín*. Košice: F BERG TU Košice, 1998, ISBN 80-888896-10-X.

LAZAROVÁ, E. *Niektoré výsledky monitorovania procesu razenia tunela Branisko strojom Wirth TB-II-3301 H/M*. Košice, Ročník 2, 1997.

KRÚPA, V. *Hypotézy, modely, teórie a ich verifikácie pri plnoprofilovom razení*. Košice, doktorská dizertačná práca, ÚGt SAV Košice, p. 251, 1998.

Návrh řídicího systému pro model Helicopter

CZEBE, Jiří¹ & ŠKUTA, Jaromír²

¹ Ing., ✉ Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava, 📧 jiri.czebe@vsb.cz, 🌐 <http://www.352.vsb.cz/>

² Ing., Ph.D., 📧 jaromir.skuta@vsb.cz

Abstrakt: Článek obsahuje návrh řídicího systému na bázi jednočipového počítače pro laboratorní model Helicopter. Zde jsou popsány jeho jednotlivé dílčí části a to od samotného návrhu plošného spoje, volbou komunikačního rozhraní (point-to-point, RS232), návrhu komunikačního paketu, úpravou stávajícího modelu, atp. Dále v článku je zmíněn i návrh dohledového systému (SCADA/HMI) v prostředí Control Web.

Klíčová slova: MCU, IPC, SCADA/HMI, EAGLE, CONTROL WEB

1 Úvod

Počítačem řízená výroba je v dnešní době čím dál více používána k řízení technologických procesů. Vzhledem k trendu neustálého snižování spotřeby (zlepšování výrobního procesu) a zvyšování výpočetního výkonu, včetně velké integrace periférií je možné nasadit jednočipové počítače tam, kde to v minulosti nebylo možné. [Janeček 2001]

Distribuované řídicí systémy, které jsou stavěny na samotné ideji distribuce řízení, tak mohou využívat tohoto potenciálu, která mu tato nová technologie nabízí. Kdy jednotlivé vrstvy řídicího systému obsahují inteligentní prvky, jako inteligentní sensory, mikroprocesory (MCU), programovatelný logický automat (PLC), industriální PC (IPC), atp. [Boyer 1999]

Řídicí systém založený na mikroprocesorové technologii tedy můžeme rozdělit na dvě dílčí části a to na oblast přímého řízení a na dohledový řídicí systém se sběrem dat (SDACA/HMI). Kde oblast přímého řízení je nejbližší řízenému technologickému procesu, zatímco SCADA/HMI systém umožňuje operátorovi okamžitý náhled na celý systém (řízení, trendy, vyhodnocení dat, alarmy, atp.).

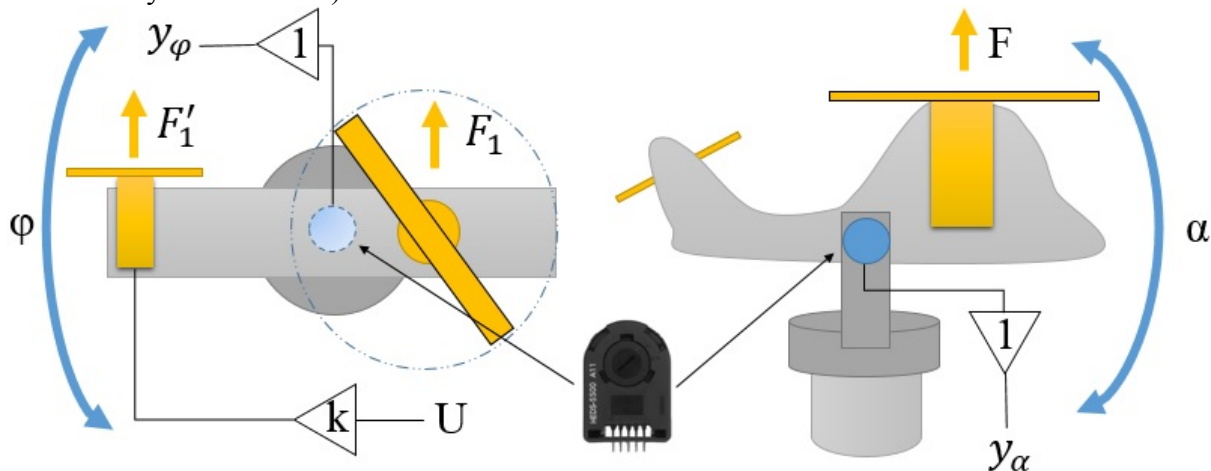
PLC či IPC jednotky se hlavně využívají v oblasti přímého řízení. Jejich nasazení je tedy v nejnižší vrstvě řídicího systému (nejbližší k technologickému procesu). Kdy řídicí jednotka má přímé spojení s řízeným procesem, obvykle pomocí vstupně/výstupních (V/V) signálů (analogových či diskretních forem). Mezi charakteristické vlastnosti těchto řídicích jednotek patří nasazení industriální podoby operačního systému tzv. operační systém reálného času (RTOS), který zajistí maximální možnou dobu pro provedení všech V/V operací.

Vzhledem k vyšší pořizovací ceně PLC či IPC jednotek je vhodné, nahrazení podstatně levnějším řešením v podobě MCU. Hlavní podmínkou je ovšem samotná vhodnost jejich nasazení pro daný řídicí systém.

Pro distribuci řízení je nutné zajistit spolehlivou komunikaci mezi jednotlivými vrstvami systému. Užití běžných komunikačních rozhraní není vhodné vzhledem k náchylnosti vůči rušení či k jejich stochastickému přístupu k médiu. Je tedy nutné zvolit jeho industriální podobu, která nám zajistí vyšší bezpečnost a robustnost celého systému (protokol, rozhraní, bezpečnost datového přenosu, atp.). Mezi doporučené komunikační standardy patří např. RS232, RS422 či RS485.

2 Model Helicopter

Mnohorozměrný nestabilní systém vhodný pro výuku a pokročilé řízení. Systém obsahuje celkem 2 řídicí vstupy (napětí na hlavním a pomocném rotoru) a 2 měřené výstupy (úhel natočení měřený IRC snímači).



Obrázek 1 Fyzikální schéma modelu Helicopter

Popis parametrů modelu:

F_1 ... síla vyvolaná od točivého momentu hlavního rotoru

F_1' ... síla vyvolaná zadním rotorem (tato síla je ekvivalentní síle F_1 v pracovním bodě vrtulníku)

M_1 ... moment soustavy (v závislosti na síle F_1 tj. $M_1 = F_1 * r_1$)

α ... výškový úhel (výchylka ve vertikále)

U ... řídicí napětí zadního rotoru

r_1 ... vzdálenost hlavního rotoru od těžiště vrtulníku

M_S ... setrvačný moment soustavy

F ... síla vyvolaná hlavním rotorem

F_2 ... síla vyvolaná zvýšením napětím na zadním rotoru oproti ustálené hodnotě v pracovním bodě vrtulníku

M_1' ... moment soustavy (v závislosti na síle F_1' , kdy platí $M_1' = M_1$)

φ ... azimut (výchylka v horizontále)

k ... zesílení zadního rotoru

r_2 ... vzdálenost zadního rotoru od těžiště vrtulníku

M_B ... brzdý moment soustavy

Identifikace modelu:

Pro identifikaci modelu Helicopter vycházíme ze situace, kdy omezíme působení síly vyvinuté hlavním rotorem na soustavu, tak že zaaretujeme model v jeho vertikální poloze a necháme působit pouze točivý moment působící síly F_1 . [Horáček 2004]

Pro námi hledaný pracovní bod tedy platí rovnováha momentů

$$M_1' = M_1, \quad (1)$$

tedy situace kdy se vrtulník neotáčí a platí rovnováha sil

$$F_1 * r_1 = F_1' * r_2. \quad (2)$$

Při kolísání napětí na zadním rotoru dochází k porušení uvedené rovnováhy (1). Přírůstek napájecího napětí ΔU vyvolá působení síly F_2 , která se v čase mění. Působící síla je dána vztahem

$$F_2 = \Delta U * \alpha_1(t), \quad (3)$$

kde α_1 je koeficient přímě úměrnosti mezi změnou (přírůstkem) napětí ΔU a působící silou F_2 . Zadní rotor (motor) jakožto fyzikální těleso vykazující moment setrvačnosti

(integrační soustava se setrvačností) neprovádí skokové změny otáček rotoru a tím i nedochází ke skokové změně působení síly F_2 . Z čehož vyplývá, že koeficient přímé úměrnosti α_1 musí být závislý na čase. Působící síla F_2 vyvolá moment

$$M = F_2 * r_2, \quad (4)$$

při dosazení, za působící sílu F_2 z předešlého vztahu (4), lze tedy psát

$$M = \Delta U * \alpha_1(t) * r_2. \quad (5)$$

Rovnici můžeme dále zjednodušit zavedením konstanty

$$\alpha(t) = \alpha_1(t) * r_2, \quad (6)$$

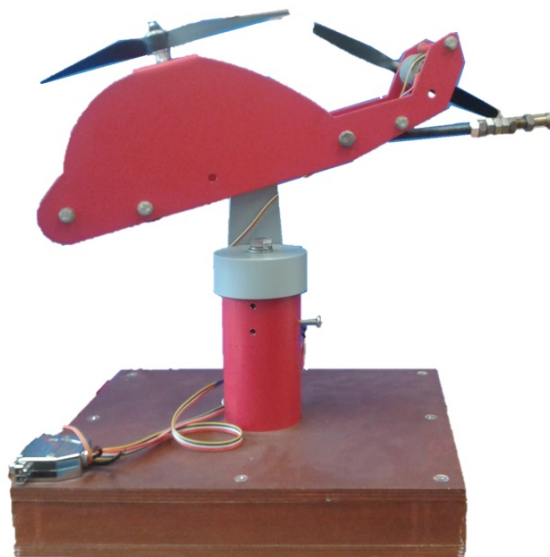
kdy výsledný tvar bude následující

$$M = \Delta U * \alpha(t). \quad (7)$$

Motor je dále zatížen dopravním zpožděním, tj. při skokové změně (přestavení modelu) vstupního napájecího napětí U dochází, ke zpoždění mezi zvýšením otáček rotoru (vyvinutí vyššího vztlaku od listu rotoru) a tím i ke zpoždění vyvinuté působící síly F_1 . Proto je třeba k základnímu momentu soustavy zahrnout i zpoždění, výsledný vztah je tedy

$$M = \Delta U * \alpha(t) * \tau(1 - e^{-\tau * t}), \quad (8)$$

kde τ představuje dopravní zpoždění modelu.



Obrázek 2 Model Helicopter

Výsledný moment soustavy M je dán součtem momentů setrvačného M_S a brzdného M_B ve tvaru

$$M = M_S + M_B. \quad (9)$$

Pro výše uvedené momenty platí:

$$M_S = I_S * \varepsilon, \quad (10)$$

kde I_S je setrvačný moment a ε je úhlové zrychlení,

$$M_B = B * \omega, \quad (11)$$

kde B je koeficient úměrnosti brzdného momentu a ω je úhlová rychlost.

Výsledný popis systému je popsán rovnicí

$$M - M_S - M_B = 0 \quad (12)$$

a po dosazení za jednotlivé momenty soustavy do rovnice (12), je roven

$$M - I_S * \varepsilon - B * \omega = 0 \quad (13)$$

Výsledný popis v základním tvaru (při vyjádření v základních jednotkách tj. derivacích dráhy) je rovnice ve tvaru

$$M - I_s * \ddot{y} - B * \dot{y} = 0 \quad (14)$$

3 Návrh přímého řízení (MCU)

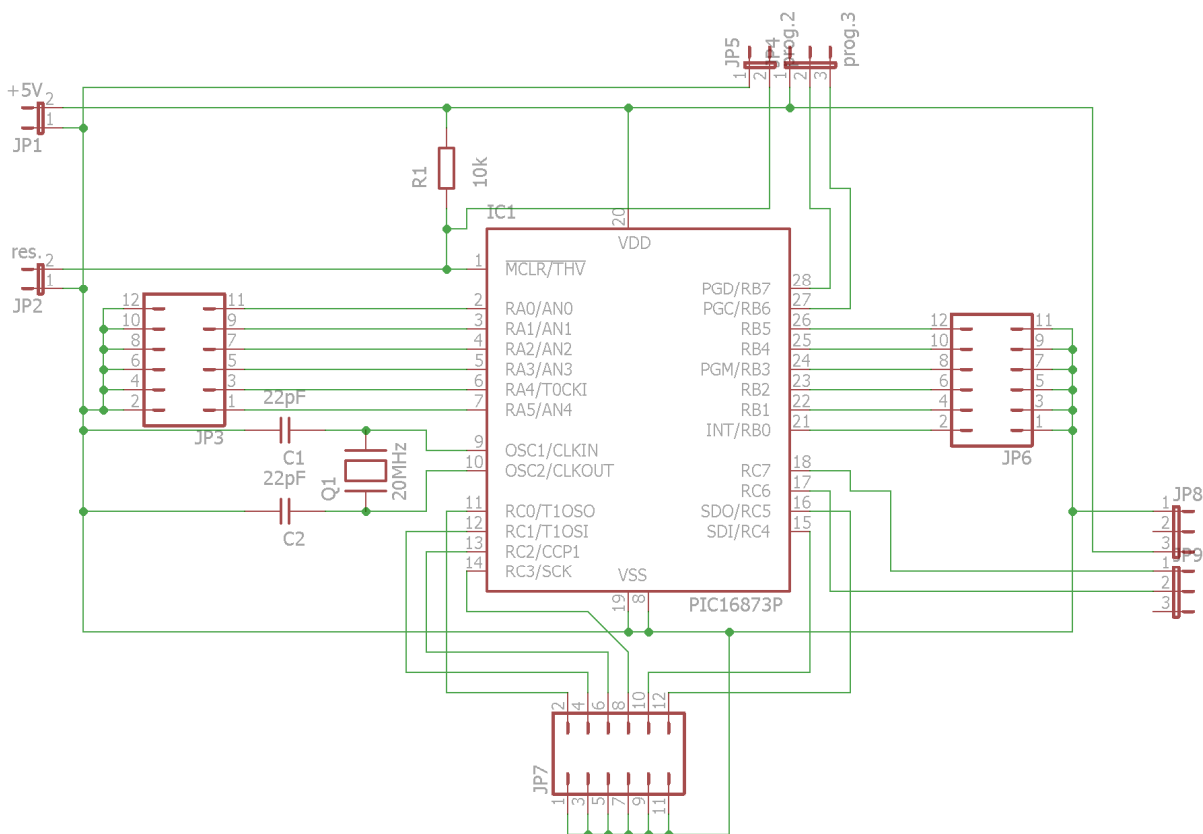
Pro realizaci přímého řízení byl zvolen MCU PIC16F873A s dostatečným výkonem (20 MHz) spolu s adekvátní vybaveností různých periférií. Řízení hlavního a zadního rotoru bude provedeno pomocí univerzálních modulů Capture-Compare-PWM 1 (CCP1) a CCP2 v režimu pulsně šířkové modulace (PWM).

Vzhledem k implementaci řídicího algoritmu na MCU je zapotřebí číst (vyhodnocovat) data ze zpětné vazby s konstantním intervalem o co nejmenší možné délce. Dalším velmi důležitým parametrem je i stabilita řídicího algoritmu a jeho velmi rychlá odezva na podmínky z nadřazené úrovně řízení (SCADA/HMI). Pro implementaci vzorkovací periody je nutné použít Čítač/Časovač (Č/Č), který pomocí obsluhy přerušení (ISR) velmi přesně pohlídá vzorkovací periodu. Kdy čítač tedy pracuje asynchronně, tedy nezávisle na vykonávání hlavním cyklu programu. Protože časová základna pro PWM využívá Č/Č 2, je možné využít zbylé dva a to Č/Č 1 (16 bitový) či Č/Č 0 (8 bitový).

Pro přenos dat je využito univerzální sériové/asynchronní komunikační rozhraní (USART) v jeho asynchronní podobě (8 bitů dat, 1 start bit, 1 stop bit) s komunikační rychlostí stanovenou na 256 Kb/s.

Tabulka 1 Parametry procesoru PIC16F873A [MICROCHIP 2013]

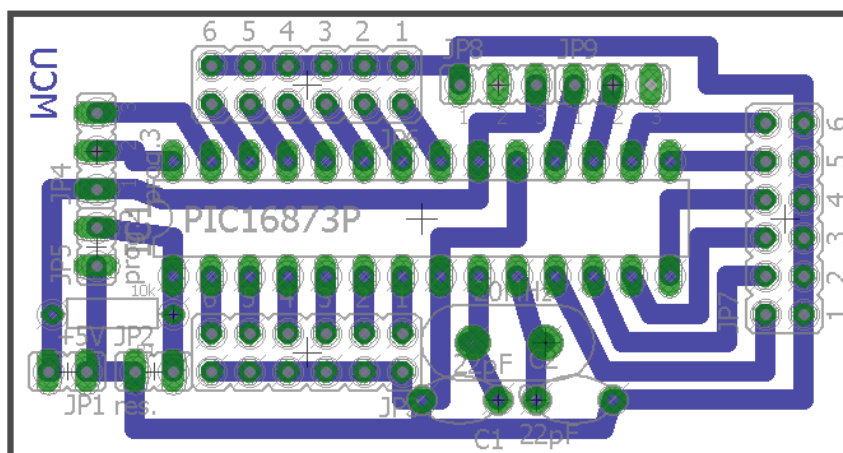
Frekvence procesoru	DC - 20 MHz
Reset (a zpoždění)	POR, BOR (PWRT, OST)
Paměť programu (14 bit. slovo)	4K
Paměť dat	192
Paměť dat (EEPROM)	128
Přerušení	13
V/V porty	Porty A,B,C
Čítače/Časovače	3
Záznam/Komparátor/PWM modul	2
Sériová komunikace	MSSP, USART
Paralelní komunikace	—
10 bit. A/D modul	5 vstupních kanálů
Instrukční set	35 instrukcí



Obrázek 3 Univerzální deska pro MCU PIC16F873A

Zatímco o vyhodnocení otáček z inkrementálního rotačního snímače (IRC) probíhá mimo samotný MCU (přes dekodér HCTL-2016). Užitím dekodéru se zmenšují nároky na výpočetní výkon samotné řídicí jednotky, kdy tento specializovaný obvod vyhodnocuje pulzy z IRC snímače a výsledek čítání průběžně ukládá do 2 bytové mezipaměti. Kdy samotný výčet, reset dekodéru, atp. je na řídicím algoritmu MCU.

V našem případě se bude jednat o režim vyčítání absolutní pozice, neboli reset daného dekodéru bude proveden v průběhu jeho inicializace v počátku kalibrované osy (horizontální, vertikální) a následně bude zjištěna i jeho maximální hodnota, pro co nejpřesnější přepočítání počtu pulsů na úhel natočení.

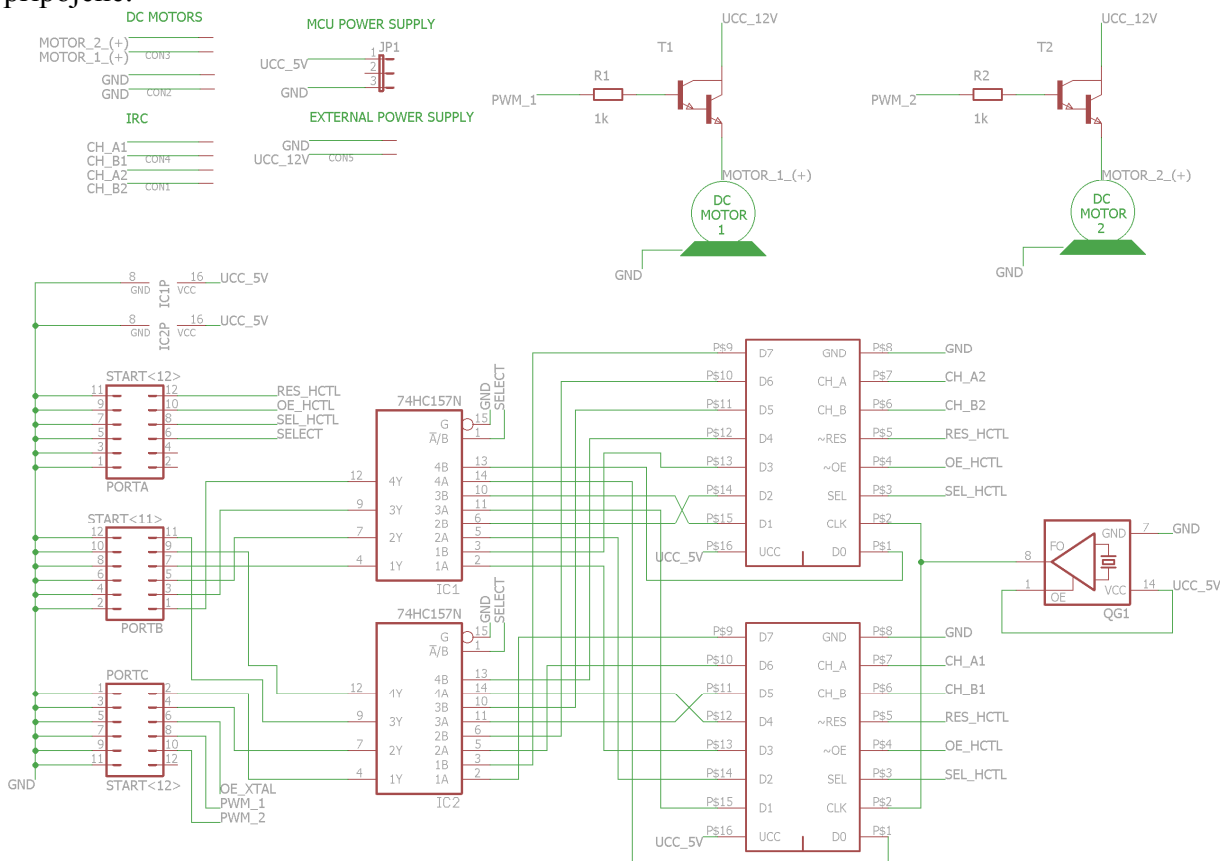


Obrázek 4 Rozložení součástek na univerzální desce pro MCU PIC16F873A

Návrh univerzální unifikační desky pro model Helicopter

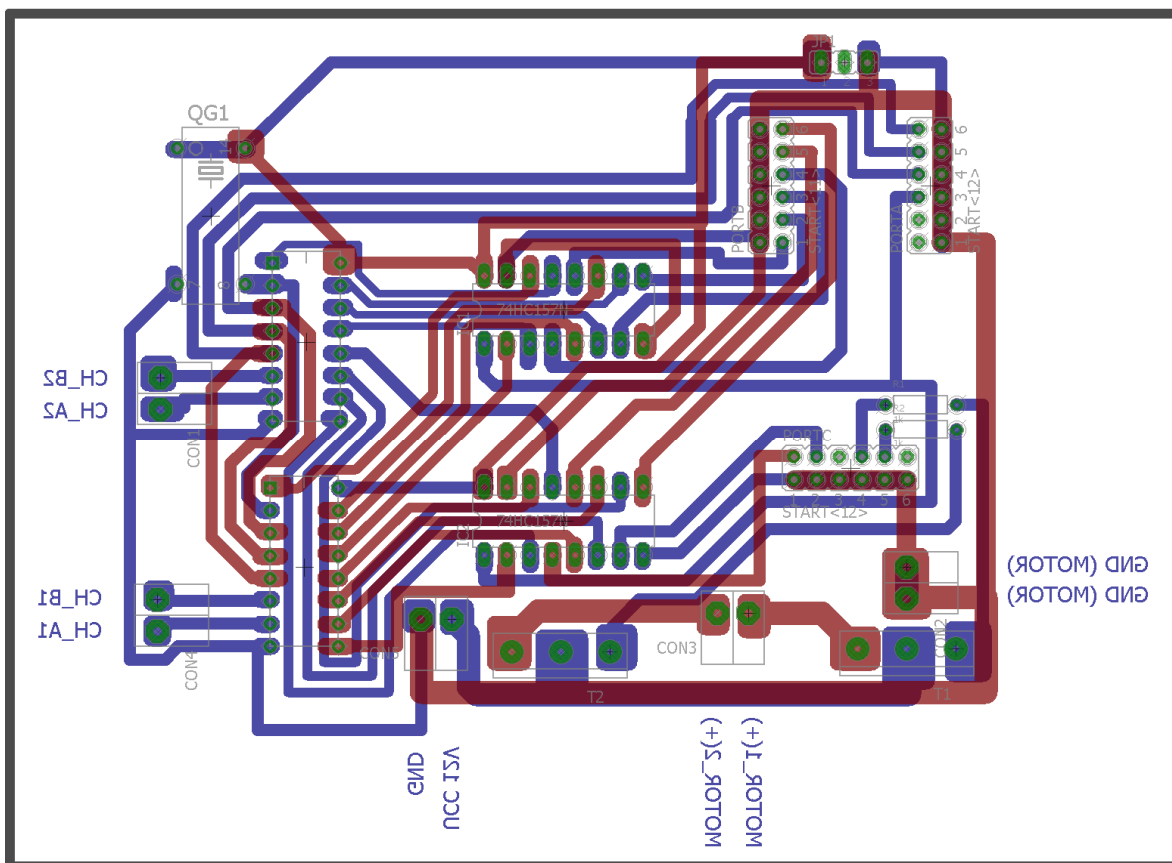
Vzhledem k univerzálnosti použití desky je deska osazena navrženou (obecnou) patičkou pro připojení jakéhokoliv (vhodného) MCU, který obsahuje požadované periferie a odpovídající počet V/V pinů. Ihned po připojení napájecího napětí dojde ke spuštění krystalového oscilátoru, který svými pulsy o frekvenci 12 MHz zajišťují velmi rychlé maximální čítání obou dekodérů.

Pro dodržení bezpečného provozu je motor připojen na stranu emitoru tranzistoru. Po spuštění (připojení napájecího napětí) MCU jsou veškeré V/V piny nastaveny jako výstupní tj. po náběhu MCU nejsou vybrané V/V piny zdrojem napětí či výstupem periferie na pin připojené.



Obrázek 5 Rozšiřující deska pro model Helicopter v1.0

Deska dále obsahuje dvojici multiplexorů, které umožňují sloučit výstupní datové vodiče z obou dekodérů. Následně byly propojeny i řídicí signály pro oba dekodéry (RES_HCTL, OE_HCTL, SEL_HCTL), tedy pro zapojení všech potřebných vodičů (datové, řídicí) do MCU není potřeba původních 24 volných V/V pinů, ale jen 13.



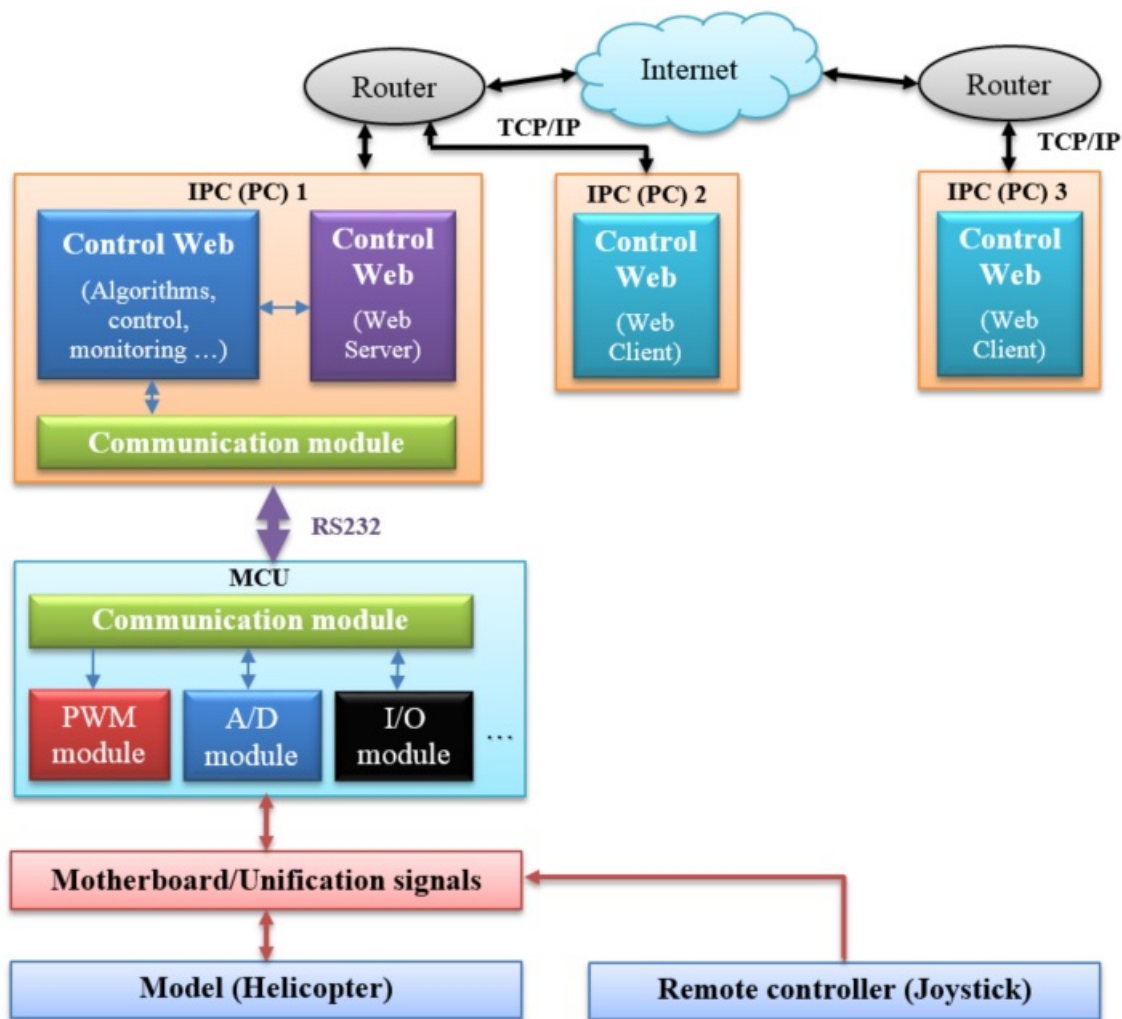
Obrázek 6 Rozložení součástek rozšiřující desky pro model Helicopter v1.0

Deska obsahuje přípojné body pro jednotlivé části systému jakožto pro připojení zdroje (typ ATX), hlavního a zadního motoru (rotoru) včetně připojení výstupního signálu z 2 IRC snímačů pro snímání horizontální a vertikální polohy vrtulníku.

4 Návrh řídicího systému (SCADA/HMI)

Řídicí systém lze rozdělit do několika hladin a to na samotný řízený proces, unifikovaná část, řídicí/měřicí jednotku (v našem případě MCU), řídicí systém, webový server a klient. Jednotlivé úrovně jsou propojeny příslušným komunikačním rozhraním a to ve formě diskrétních V/V signálů, komunikační sběrnice RS232 či ILAN.

Realizace SCADA/HMI systému bude provedena ve vývojovém prostředí Control Web. Mezi hlavní přednosti jeho užití patří možnost realizace reálného času programu i na běžném PC pod OS typu Windows. Kdy nejmenší možný čas (vzorkovací rychlost) je programem omezena na 0.01 s (100 Hz). Vestavěné komponenty vývojového prostředí pro realizaci řídicích algoritmů, připojení k databázi, ukládání a zobrazení naměřených dat či možnosti vytvoření vzdáleného přístupu (klient-server) činí Control Web vhodným nástrojem pro realizaci daného systému.



Obrázek 7 Návrh logické struktury SCADA/HMI v1.1

Komunikační rozhraní

Při volbě způsobu komunikace mezi jednotlivými segmenty systému je potřeba vzít na zřetel jeho robustnost, odolnost vůči rušení, spolehlivost, atpod. Proto výběr plně duplexního sériového rozhraní (RS-232), byl vybrán na základě jeho dobrých vlastností a dostačující maximální komunikační rychlosti. Jedná se tedy o přímé spojení mezi SCADA/HMI (IPC) a přímým řízením (MCU) tzv. typ Point-to-Point.



Obrázek 8 Arduino USB Serial Light Adapter [USB Serial Light Adapter 2016]

Realizace komunikačního rozhraní je provedena zařízením ARDUINO USB Serial Light Adapter (USB ↔ sériové rozhraní). Přínosem zvoleného řešení je možnost připojení přes běžné univerzální sériové rozhraní (USB). Dalším přínosem je i možnost napájet připojený integrovaný obvod.

5 Závěr

V článku byl rozebrán základní fyzikální popis modelu Helicopter. Dosavadní stav modelu byl nevyhovující, síla (vyvinutý vztlak) hlavního rotoru byla velmi malá. Problém je dán hned několika chybami a to nedostatečným průřezem přívodních kabelů k hlavnímu rotoru, menší velikost vrtule, nevhodně zvolená protiváha, atpod. Nehledě na poddimenzované napájení či rychlost řídicího systému. Na systému již byla provedena výměna napájecího zdroje s malým výkonem, který nedokázal dostatečně pokrýt proudové špičky při rozběhu hlavního rotoru.

V programu Eagle byla vytvořena unifikační deska pro model Helicopter, která je osazena dvěma dekodéry pro vyčítání aktuální pozice modelu, spolu se spínacími výkonovými tranzistory pro řízení modelu. Navržená deska je prvním prototypem pro daný model a ještě neobsahuje možnost připojení ovládacího kniplu, jehož funkcionalita bude využita pro inicializaci i samotné řízení modelu.

V programové části byly navrženy knihovny pro práci s unifikační deskou a užitým MCU, které umožňují vyčítat aktuální polohu vrtulníku a to v relativním či absolutním vyjádření spolu s možností nastavení požadované výstupní frekvence PWM a jeho střídý s možností korekce, dále knihovnu pro komunikační rozhraní MCU a PID regulátor (pro jednu osu).

Pro řídicí systém byl dále zpracován logický návrh systému včetně částečné realizace v programu Control Web. Dosavadní stav samotného modelu nebyl ovšem možné bez jeho dokončení správně identifikovat a navrhnout tak vhodný způsob řízení. Model je typu MIMO (Multiple Inputs Multiple Outputs) a je tedy vhodný jakožto výukový model s možností realizace stavového řízení, PID regulátorů či za pomoci prediktivního řízení.

6 Použitá literatura

JANEČEK, Jan. 2001. Distribuované systémy. Praha: Vydavatelství ČVUT, 164 s. ISBN 8001023079.

BOYER, Stuart A. 1999. SCADA: supervisory control and data acquisition. 2nd ed. Research Triangle Park, N.C.: ISA, xi, 215 p. ISBN 1556176600.

HORÁČEK, Petr. 2004. CE 150 HELICOPTER MODEL: Educational Manual [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.dii.unisi.it/~control/cmr/altro/heli_ce150_manual.pdf




PIC16F87XA. 2013. Microchip [online]. Microchip: Microchip [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F873A>



USB Serial Light Adapter. 2016. Arduino [online]. Adapter: Arduino [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc>

Tepelná bilancia formy ako nástroj validácie technologických parametrov

Heat Balance of Die Casting as a Tool of Validation of Technological Parameters

DUBJÁK, Ján¹ & ZBIHLEJ, Jozef²

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

² Ing.,  Katedra manažmentu výroby, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, Technická univerzita v Košiciach, Bayerova 1, Prešov, SR,  jozef.zbihlej@tuke.sk

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

Problém temperovania tlakových zlievarenských foriem úzko súvisí s prenosom tepla, teda schopnosťou lejacej formy odvieť naakumulované teplo z tuhnucej taveniny.

Celková tepelná rovnováha zlievarenských foriem sa teda určí z bilancie celkového uvoľneného tepla z odliatku a celkového tepla odvedeného jednotlivými zložkami (radiácia, konvekcia, kondukcia, nástrek a temperačný systém.

Kľúčové slová: tlakové liatie, lejacia forma, tepelná bilancia

1 Úvod

Jednou z mnohých možností používanou pre produkciu odliatkov je technológia odlievania pod tlakom. Jedná sa o špecifickú metódu používanú najmä pri výrobe rozmerovo menších, ľahších, tenkostenných a zároveň tvarovo zložitejších výrobkov s presne nadimenzovanými počtami kusov v jednotlivých sériách, pričom sa kladie výrazný dôraz na kvalitu povrchu, ktorý je vždy hladký.

Liatie pod tlakom je metóda presného liatia, ktorá sa najviac blíži k ideálnej snahe priamej premeny základného materiálu v hotový výrobok [Michuna a kol 2007]. Je to spôsob výroby odliatkov, pri ktorom je roztavený kov vstrekovaný 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 otrepov [Ragan 1997].

2 Vplyv teploty taveniny a formy

Je potrebné zaoberať sa aj obsahom plynov v roztopenej zliatine. Prirýchlom tuhnutí zostáva v zliatine aj v tuhom stave prítomných viac plynov ako pri pomalom tuhnutí. Objemové zmeny pri chladnutí vyúsťujú do zmrašťovania zliatiny. Vzhľadom na kovovú

formu prevláda priliatí pod tlakom brzdené zmraštenie, ktoré je oveľa nižšie ako voľné zmraštenie pri liatí do piesku0, 0,.

Pri vstupe kvapalného kovu do formy vzniká teplotný šok materiálu formy. Z rýchlo tuhnuceho kvapalného kovu prechádza teplo do povrchu formy a prestupuje ďalej stenou formy [Ragan 2007]. Teplota formy je dôležitým technologickým parametrom, ktorý priamo vplýva na kvalitu vyrábaného odliatku. Počas jedného pracovného cyklu sa vykonáva viacero úkonov, ktoré spôsobujú tepelné straty a je nutné ich zohľadniť pri určovaní tepelnej rovnováhy, a to:

- naliatie kovu do plniacej komory,
- zalisovanie,
- tuhnutie odliatku,
- otvorenie formy,
- vytiahnutie jadier,
- vyhodenie odliatku,
- očistenie formy,
- očistenie komory,
- mastenie formy,
- mastenie komory,
- zatiahnutie jadier,
- uzavretie formy [Ragan 2007].

Aby sa predišlo nepodarkom, je dôležité udržiavať tepelnú rovnováhu formy tepelnou reguláciou alebo chladením, čo predstavuje chladenie aj ohrievanie formy. Súčet jednotlivých časov týchto úkonov dáva celkový čas operácie. Pre stanovenie chladiaceho prípadne ohrievacieho režimu je potrebné brať do úvahy základný čas pre jednu operáciu, keď sa ani neprivádzalo ani neodvádzalo príliš mnoho tepla. Dodržovanie lejacieho rytmu, teda časového sledu uvedených pracovných úkonov, má priamy vplyv na výkon lejacieho stroja a formy, na kvalitu odliatku a na životnosť a poruchovosť formy a stroja [Ragan 1997], [Laudar 1964].

Čas medzi zalisovaním a otvorením formy je doba tuhnutia odliatku, ktorá má vplyv na teplotu formy a silu potrebnú pre vytiahnutie jadier a vyhodenie odliatku [Ragan 2007].

Čas na ošetrenie formy, zatiahnutie jadier a uzavretie formy má byť čo najkratší z hľadiska tepelnej rovnováhy a produktivity práce [Ragan 2007].

Predčasné vyťahovanie jadier, otváranie formy a vyhadzovanie odliatkov zapríčiňuje, že sú potrebné podstatne väčšie sily pre vyťahovanie jadier a vyrážacie sily pre odliatky vplyvom zmraštenia. Tiež sa zbytočne zvyšuje teplota formy vplyvom väčšieho množstva odovzdávaného tepla chladúcim odliatkom. Tým sa predlžuje doba tuhnutia ďalšieho odliatku a znižuje produktivita práce [Vinarcik 2003]. Aby nedochádzalo k týmto nedostatkom, je potrebné dodržiavať tepelnú rovnováhu formy.

3 Tepelné pomery v tlakovej lepacej forme

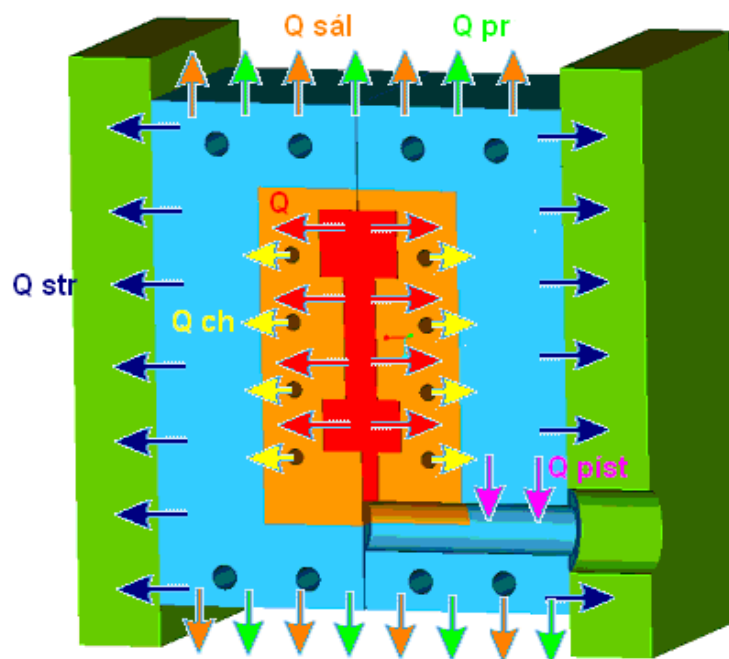
Problém temperovania foriem súvisí s prenosom tepla [Balara a kol. 2015], teda schopnosťou lepacej formy prijať (naakumulovať) teplo z tuhnucej taveniny a odovzdať ho temperačnému systému. Tento proces sa skladá z niekoľkých fáz, ktoré počas výrobného cyklu prebiehajú súčasne a tvoria tepelnú bilanciu formy [Nová 2014].

1. prestup tepla z odlievaného materiálu do liace formy,
2. prestup tepla z formy do temperačného systému,
3. prestup tepla z formy do okolia a rámu stroja.

Prestup tepla je závislý na lepacej teplote odlievaného materiálu a na materiáli formy, na hrúbke steny odliatku, ale tiež na dobe styku taveniny s formou [Mižáková a kol. 2014].

Zo všeobecného pohľadu na tepelné deje medzi odliatkom a formou dochádza k výmene tepla:

1. vedením (kondukciov),
2. prúdením (konvekciou),
3. sálaním (žiarením, radiáciou).



Obrázok 1 -Tepelná bilancia tlakovej lejacej formy [Nová, 2014]

Všetky úvahy o tepelných tokoch v tlakovej liacej forme (Obrázok 1) vychádzajú z týchto predpokladov a zjednodušení:

- tlaková liace forma tvorí uzavretý systém v tepelnej rovnováhe,
- tepelné toky a teploty častí formy sú časovo konštantné, kolísanie teploty povrchu dutiny formy počas lejacieho cyklu sa zanedbáva,
- za teplotu povrchu dutiny formy sa považuje stredná hodnota teplotného maxima a minima počas lejacieho cyklu,
- za teplotu temperačnej kvapaliny sa považuje stredná hodnota zo vstupnej a výstupnej teploty.[Michuta a kol 2014], [Nová 2014]

4 Výpočet celkovej tepelnej bilancie formy

Všeobecne pre výpočet tepelnej bilancie formy platí:

$$Q_{pr} + Q_{cho} + Q_{kr} = Q_{sál} + Q_{pru} + Q_{ch} + Q_{on} + Q_{str} + Q_{piest}, \quad (1)$$

kde: Q_{pr} - teplo prehriatia taveniny,

Q_{cho} - teplo chladnutia odliatku,

Q_{kr} - teplo kryštalizácie taveniny,

$Q_{sál}$ - teplo odvedené do okolia sálaním,

Q_{pru} - teplo odvedené do okolia prúdením,

Q_{ch} - teplo odvedené temperačným systémom,

Q_{on} - teplo odvedené pri odparovaní kvapalnej fázy z nástreku,

Q_{str} - teplo odvedené rámom stroja a upevňovacou doskou formy,

Q_{piest} - teplo odvedené piestom,

Q_o - celkové teplo taveniny uvoľnené pri tuhnutí odliatku,

Q_c - celkové teplo odvedené jednotlivými zložkami (sálanie, prúdenie stroj piest).

Pre celkové teplo odovzdané do sústavy pri chladnutí odliatku platí:

$$Q_o = Q_{pr} + Q_{kr} + Q_{cho}, \quad (2)$$

meraním a výpočtami bola zistená hodnota $Q_o = 5,56$ MJ

Pre celkové teplo prehriatia taveniny platí:

$$Q_{pr} = Q_{pr1} + Q_{pr2} + Q_{pr3}, \quad (3)$$

pričom:

$$Q_{pr} = m_x \cdot c_L \cdot (T_1 - T_{kr}), \quad (4)$$

kde: m_x - hmotnosť taveniny,
 c_L - merná tepelná kapacita,
 T_1 - teplota liatia,
 T_{kr} - teplota kryštalizácie.

Potom vypočítané hodnoty tepla prehriatia sú: $Q_{pr1} = 0,91$ MJ, $Q_{pr2} = 0,68$ MJ, $Q_{pr3} = 0,09$ MJ. Výsledná hodnota celkového tepla prehriatia je $Q_{pr} = 1,68$ MJ.

Pre teplo kryštalizácie taveniny platí:

$$Q_{kr} = Q_{kr1} + Q_{kr2} + Q_{kr3}, \quad (5)$$

pričom:

$$Q_{kr} = m_x \cdot L_{kr}, \quad (6)$$

kde: m_x - hmotnosť taveniny,
 L_{kr} - latentné kryštalizačné teplo taveniny.

Potom vypočítané hodnoty kryštalizačného tepla sú: $Q_{kr1} = 1,01$ MJ, $Q_{kr2} = 0,77$ MJ, $Q_{kr3} = 0,11$ MJ. Výsledná hodnota tepla kryštalizácie taveniny je $Q_{kr} = 1,89$ MJ.

Pre teplo chladnutia odliatku platí:

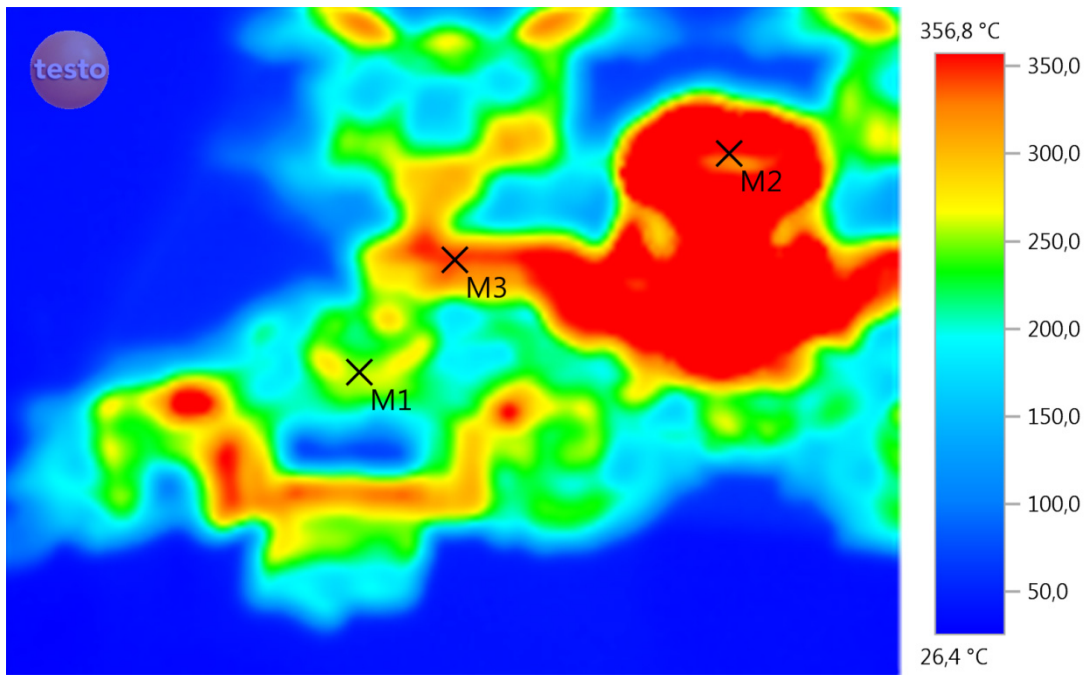
$$Q_{cho} = Q_{cho1} + Q_{cho2} + Q_{cho3}, \quad (7)$$

pričom:

$$Q_{cho} = m_x \cdot c_S \cdot (T_{kr} - T_{vyh}), \quad (8)$$

kde: m_x - hmotnosť taveniny,
 c_S - merná tepelná kapacita látky v tuhom stave,
 T_{kr} - teplota kryštalizácie,
 T_{vyh} - teplota odliatku po odliatí.

Potom vypočítané hodnoty tepla chladnutia odliatku sú: $Q_{cho1} = 1,17$ MJ, $Q_{cho2} = 0,73$ MJ, $Q_{cho3} = 0,09$ MJ. Výsledná hodnota tepla chladnutia odliatku je $Q_{cho} = 1,99$ MJ.



Obrázok 2 - Termosnímkok odliatku po odliatí (M1 - teplota odliatku, M2 - teplota tablety, M3 - teplota vtokovej sústavy)

Pre celkové teplo odvedené jednotlivými zložkami platí:

$$Q_c = Q_{sál} + Q_{pr} + Q_{ch} + Q_{on} + Q_{str} + Q_{piest}, \quad (9)$$

Pre teplo odvedené sálaním platí:

$$Q_{sál}(0,85) = Q_{sál1}(0,85) + Q_{sál2}(0,85) \quad (10)$$

pričom:

$$Q_{sál1}(0,85) = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{sp}^4 - T_o^4) \cdot S \cdot t_{cyk} \quad (11)$$

$$Q_{sál2}(0,85) = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{spd}^4 - T_{od}^4) \cdot S_d \cdot t_{cyk \cdot od} \quad (12)$$

- kde: σ - Stefan-Boltzmanova konštanta,
 ε - pomerná sálavosť,
 T_{sp} - teplota povrchu formy,
 T_{spd} - teplota dutiny formy,
 T_o - teplota okolia
 T_{od} - teplota medzi otvorenými polovicami formy
 t_{cyk} - doba cyklu
 $t_{cyk \cdot od}$ - doba otvorenia formy
 S - plocha formy v styku s okolím
 S_d - plocha formy v deliacej rovine

Výsledná hodnota tepla odvedeného sálaním je $Q_{sál}(0,85) = 0,032$ MJ.

Pre teplo odvedené prúdením platí

$$Q_{pr} = Q_{pr1}(0,85) + Q_{pr2}(0,85) \quad (13)$$

pričom:

$$Q_{pr1} = \alpha_k \cdot (T_{sp} - T_o) \cdot S \cdot t_{cyk} \quad (14)$$

$$Q_{pr2} = \alpha_{kd} \cdot (T_{spd} - T_{od}) \cdot S_d \cdot t_{cyk \cdot od} \quad (15)$$

hodnoty parametrov α_k a α_{kd} vypočítame zo vzťahov (16) a (17)

$$\alpha_k = 1,77 \cdot (T_{sp} - T_o)^{1/4} \quad (16)$$

$$\alpha_k = 8,35$$

$$\alpha_{kd} = 1,77 \cdot (T_{spd} - T_{od})^{1/4} \quad (17)$$

$$\alpha_{kd} = 8,45$$

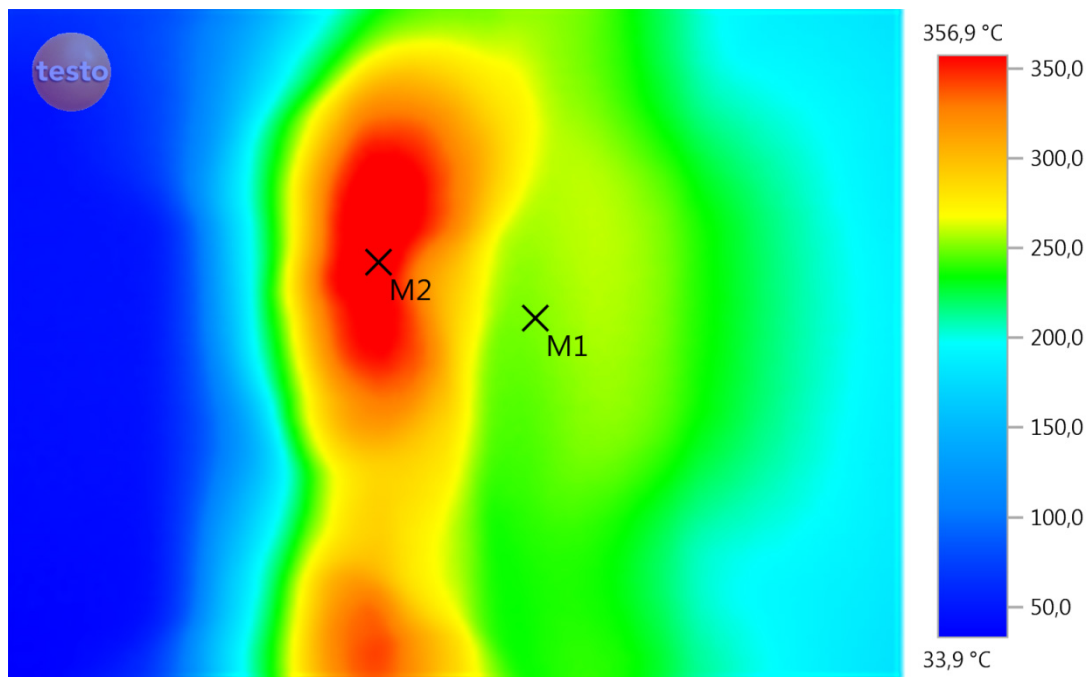
kde: α_k -
 α_{kd} -
 T_{sp} - teplota povrchu formy,
 T_{spd} - teplota dutiny formy,
 T_o - teplota okolia
 T_{od} - teplota medzi otvorenými polovicami formy
 t_{cyk} - doba cyklu
 $t_{cyk\ od}$ - doba otvorenia formy
 S - plocha formy v styku s okolím
 S_d - plocha formy v deliacej rovine

Výsledná vypočítaná hodnota tepla odvedeného prúdením je $Q_{pr} = 0,409$ MJ.

Pre teplo odvedené rámom stroja a upevňovacou doskou formy vypočítame pomocou rovnice (18)

$$Q_{str} = \alpha_{kv} \cdot (T_{sp} - T_o) \cdot S_v \cdot t_{cyk} \quad (18)$$

Výsledná hodnota tepla odvedená rámom stroja a upevňovacou doskou formy je $Q_{str} = 0,622$ MJ.



Obrázok 3 - Termosnímok tlakovej lejacej formy (M1- teplota povrchu formy, M2 - teplota dutiny formy)

Pre teplo odvedené pri odparovaní tuhej fázy z nástreku formy platí:

$$Q_{on} = Q_{on1} + Q_{on2} \quad (19)$$

$$Q_{on1} = m_k \cdot c_k \cdot \Delta T \quad (20)$$

$$Q_{on2} = m_k \cdot L_k \quad (21)$$

kde: m_k - hmotnosť odparenej kvapaliny,
 c_k - merná tepelná kapacita kvapaliny,
 L_k - merné skupenské teplo vyparovania v nástreku,
 ΔT - rozdiel teplôt medzi počiatočnou teplotou kvapaliny a teplotou vyparovania.

Potom vypočítané hodnoty tepla odvedeného pri odparovaní tuhej fázy z nástreku formy sú $Q_{on1} = 1,14$ MJ a $Q_{on2} = 1,83$ MJ z čoho výsledná hodnota tohto tepla je $Q_{on} = 2,97$ MJ,

Pre teplo odvedené temperačným systémom formy platí:

$$Q_{ch} = m_t \cdot c_t \cdot \Delta T_t \quad (22)$$

kde: m_t - hmotnosť temperačného média pretečeného počas jedného cyklu,
 c_t - merná tepelná kapacita temperačného média,
 ΔT_t - rozdiel teplôt medzi vstupnou a výstupnou hodnotou temperačného média v systéme.

Potom výsledná hodnota tepla odvedeného temperačným systémom je $Q_{ch} = 0,38$ MJ

Pre celkové teplo odvedené zo systému potom platí:

$$Q_c = Q_{sál} + Q_{pr} + Q_{str} + Q_{on} + Q_{ch} \quad (23)$$

Výsledná hodnota tepla odvedeného zo systému je $Q_c = 4,413$ MJ

Z porovnania (24) tepla dodaného do systému Q_o a tepla Q_c zo systému odvedeného sme vo výsledku zistili nerovnosť (25).

$$Q_o = Q_c \quad (24)$$

$$5,56 \text{ MJ} \neq 4,413 \text{ MJ} \quad (25)$$

5 Záver

Zistená nerovnosť medzi teplom Q_o , ktoré je do sústavy dodané a teplom Q_c , ktoré je zo sústavy odvedené je spôsobená najmä tým, že podnik sa vo výrobe doposiaľ tepelnou bilanciou formy nezaoberal. Jednotlivé parametre odvodu tepla nie sú nastavené tak, aby bola dodržaná rovnica tepelnej bilancie. Vo výskume a nastavením jednotlivých parametroch sa bude pokračovať aj naďalej, spolu so sledovaním a vyhodnocovaním kvalitatívnych zmien odliatkov a teda nepodarkovosti.

Výskum bol podporený projektom zo štrukturálnych fondov EÚ, operačný program Výskum a vývoj, ITMS kód projektu: 26220220030

6 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.

BALARA, M., TÓTHOVÁ, M.: Simulačný model riadenia vykurovacieho systému s kaskádnou regulačnou štruktúrou. In: *Zborník príspevkov ARTEP 2015*, Stará Lesná, Február 11-13, 2015, Košice: TU v Košiciach, 2015. s. 32-1-7. ISBN 978-80-553-1968-1

CHAKRABARTI, A.K.: *Casting technology and cast alloys*, New Delhi: Prentice Hall of India Private Limited, 2005, 273 p. ISBN 81-203-2779-9.

LAUDÁR, J.: *Liatie pod tlakom*, SVTL Bratislava, 1964, 266 s.

MACHUTA, J., NOVA, I.: *Slévarenské formy*, Liberec: TUL, 2014, 165s. ISBN 978-80-7494-083-5

BALARA, M., TÓTHOVÁ, M.: Simulačný model riadenia vykurovacieho systému s kaskádnou regulačnou štruktúrou. In: *Zborník príspevkov ARTEP 2015*, Stará Lesná, Február 11-13, 2015, Košice: TU v Košiciach, 2015. s. 32-1-7. ISBN 978-80-553-1968-1

MIŽÁKOVÁ, J., PITEĽ, J., HREHOVÁ, S.: Some Simulation Results of Heat Transfer through the Wall Model. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2014. Vol. 8 (2014), pp. 1-8. ISSN 1998-0140

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, 383 s. ISBN 978-80-8073-979-9.

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

ŠEBL, J.: *Litíkovů pod tlakem*, SNTL Praha, 1963, 123 s.

ŠEBL, J.: *Formy pro litíkovů pod tlakem*, SNTL Praha, 1962, 115 s.

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

NOVA, I.: *Přenos tepla ve slévarenských formách*, Liberec: TUL, 2014, 154s. ISBN 978-80-7494-141-2

Použití grafů v úlohách vícekritériální analýzy variant Using Graphs in Multi-Criteria Analysis Tasks

FARANA, Radim¹

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

Abstrakt: úlohy vícekritériální analýzy jsou nástrojem k řešení komplikovaných rozhodovacích problémů, kdy hledáme optimální řešení při uvažování většího množství, často protichůdných, kritérií a proto nám dávají možnost řešení i velmi složitých problémů. K objektivizaci přístupu se používají týmy expertů a využívají jejich znalosti a zkušenosti. Některé metody, zejména při určování významnosti kritérií, vedou k přeurenění a z toho vyplývá nebezpečí nekonzistentního hodnocení experta. Příspěvek ukazuje, jak nám v těchto situacích mohou pomoci aplikace grafů pro odhalení nebo dokonce odstranění nekonzistence hodnocení. Jmenovitě u metody Fullerova trojúhelníku a Saatyho metody určení významnosti kritérií.

Klíčová slova: vícekritériální analýza, graf, Fullerův trojúhelník, Saatyho metoda.

1 Metody vícekritériální analýzy

Metody vícekritériální analýzy variant (vícekritériálního rozhodování) jsou popsány v řadě publikací, např. [Multi-criteria analysis 2009, TRIANTAPHYLLOU, E. 2000, JABLONSKÝ, J. 2007, MALAKOOTI, B 2013, FRIEBELOVÁ, J.] a stále jsou zdrojem řady aplikací při řešení komplikovaných rozhodovacích úloh, viz např. [BOROVCOVÁ M. 2010].

Typický postup řešení sestává z těchto kroků:

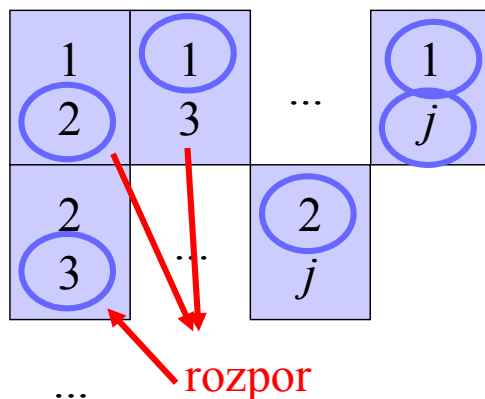
1. Stanovení variant řešení.
2. Stanovení kritérií hodnocení.
3. Určení významnosti kritérií.
4. Určení ohodnocení variant podle kritérií.
5. Určení typu kritérií.
6. Vyhodnocení variant.

K výběru nejlepší varianty při respektování většího množství, často protichůdných kritérií, využíváme znalosti expertů. Především ve fázi určení významnosti jednotlivých kritérií. Postupně bylo vypracováno několik metod, které se snaží pomoci expertům při určování významnosti kritérií, zejména když je jich větší množství. Velmi účinně metody jsou zejména Fullerův trojúhelník a Saatyho metoda. Bohužel usnadnění rozhodování expertů je vyváženo nebezpečím rozporného hodnocení, které může negativně ovlivnit výsledek celé vícekritériální analýzy, protože z praxe víme, že tyto úlohy jsou často velmi citlivé na významnost kritérií. Čili i malá změna významnosti kritérií může způsobit výraznou změnu výsledného hodnocení variant.

Tento příspěvek ukazuje, jak můžeme účinně využít metody známé z Teorie grafů, např. [DEMEL 2015], pro odhalení těchto nekonzistencí nebo jim dokonce zamezit.

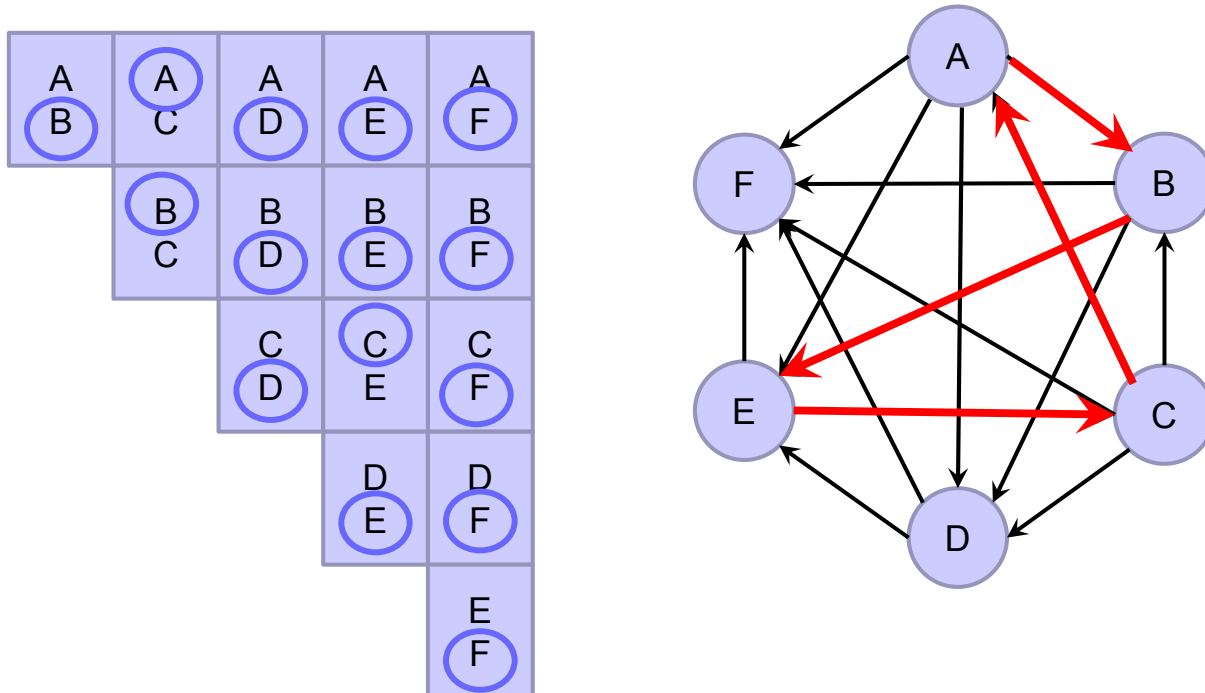
2 Fullerův trojúhelník

Fullerův trojúhelník, nebo také metoda párového srovnávání je způsob jak porovnat a určit významnost i velkého množství hodnotících kritérií. Expertovi je předložena sada všech dvojic kritérií se žádostí aby označil, které z dvojice je důležitější, případně může také označit obě za stejně důležitá. Tím se jeho rozhodování na jedné straně velmi zjednodušuje, ale současně vzniká nebezpečí, že jeho názor bude nekonzistentní, viz obr. 1. Jestliže je kritérium 2 důležitější než 1 a současně kritérium 1 je důležitější než 3, pak v důsledku musí být kritérium 2 důležitější než 3 a ne naopak.



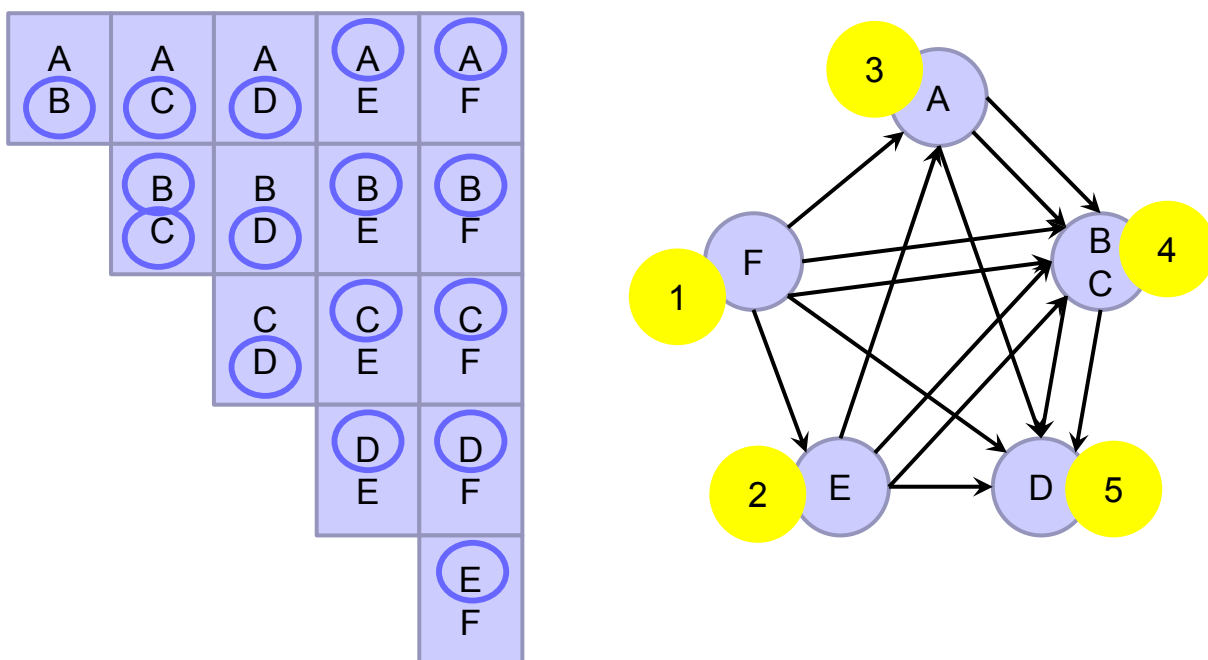
Obrázek 1 – Příklad nekonzistentního hodnocení experta při použití Fullerova trojúhelníku

Tento rozpor není možno řešit a ve složitějších případech je možné, že ani nebude odhalen. K tomu můžeme s výhodou využít graf (úplný), ve kterém uzly představují kritéria a hrany jejich vzájemné hodnocení. Jestliže hrany zorientujeme směrem k významnějšímu kritériu, musí být výsledný graf acyklický. Pokud graf obsahuje cykly, je hodnocení nekonzistentní, viz obr. 2. K určení, zda je graf acyklický přitom použijeme např. kontrolu acykličnosti očíslováním uzlů od počátečního ke koncovému.



Obrázek 2 – Příklad odhalení nekonzistentního hodnocení Fullerovým trojúhelníkem pomocí kontroly acykličnosti grafu

Příklad na obr. 2 obsahoval pouze striktní rozhodnutí, metoda Fullerova trojúhelníku ale umožňuje také označení dvojice kritérií za stejně důležitá. V tom případě bychom s jednoduchým použitím grafu. Nejprve sloučíme uzly představující kritéria označená jako stejně významná, v příkladu na obr. 3 jsou to kritéria B a C.



Obrázek 3 – Kontrola konzistence hodnocení Fullerovým trojúhelníkem s výskytem dvojice stejně významných kritérií.

Následně postupuje již stejným způsobem. Hodnocení jednotlivých dvojic kritérií budou představovat hrany orientované směrem k významnějšímu kritériu. Jak vidíme na obr. 3, graf bude obsahovat řadu rovnoběžných hran, aby bylo hodnocení konzistentní musí být rovnoběžné hrany vždy orientovány souhlasně (musí být násobné). Jak je na obr. 3 ukázáno v tomto případě je hodnocení konzistentní, graf neobsahuje žádné cykly a mohl být očíslován tak, že hrany vždy vedou z uzlu nižšího čísla do uzlu vyššího čísla.

2 Saatyho metoda

Saatyho metoda nebo také kvantitativní párové srovnávání kritérií je více sofistikovaná metoda, umožňující lépe popsat rozdíly ve významnosti kritérií. Srovnávají se opět vždy páry kritérií a hodnocení se ukládá do tzv. Saatyho matice $S = (s_{ij})$ podle následujícího systému:

$$(s_{ij}) = \begin{cases} 1 & - i \text{ a } j \text{ jsou rovnocenná} \\ 3 & - i \text{ je slabě preferováno před } j \\ 5 & - i \text{ je silně preferováno před } j \\ 7 & - i \text{ je velmi silně preferováno před } j \\ 9 & - i \text{ je absolutně preferováno před } j \end{cases} \quad (1)$$

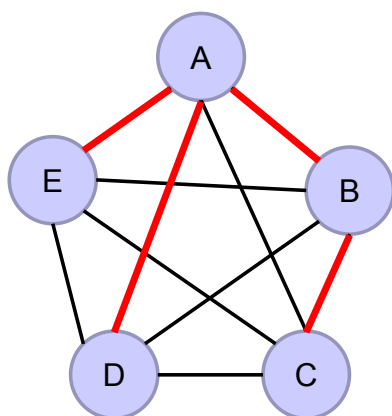
Hodnoty 2,4,6 a 8 jsou ponechány pro hodnocení mezistupňů, takže se obecně mohou vyskytovat, Je zřejmé, že $s_{ii} = 1$ pro všechna i , neboť kritérium je rovnocenné samo se sebou a musí platit, že $s_{ji} = 1/s_{ij}$ pro všechna $i \neq j$.

Hodnota s_{ij} vlastně představuje přibližný poměr vah kritéria i a j :

$$s_{ij} \approx \frac{v_i}{v_j} \quad (2)$$

Opět zde hrozí nebezpečí nekonzistentního hodnocení, ale kvantifikace preference nám dává možnost toto nebezpečí eliminovat. Vyjdeme-li z předpokladu, že pokud je kritérium A slabě preferováno před kritériem B a současně kritérium B slabě preferováno před kritériem C, pak je důsledkem že kritérium A je silně preferováno před kritériem C, stačí nám určit minimální počet preferencí a všechny ostatní z nich vyplývají.

Je třeba si uvědomit jaký je nejmenší potřebný počet porovnání a současně která to jsou. Celkový počet porovnání vyjadřuje úplný graf mající $\frac{k(k-1)}{2}$ hran. Minimální počet dvojic pak reprezentuje jeho kostra (kterákoliv) mající $k - 1$ hran, viz obr. 4.



Obrázek 4 – Určení potřebného počtu porovnání pro Saatyho metodu

Následně získáme hodnocení experta, např.:

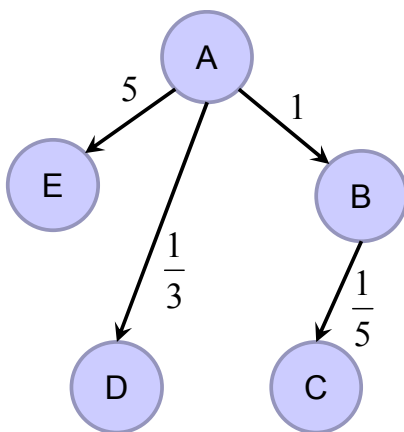
$$A - B = 1$$

$$B - C = 1/5$$

$$A - D = 1/3$$

$$A - E = 5$$

Příslušné hrany znázorníme v grafu včetně orientace odpovídající směru hodnocení (ve výše uvedeném zápisu tedy zleva doprava), viz obr. 5. Vidíme, že kritéria A a B jsou hodnocena jako stejně významná, kritérium C je silně preferováno před kritériem B atd.

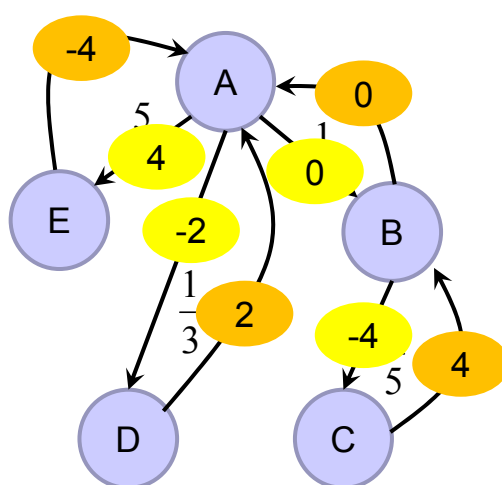


Obrázek 5 – Znázornění hodnocení experta v grafu

Nyní hodnocení nahradíme body podle tabulky 1 a přidáme opačně orientované hrany s opačným bodovým ohodnocením, viz obr. 6.

Tabulka 1 – Převod hodnocení na bodové hodnocení (a zpět)

Hodn.	body		
$\frac{1}{9}$	-8	2	1
$\frac{1}{8}$	-7	3	2
...
$\frac{1}{2}$	-1	8	7
1	0	9	8



Obrázek 6 – Hodnocení experta převedené do bodové škály

Nyní pro každou dvojici kritérií X a Y určíme součet bodů na cestě z uzlu X do uzlu Y včetně respektování orientace hran a opět pomocí tabulky 1 převedeme na hodnocení. Tím získáme všechny prvky horního trojúhelníku Saatyho matice, diagonála obsahuje hodnoty 1 a dolní trojúhelník určíme jako reciproké hodnoty podle vztahu $s_{ji} = 1/s_{ij}$.

	A	B	C	D	E
A	1	1	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	5
B	5	1	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	5
C	5	5	1	3	9
D	3	3	$\frac{1}{3}$	1	7
E	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{7}$	1

Obrázek 7 – Výsledná Saatyho matice pro ukázkový příklad.

Další postup již respektuje standardní postup Saatyho metody, pro každé kritérium i určíme hodnotu:

$$s_i = \prod_{j=1}^k s_{ij}, \quad (3)$$

následně spočítáme při počtu kritérií k hodnotu, čili geometrický průměr hodnot s_{ij} :

$$R_i = (s_i)^{1/k} = \sqrt[k]{s_i}, \quad (4)$$

A v posledním kroku již určíme váhy jednotlivých kritérií:

$$v_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^k R_i} \quad (5)$$

V ukázkovém příkladu jsou výsledné váhy kritérií ukázány v tabulce 2.

Tabulka 2 – Výpočet vah kritérií Saatyho metodou

Saatyho matice							váha		
	A	B	C	D	E	s_i	R_i	v_i	
A	1	1	0,2	0,333333	5	0,333333	0,8027	0,10917	
B	1	1	0,2	0,333333	5	0,333333	0,8027	0,10917	
C	5	5	1	3	9	675	3,6801	0,50046	
D	3	3	0,333333	1	7	21	1,8384	0,25001	
E	0,2	0,2	0,111111	0,142857	1	0,000635	0,2294	0,03119	

Konzistenci Saatyho matice můžeme zkontrolovat např. výpočtem odhadu rozptylu:

$$\sigma^2 = \frac{F}{d} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j>i} (\ln s_{ij} - (\ln v_i - \ln v_j))^2}{\frac{(k-1)(k-2)}{2}} \quad (6)$$

S tím, že pro pět kritérií je požadován odhad rozptylu menší než 0,2. Pro ukázkový příklad vychází hodnota 0,155. Popsaným postupem máme jistotu dosažení konzistentního hodnocení, ale je potřeba si uvědomit, že dospět k hodnocení vyššímu než 9, resp. nižšímu než 1/9.

4 Závěr

Prezentované aplikace ukazují, že použití grafů nám může usnadnit řešení nejrůznějších úloh, i tam kde bychom to původně neočekávali. Stejně jako použití metod vícekritériální analýzy variant v rozhodovacích procesech. Prezentované výsledky byly získány na Ostravské univerzitě v Ostravě v rámci řešení projektu Studentské grantové soutěže SGS02/UVAFM/2016 „Aplikace fuzzy přístupů pro analýzu, popis, predikci a řízení systémů“ za účasti studentů, podporovaný Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR. Výsledné postupy byly následně zařazeny do výuky odborných předmětů Metody operačního výzkumu 1 a 2 [FARANA 2016], který poskytuje studentům jak znalosti jednotlivých metod operačního výzkumu, tak je vede k jejich využívání v praxi.

5 Použitá literatura

BOROVCOVÁ M. 2010. Metody vícekritériálního hodnocení variant a jejich využití při výběru produktu finanční instituce. In: *5. mezinárodní konference Řízení a modelování finančních rizik*, VŠB-TUO EkF, 2010, 8 pp. Dostupný z webu:

- https://www.ekf.vsb.cz/export/sites/ekf/rmfr/.content/galerie-dokumentu/2014/plneni-prispevku/Borovcova.Martina_1.pdf
- DEMEL, J. 2015. *Grafy a jejich aplikace*. 2. vyd. (Vlastním nákladem 1.). Libčice nad Vltavou: J. Demel, 2015, 257 s. ISBN 978-80-260-7684-1.
- FARANA, R. 2016 Učební opory pro předmět *Metody operačního výzkumu 1 a 2* [on-line], 2013 – 2016, dostupný z webu <http://www1.osu.cz/~farana1/MOPV/Index.htm>
- FRIEBELOVÁ, J. *Vícekritériální rozhodování za jistoty* [on-line], 24 s. Dostupný z webu: <http://www2.ef.jcu.cz/~jfrieb/tspp/data/teorie/Vicekritko.pdf>.
- JABLONSKÝ, J. 2007 *Operační výzkum: kvantitativní metody pro ekonomické rozhodování*. 3. vyd. Praha: Professional Publishing, 2007, 323 s. ISBN 978-80-86946-44-3.
- MALAKOOTI, B. 2013. *Production and operation systems with multiple objectives*. John Wiley & Sons, 2013, 1114 pp. ISBN 9781118585375.
- Multi-criteria analysis: a manual*. London: Department for Communities and Local Government, 2009, 168 pp. ISBN: 978-1-4098-1023-0. Dostupný z webu: http://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria_Analysis.pdf
- TRANTAPHYLLOU, E. 2000. *Multi-criteria decision making methods: a comparative study*. Boston, Mass.: Kluwer Academic Publishers, 2000, 288 pp. ISBN 0-7923-6607-7.

The High Speed Current Sensing System

GEBAUER, Jan¹, FOJTÍK, David² & PODEŠVA, Petr³

¹ Ing., ✉ 17. listopadu 15, 70833 Ostrava Poruba. VŠB-TUO, 🖥 jan.gebauer@vsb.cz

² Ing., Ph.D., ✉ 17. listopadu 15, 70833 Ostrava Poruba. VŠB-TUO, 🖥 david.fojtik@vsb.cz

³ Ing., ✉ 17. listopadu 15, 70833 Ostrava Poruba. VŠB-TUO, 🖥 petr.podesva@vsb.cz

Abstract: This paper is a description of a procedure of development and testing of the High speed current sensing system (HSCSS). The short brief of the two possible ways is presented. Other part of article is about the introduction of two precise methods of current measurement process of CMT (Cold Metal Transfer) welding. The first one is based on the coupled IC devices consists of a low-offset linear Hall circuit. The second sensor is based on current transducer where measurement is based on the Hall-effect principle.

Keywords: paper, conference, format, template, instructions

1 Introduction

Cold Metal Transfer (Fig. 1) is a kind of MIG/MAG (metal inert/argon gas) process developed for welding and also for brazing. It is commonly used in the automotive industry. The principle of the CMT method is to minimize spatter formation and the heat input. This causes less damage to the base metals being joined [1].

CMT technology is based on mechanically retracting wire. Due to the retraction and the current and voltage control system, the current rush is avoided. One drop of metal is transferred, by mechanical retraction and not by electromagnetic pinch-effect.

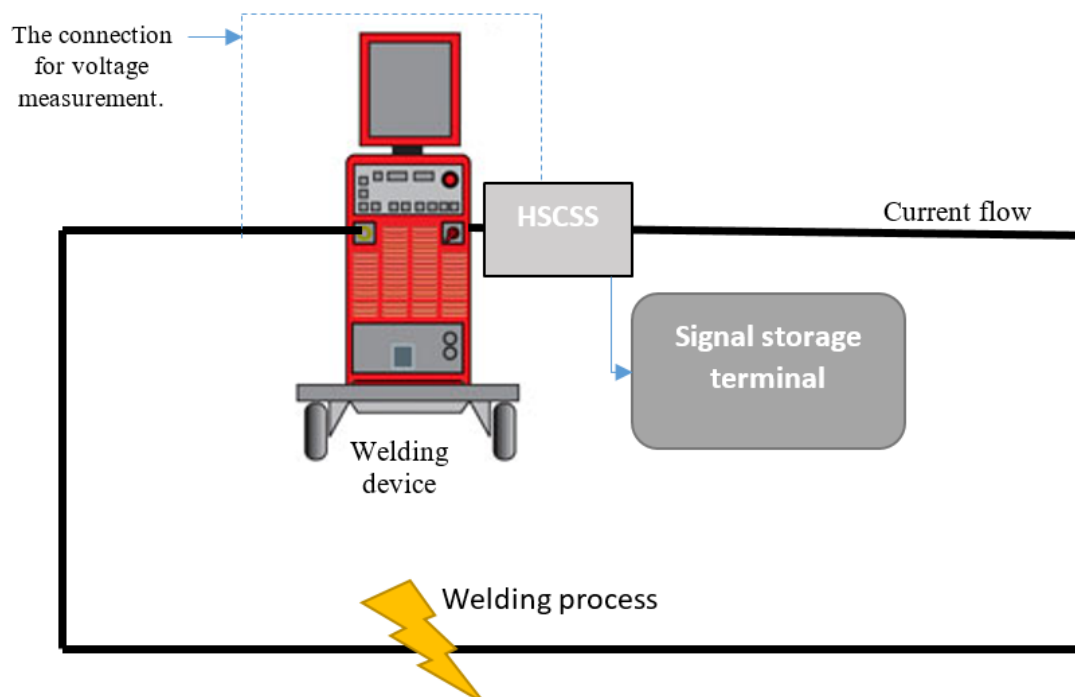


Figure 1 - The HSCSS sensors in connection.

2 System description

HSCSS is composed of two separated parts. The first one is current sensor (Figure 2) connected directly to CMT process and the second is the processing unit called the signal storage terminal (Figure 3). The current sensor is plugged into system in series as you can see on Figure 1.



Figure 2 - The HSCSS sensors in connection.



Figure 3 - Connected HSCSS. The processing unit is equipped with small touch-panel for operator.

3 Sensor description

There are two possible ways how to precisely measure high speed current during the process of welding.

The first one is based on the coupled IC (integrated circuit) devices consisting of a low-offset linear Hall circuit. Applied current flowing through this copper conduction path (Fig. 4, Fig. 5) generates a magnetic field which the Hall IC converts into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise and proportional output voltage is provided by the low-offset, chopper-

stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy at the factory. The internal resistance of this conductive path is 100 $\mu\Omega$ typical, providing low power loss. It means that process of welding is not affected by connected sensor. The thickness of the copper conductor allows survival of the device at high overcurrent conditions. The terminals of the conductive path are electrically isolated from the signal leads. The heavy gauge leadframe is made of oxygen-free copper.

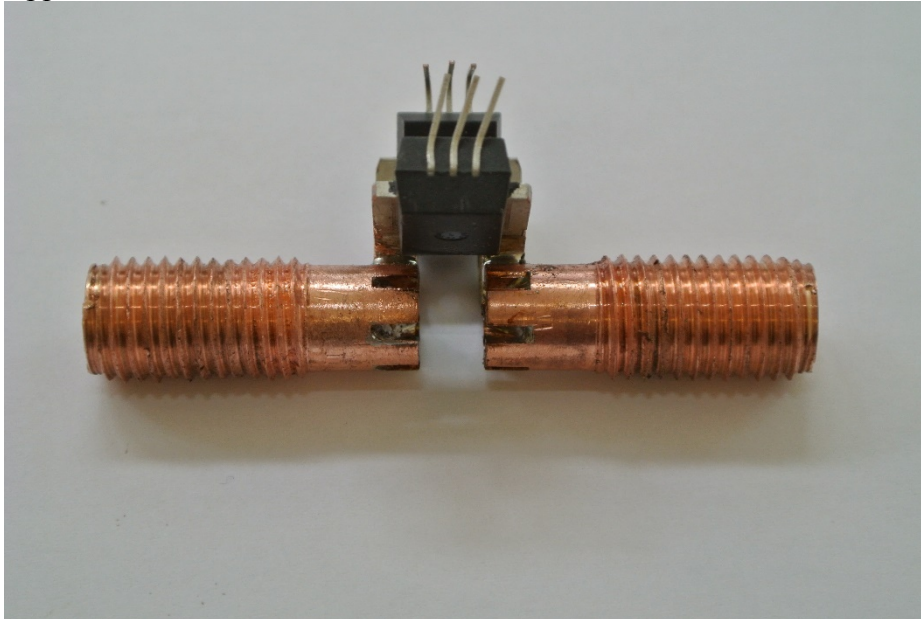


Figure 4 - Coupled ICs on the oxygen-free copper platform.

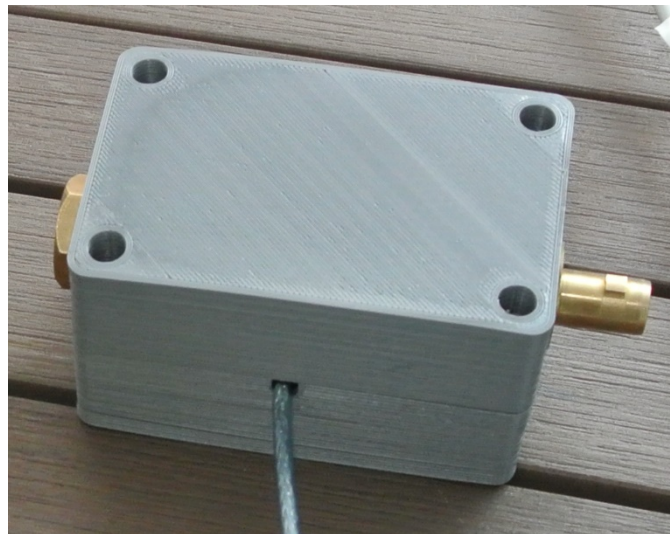


Figure 5 - Coupled ICs on the oxygen-free copper platform. The housing of integrated IC sensor and signal processing PCBs.

The IC sensor features:

- Primary sampled current IP = ± 400 A
- Bidirectional
- Nominal Operating Ambient Temperature -40 $^{\circ}\text{C}$ to +85 $^{\circ}\text{C}$
- 1200 A Overcurrent @ 25 $^{\circ}\text{C}$ @ 1s duration, 1% duty cycle
- Step response time to 90% of IP is 3 μs

The second sensor is based on current transducer (Fig. 6, Fig. 7). The measurement is based on the Hall-effect principle. The measurement is done by two coils which are isolated by galvanic separation. The offset of measurement is ratiometric. The sensor does not affect

the welding circuit at all. There is no necessity to interrupt welding process in case of sensor failure.

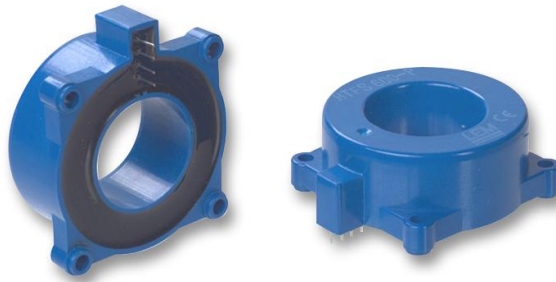


Figure 6 - Current transducer with ratiometric offset.

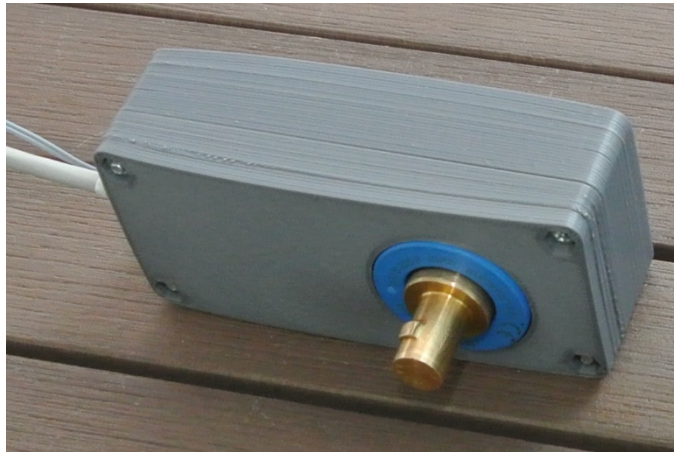


Figure 7 - The housing of current transducer sensor and PCBs.

The coil sensor features:

- Primary sampled current $I_P = \pm 300 \text{ A}$
- Bidirectional
- Nominal Operating Ambient Temperature $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ to $+105 \text{ }^\circ\text{C}$
- Step response time to 90% of I_P is $3,5 \mu\text{s}$
- Low cost

4 Signal processing

A. Hardware

As a recording device a board based on STM32F407VG was used. It is equipped with touchscreen display, secure digital (SD) card and two 16-bit A/D converters (ADC) LTC1864. The CPU is 32 bit with a frequency of 166 MHz and 16 bit hardware floating point unit.

The basic elements of unit are the LTC1864 converters. They are single-channel 16 bit SPI/I2C ADC with frequency measurement up to 250 kHz with 0-5 V range. 3-wire SPI is used for read only wiring. Conversion and sending off the sample is triggered by a control input. The 100 kHz sampling frequency requires the sampling period less than 10 microseconds. Per sample conversion time is 3.2 microseconds. The minimal frequency of 2.5 kHz is required on SPI clock for 16-bit word handling, so the minimum period has to be 0.4 microseconds. Frequency of 4 kHz is easy to reach on used STM32F407VG.

The use of a high-speed SD card at least class 10 is required because of the high frequency of measurement. The measured data are stored in the 4 kB buffers that are alternately written on SD card between measurements. For the optimal write speed of the SD card the FAT32 file system with 4 kB cluster sizes is used.

LC display with resistive touch screen has a diagonal of 3.2 inches and 320x200 pixels resolution. To avoid slowdown of the system, neither display updates nor interrupts from the touch panel are enabled during the measurement.

B. Data processing

The data from both voltage and current inputs are stored continuously to file as 16bit number every single sampling period. The welding process period is 70 seconds long and consists of 16 welding connections. If the 100ksps sampling frequency is chosen, the complete file has 26.7MB. Since data are filtered offline it is not necessary to keep that big amount of data. A software application was created for the offline data handling. In order to reduce computing time it is possible to resample the output data. Created application was used for advanced data import into the third party SW (see Fig. 8).

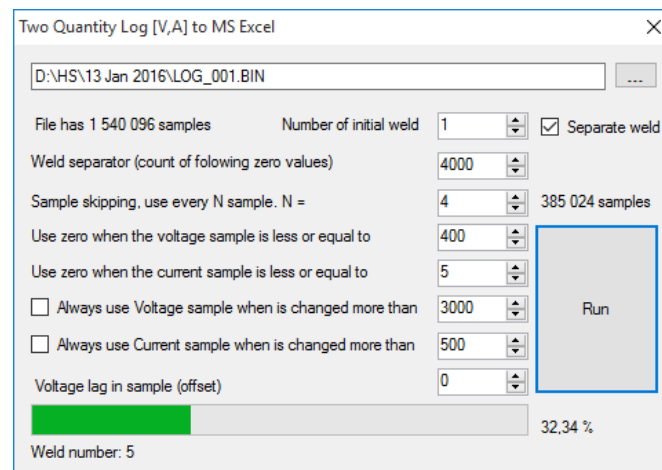


Figure 8 - Advanced import application interface.

The parameters of app. allow the user to change desired output data. Basically the app. creates an MS Excel file with sheets. Each sheet contains separated welding connection data. In our case the file is composed of 16 Excel sheets (16 welding connections).

The whole welding process time is composed of time for welding and time for movements of robot. In order to reduce all unnecessary data from the file, the data of time of robot movements are removed. The algorithm is based on zero current and zero voltage detection. The app. allows the user to setup parameters of zero current and also zero voltage detection.

Resampling of data is an option of the app. The three main parameters can setup how the output data will be affected by the resampling process. The first one is N parameter, which selects every N sample from whole file. The second/third parameters affect how fast changes in current/voltage data can be ignored. This option will locally increase number of samples in critical time between rapid signal changes. More about hardware and data acquisition could be found on [2].

C. Data filtering

The pulsing current is used to melt the filler wire and allow one small molten droplet to fall with each pulse (see Fig. 9 and Fig. 10). This kind of welding process causes an inductance noise. The voltage signal output passes through a combination of analog and digital filters to minimize the noise and spikes. Since it is not possible to reduce the parasitic inductance to zero, spikes voltage might exist.

The digital filters are applied on both voltage and current sensors outputs. It is a combination of third order FIR filters and moving average. More about filtering could be found on [3], [4].

D. Data output

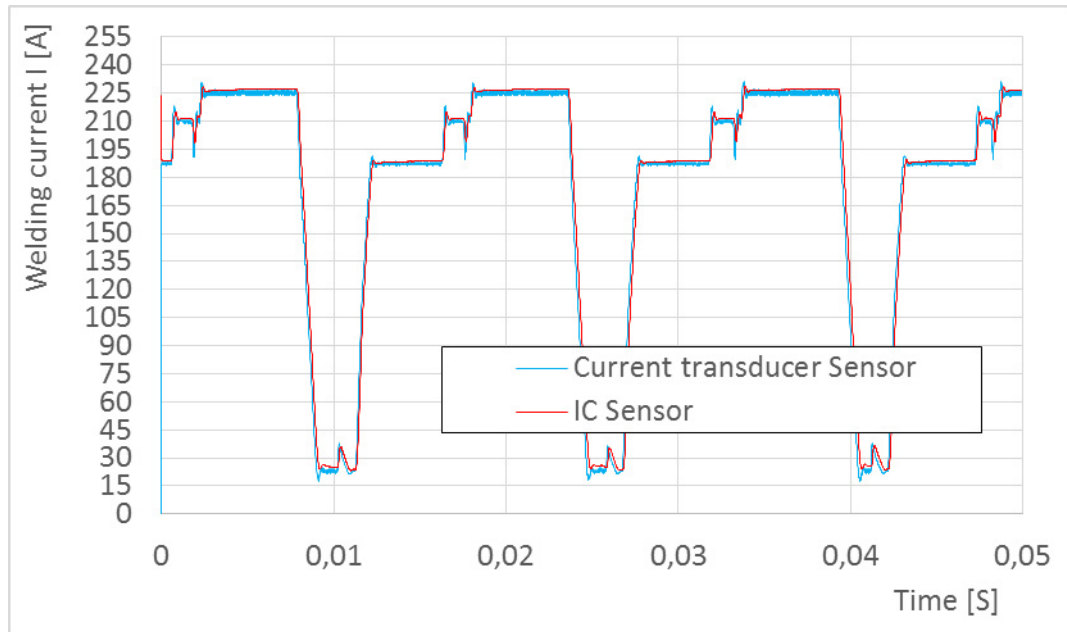


Figure 9 - Sensors comparison: Raw current output, several strokes @ 100ksps

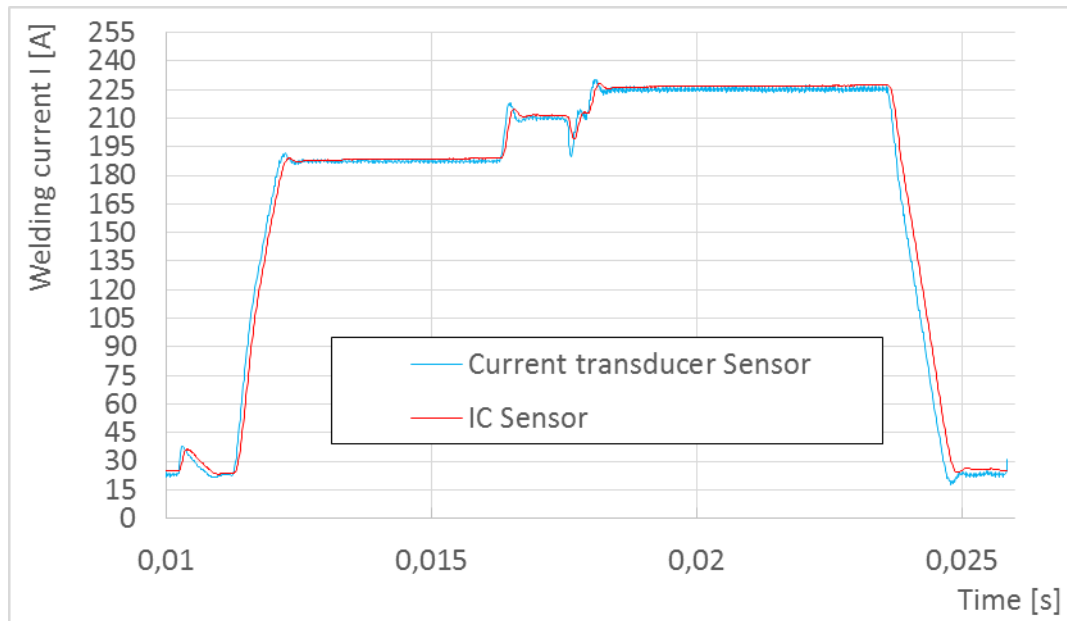


Figure 10 - Sensors comparison: Raw current output, 1 stroke in detail @ 100ksps

5 Failures specification

The filters setup can be changed in order to follow specified conditions of welding failures observation. The most common failures are the incorrect position, shape defects, porosity and insufficient fusion, incomplete or missing weld.

The creation of the bound limits based on ethalon welding connection is shown on Fig. 11. The most simplified algorithm of failure detection is based on detection of signal crossing the safe-zone limits.

The welding current output of “burn through” failure is shown on Fig. 12.

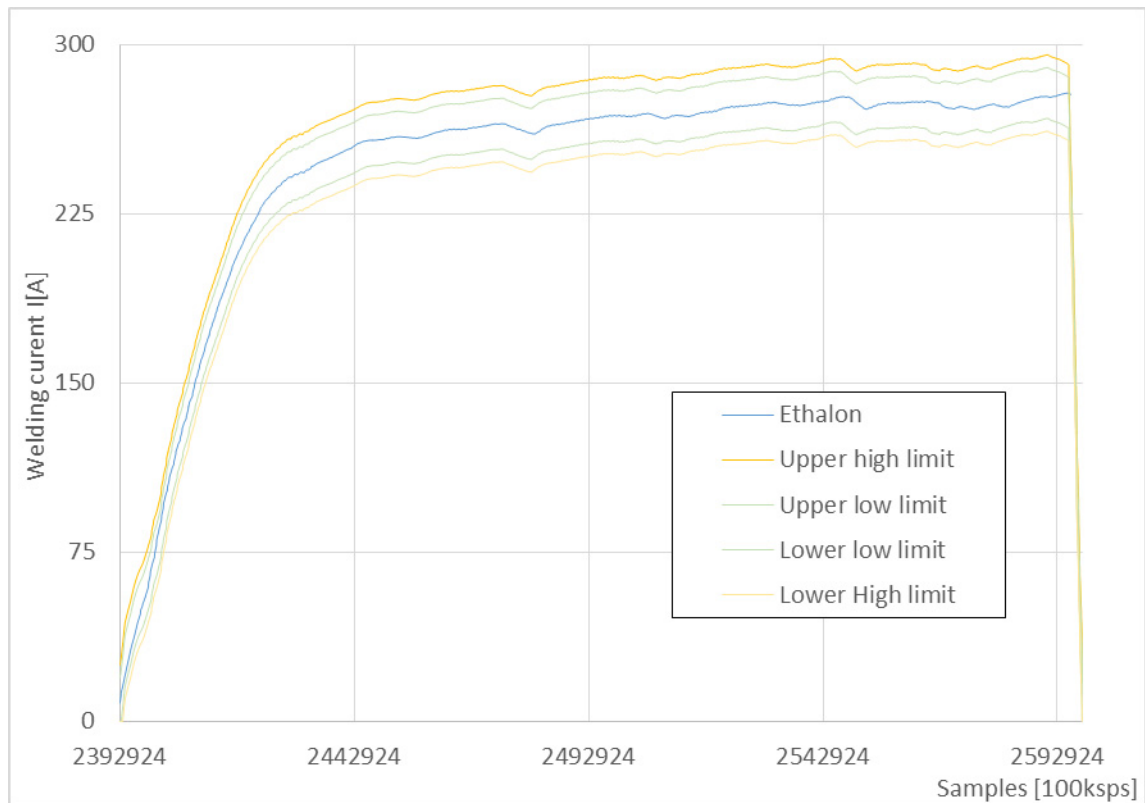


Figure 11 - The ethalon (blue line – welding current) filtered data. Creation of safe-zone bounds.

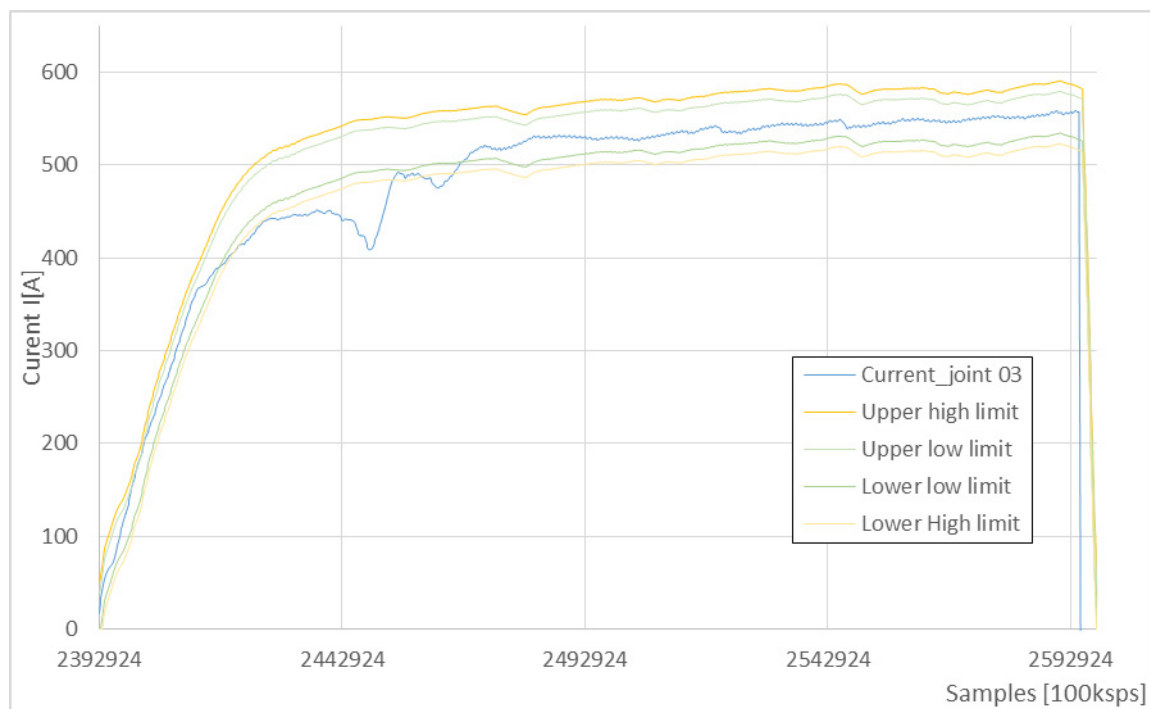


Figure 12 - Burn through failure process illustration (blue line – welding current).

Once the ethalon welding connection is established the operator can easily change parameters of tolerated overcurrent and overvoltage limits.

6 Conclusions

This paper describes the application of high speed current measurement system into CMT welding process. This measurement and data analysis require specific signal measurement

unit and algorithms [3], [4]. Process of CMT welding is important in automotive industry for its high quality and low costs in large quantities production. Presented system enables the real-time process and faults monitoring.

Acknowledgment

This research has been elaborated in the framework of the project No: SP2016/84 – Modern methods of machines and processes control. Supported by the Ministry of Education, Youth and Sports.

9 References

- [1] C.G. Pickin , S.W. Williams , M. Lunt, “Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding”, Welding Engineering Research Centre Cranfield University Bedfordshire, England. Journal of Materials Processing Technology, 2011, Volume 211, Issue 3, pp496-502
- [2] Grepl, R., “Real-time control prototyping in MATLAB/simulink: Review of tools for research and education in mechatronics”, IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2011 - Proceedings, art. no. 5971238, pp. 881-886.
- [3] Lamberský, V., Grepl, R., “Benchmarking various rapid control prototyping targets supported in Matlab/Simulink development environment”, Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances, 2014, pp.669-675.
- [4] Tůma J., “Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT”, Sdělovací technika, 1997, 80-901936-1-7.

Simulation Methods and Design of Experiments to Evaluate Accuracy of Industrial Robots

GRÚBEROVÁ, Michaela¹, PALENČÁR, Jakub² & PALENČÁR, Rudolf³

¹ Ing, ✉ Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automation, Measurement and Applied Informatics. Contact: Mýtňa 36, 812 31 Bratislava 1, Slovak Republic, 💻 e- michaela.gruberova@stuba.sk, 🌐 www.sjf.stuba.sk

² Ing, , 💻 jakub.palencar@stuba.sk, 🌐 www.sjf.stuba.sk

³ prof. Ing., CSc., , 💻 rudolf.palencar@stuba.sk, 🌐 www.sjf.stuba.sk

Abstract: *The paper deals with positioning accuracy of industrial robots and focuses on evaluation of the measurement uncertainty by means of proper selection of the design of experiments. In many situations in production process, a single measurement of a quantity is often fulfilling needs and acceptable for the purposes of the measurement being taken, though not outstanding. In this work, a technique is presented to evaluate the uncertainty for a parallel kinematics type robot.*

This types of industrial robots are increasingly used in wide range of production and manipulation of production and product manipulation. It is highly necessary to control accuracy of industrial robots and take attention to measurement management which can identify and evaluate the various factors that have impact on the final product quality.

Keywords: *positioning accuracy, industrial robots*

1 Introduction

At first we have to divide whole process of manufacturing of product to two interrelated parts. First one is the action or process of changing in shape of material to a product using the preprogrammed process in advance for ease of use or by operator himself. The second part is measuring of the first part output. This is mostly a repeating process where measurement results are used for compensation of first part errors.

Measurement results includes measurement uncertainty. Measurement uncertainty is an important parameter to express measurement results. Most factors affecting the outcome of the measurement can be quantified and evaluated.

2 Industrial Robots

Nowadays multi-axis serial, parallel and hybrid kinematic type industrial robots such as tripod, octopod, hexapod and others robots for high-speed picking, packing, manufacturing, assembly or measuring are used in all kinds of industry. An industrial robot is defined by ISO 8373 as an automatically controlled, reprogrammable, multipurpose manipulator programmable in three or more axes. This robots use sensors to control the move on the path of travel of the end effector (device at the end of an arm or rod of robot designed to interact with the work environment, where the tools are attached).

The difference between serial and parallel robots is that serial robots consist from links connected via actuated joints in series and a parallel robot those who have at least two rods/legs connected to the end effector and the base via actuated or passive joints.

The most known robots with parallel kinematic structure are tripod, hexapod and octapod. As you can see in the picture 1, the name of these robots is according of a number of rods. We have also other kinds such as tricept. Difference between tricept and tripod is tricept has a one helping central rod.

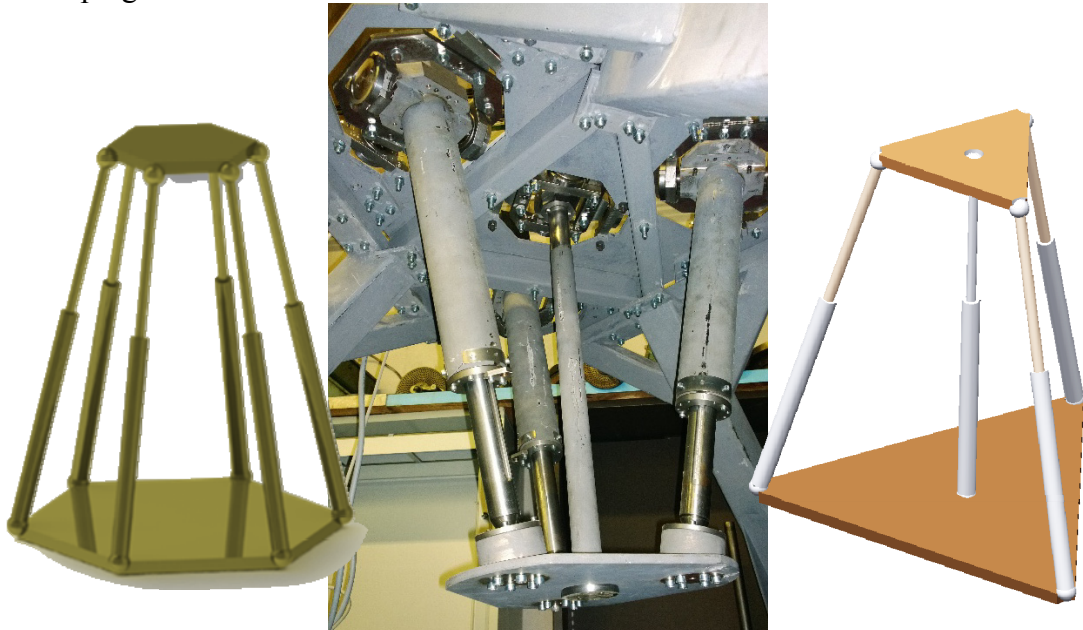


Figure 1 – Parallel hexapod, tricept and tripod robots

3 Design of Experiment

We can split the design of experiments into few elementary steps:

1. determination of the objective of the experiment (measurements) and the formulation of measurement model,
2. design of experiment (measurements),
3. realization of the experiment (measurements),
4. processing of measured data and evaluation of the experiment (measurements),
5. interpretation of the results in terms of the stated objectives of the experiment.

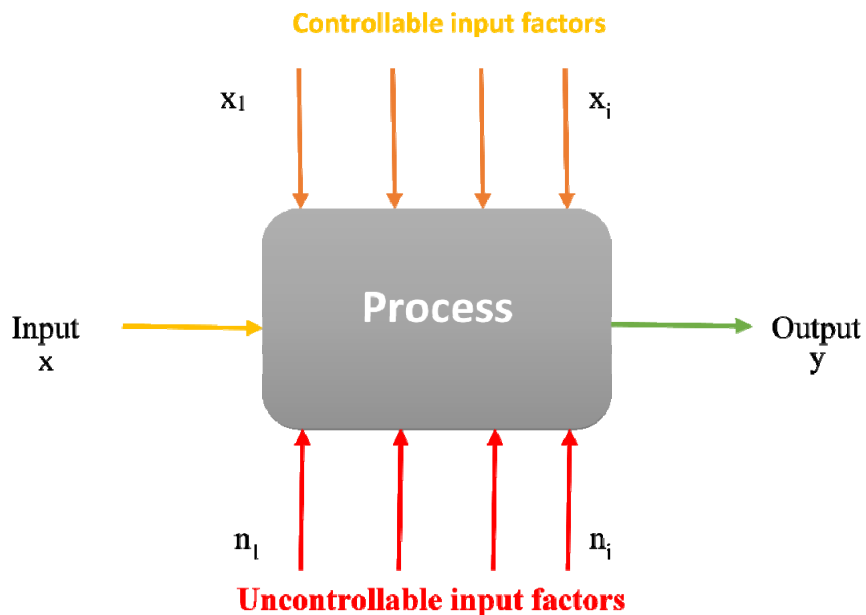


Figure 2 – Basic model of manufacturing process

We have to pay attention to which factors will be chosen because it is important to select only those factors which are important for the experiment result. For example, we can select factors such as material, cutting speed, rotation speed or load.

4 Setting and Targeting DOE Goals

Objectives of the experiment depends on the needs of the experimenter to obtain information leading to fulfil his requirements. Possible objectives include determining of the variables that have the greatest impact on output variable y , which set the variable x causes the least variability in response y and that their impact on uncontrollable variables n decrease to a minimum.

Basic principles of design of experiments:

- replication,
Replication is the repetition of the experiment and on the basis of same conditions.
- blocking,
Blocking experiment, the distribution of the block and is used to reduce or eliminate the variability factor that cannot be randomized. The block is a set of relatively homogeneous experimental conditions (eg. used materials, different suppliers, operators and so on.).
- randomization,
Randomization is determination of the shuffle experiments via computer programs using a random number generator.

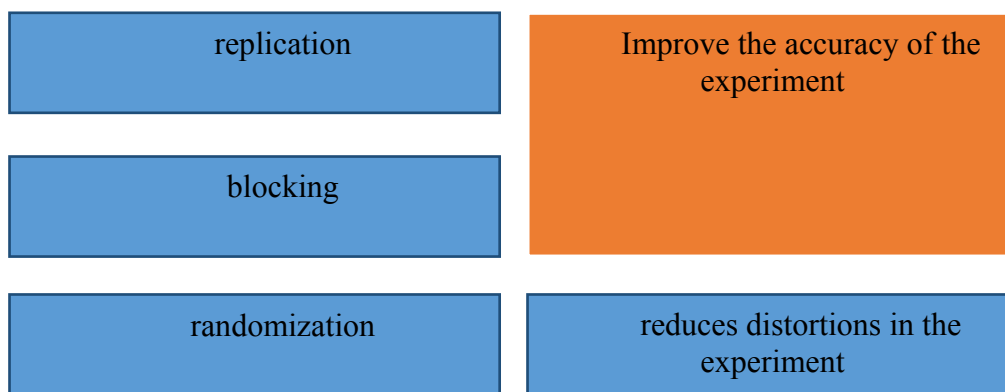


Figure 2 Basic principles of design of experiments

The full factorial designs (Linear model – first order model)

For full factorial designs with k factors with h levels, the full model contains all the main effects and all orders of interaction terms.

Number of measurements equals $n = h^k$. In the case if we consider four factors with two levels, it is sixteen measurements.

This complete experiment is often completely randomization experiment in which measurements on different combinations of levels of each factor are performed in random order.

Nonlinear models (Second order (quadratic) model)

These models are used when the first series of models depreciated adequately studied object. Compared to the first model are more complicated and assume more factor levels and more measurements. 2nd order model generally involves m unknown parameters,

$$m = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \tag{1}$$

which is $(k+2)/2$ times more than the models of the first order. Each factor in the second order must be changed at least three levels (where k is number of factors).

Central composite design for four factors

A central composite design is the most commonly used response surface designed experiment. This design starts firstly with a factorial or fractional factorial design (with center points) and add "star" points to estimate curvature. The following are the parts of central composite design:

Factorial points - UFE 2^k , for $k \leq 4$ ($5 \leq k \leq 7$)

RFE 2^{k-p} (2^{k-1} for $5 \leq k \leq 7$, 2^{k-2} for $k \geq 7$)

Star points - points that lie on the coordinate axes at a distance $\alpha > 0$ from the center of design. Their number is $n_s = 2k$.

Center points – point in the center of the design. The number of center points is $n_0 \geq 0$.

In Central Composite Designs $\alpha = (\text{number of fractional runs})^{1/4}$ and if the factorial is a full factorial, then $\alpha = (2^k)^{1/4}$.

Table 2 Central composite design

t_1	t_2	...	t_k	Number of points	Part of design
-1	-1	...	-1	$n_c = 2^k$ $n_c = 2^{k-p}$	Factorial points
-1	-1	...	+1		
...		
+1	+1	...	+1		
-α	0	...	0	$n_s = 2k$	Star points
+α	0	...	0		
0	-α	...	0		
0	+α	...	0		
...		
0	0	...	-α		
0	0	...	+α		
0	0	...	0	n_0	Center points (varies)
0	0	...	0		
...		
0	0	...	0		

So now we have only 30 measures while in the design 3^4 we have 81.

Table 3 Central composite design of orthogonal design

k	Factorial points	α	n_0	n
2	2^2	1,000	1	9
3	2^3	1,215	1	15
4	2^4	1,414	1	25
5	2^5	1,596	1	43
	2^{5-1}	1,547	1	27
6	2^6	1,761	1	77
	2^{6-1}	1,724	1	45
7	2^7	1,909	1	143
	2^{7-1}	1,885	1	79
8	2^8	2,049	1	273
	2^{8-1}	2,029	1	145
	2^{8-2}	2,000	1	81

For example, if we want the central composite design to be orthogonal, we can choose $n_0 = 1$ a $\alpha = [2^{k-p}(2^{k-p} - 2k + 1) - 2^{k-p-1}]^{1/2}$.

5 The Uncertainty of end effector position

The uncertainty of measurement of robots' end effector position depends on many conditions. At first we have to set measurement model equation.

The measurement equation model can be

$$F_1(X_1, \dots, X_n, a_1, a_2, \dots, a_p) = 0$$

$$F_2(X_1, \dots, X_n, a_1, a_2, \dots, a_p) = 0$$

⋮

$$F_r(X_1, \dots, X_n, a_1, a_2, \dots, a_p) = 0$$

Where

$X_1 = (X_1, \dots, X_n)$ are input variables

a_1, a_2, \dots, a_p are the unknown parameters (output parameters), which value is object of tests

F_i are known functions $i = 1, 2, \dots, r$

Mathematical notation of the theoretical model

$$F(\mathbf{X}, \mathbf{a}) = 0 \tag{0.1}$$

Where

$$F(\mathbf{X}, \mathbf{a}) = [F_1(\mathbf{X}, \mathbf{a}), \dots, F_r(\mathbf{X}, \mathbf{a})]^T$$

$\mathbf{X}_1 = (X_1, \dots, X_m)^T$ is the vector of input variables

$\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_p)^T$ It is a vector of parameters (output variables)

$\mathbf{0}$ the zero vector (which all elements are zero)

Considered parameters of construction of parallel kinematic structure Tricept and their uncertainties was presented in [7].

6 Numerical Modelling

Testing methodology includes modelling using a CAD program such as Inventor® Professional 2016 and using the LiveLink integrated module we can import the model to COMSOL Multiphysics. Comsol Multiphysics provides complete and integrated environment for physics modelling and simulation. The model is divided into a finite number of factors using for example tetrahedral elements thus creating a so-called network. The network was compressed in cultivated places where it was possible to expect a formation of edge stresses. In this way, the composite elements can be easily mathematically described. A great advantage of these programs is that they contain a databases of the most commonly used modes.

This programs can help reduce number of measured factors and we use it for economical and time saving reasons. It gives a both numerical and graphical output for visualizing results.

It can be used before measurements to determine those factors which have biggest impact to measured parameter.

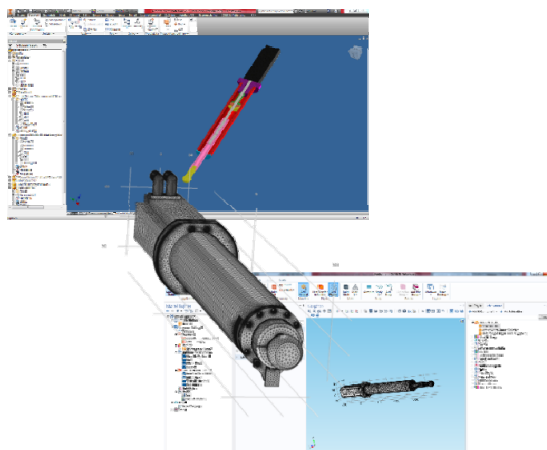


Figure 3 LiveLink between Inventor and Comsol Multiphysics

7 Conclusions

Testing of the parallel kinematic industrial robot is a highly discussed theme. In our study, we have presented design of experiment to evaluate the measurement uncertainty of a position measurement system. The focus of the paper is prepare a theoretical basis for the design of experiments of measuring process. It also refers to the simulation of factors which have impact to this structure via modern numerical modeling programs.

Acknowledgements

The research work described in the paper was performed by a financial support of the Slovak Scientific Grant Agency (VEGA), grant Nr. 1/0604/15, KEGA 014STU-4/2015.

8 References

- [1] GRÚBEROVÁ, M. – VAJSÁBEL, M. *Positioning Accuracy of Telescopic Rod Type PKS*. 2014. ISBN 978-80-248-3398-9.
- [2] GRÚBEROVÁ, Michaela - PALENČÁR, Jakub - PALENČÁR, Rudolf. Design of experiments for testing of machine tools with parallel kinematic structure. In *Automatizácia a riadenie v teórii a praxi [elektronický zdroj]: workshop odborníkov z univerzít, vysokých škôl a praxe v oblasti automatizácie a riadenia*. 1. vyd. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2016. 978-80-553-2474-6.
- [3] HINKELMANN, K.: *Design and Analysis of Experiments*. USA: John Wiley & Sons, 2005. 780p. ISBN 0-471-55177-5.
- [4] ANTHONY, J.: *Design of Experiments for Engineers and Scientist*, Oxford: Elsevier Science and Technology Books, 2003. 176 p. ISBN 075047094.
- [5] PALENČÁR, R. - RUIZ, J M. - JANIGA, I. - HORNÍKOVÁ, A. *Štatistické metódy v metrologických a skúšobných laboratóriách*. Bratislava: STU v Bratislave, 2001. 366 s. ISBN 80-968449-3-8.
- [6] ISO Standard 8373:2012, Manipulating Industrial Robots – Vocabulary
- [7] KUREKOVÁ, E. - OMACHELOVÁ, M. - HALAJ, M. – MARTIŠOVITŠ, I.: *Positioning uncertainty of the Tricept type parallel kinematic structure*. Measurement Science Review [elektronický zdroj], s. 243--251. ISSN 1335-8871.

Implementace prediktivního řízení do PLC systému

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 implementací prediktivního řízení s modelem (MPC) do PLC systému a jeho softwarovou podporou. MPC algoritmus byl nejdříve realizován a simulačně ověřen v programu MATLAB a následně implementován do PLC systému za použití programovacího jazyka C++. Pro tento jazyk je volně dostupná knihovna funkcí lineární algebry s názvem Armadillo, která má podobnou syntaxi jako MATLAB a samotnou implementaci výrazně zjednodušila. Pro minimalizaci kvadratického kritéria a výpočet optimálního akčního zásahu byla použita funkce qpOASES ze stejnojmenného open-source softwarového balíčku. Parametrizace MPC regulátoru a vkládání interního modelu je možné z aplikace vytvořené v jazyce Java v programu SolutionCenter. Funkčnost implementovaného prediktivního regulátoru byla ověřena při Hardware-in-the-Loop (HIL) simulaci za pomoci programu MATLAB Simulink a komunikačního protokolu OPC.

Klíčová slova: prediktivní řízení, MPC, MATLAB, PLC

1 Úvod

Současný stav řídicích systémů je postaven na využití PID regulátorů, kdy změny hodnot žádaných veličin regulátorů jsou prováděny operátory z 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 je prediktivní regulátor schopen rychle reagovat na změny žádané veličiny se splněním výše uvedených podmínek. Z tohoto důvodu nasazení řídicích metod založených na interním modelu v průmyslu stále roste, viz [1]. V [6] je MPC použito pro řízení procesu spalování odpadu a v [4] v průmyslových spalovacích elektrárnách na biomasu. V průmyslu je prediktivní řízení nejčastěji nasazeno do nejvyšší vrstvy hierarchického řídicího systému a tedy na hardwarové platformě typu PC. Tato práce pojednává o implementaci prediktivního řízení do nejnižší vrstvy řídicího systému a to do programovatelného logického automatu (PLC), který je již přímo napojen na řízený systém.

V samotném článku je nejprve shrnut současný stav průmyslových řídicích systémů založených na prediktivním řízení a nastiňuje trend umisťování MPC regulátorů blíže k řízenému procesu. Druhá kapitola zmiňuje použitý hardware a programovací prostředí pro implementaci prediktivního algoritmu do PLC systému. Ve třetí kapitole jsou dále prezentovány základní matematické principy tohoto algoritmu. V předposlední kapitole je uveden způsob ověření již implementovaného algoritmu a jeho softwarové podpory. Poslední kapitola shrnuje dosažené výsledky a nastiňuje směr dalšího řešení.

2 Prediktivní řízení v průmyslových aplikacích

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:

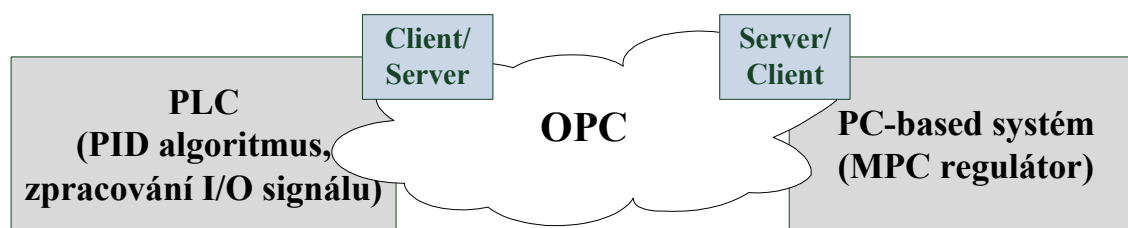
- Řízení vícerozměrných systémů
- Obsahuje interní model pro robustní a rychlé řízení
- Mnoho možností parametrizace regulátoru
- Schopnost vyrovnat se s dlouhými časovými konstantami a zpožděními

Některá omezení:

- Vysoká výpočetní náročnost
- Pouze omezené použití v PLC

2.1 Současný stav komerčních řešení

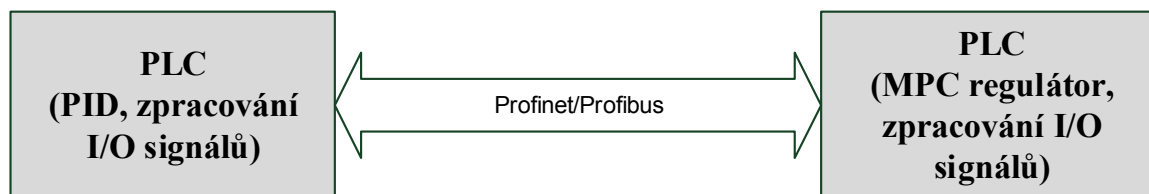
Jak bylo zmíněno již dříve, současné řídicí systémy jsou nejčastěji postavené na standardních PID regulátorech, které řídí vždy jednu určitou část řízeného procesu. PID regulátory jsou obvykle implementovány do PLC systémů, které jsou zároveň fyzicky napojeny na řízený proces a průmyslové komunikační sběrnice. V případě nasazení prediktivního řízení je prediktivní regulátor obvykle nasazen do nadřazené vrstvy postavené na standardním PC nebo průmyslovém PC (IPC), kde real-time chování operačního systému realizují rozšiřitelné karty nebo tzv. soft PLC řešení simulující toto chování softwarově. Pro komunikaci s podřízenou vrstvou je nejčastěji použit komunikační protokol OPC. V případě tohoto řešení jsou nezávisle použity minimálně dvě hardwarové platformy, což s sebou nese vysoké pořizovací náklady. Další slabinou je také samotná OPC komunikace, která se vyznačuje ne příliš velkou spolehlivostí a také její přenosová rychlost je omezena. Obrázek 1 znázorňuje obvyklé zapojení současných komerčních prediktivních řídicích systémů.



Obrázek 1 – Obvyklá realizace prediktivního řídicího systému

2.2 Nový trend v průmyslových aplikacích

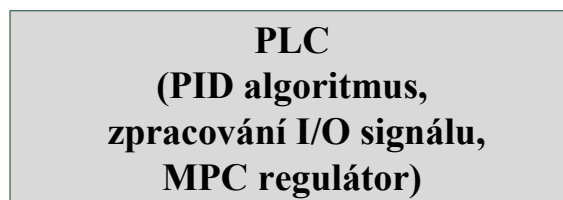
V posledních letech je v průmyslu trendem umisťovat MPC regulátory blíže k řízenému procesu a to do nejnižších vrstev hierarchických řídicích systému, tedy do programovatelných logických automatů. Toto řešení znázorňuje obrázek 2, kdy pro prediktivní řízení je vyhrazeno samostatné PLC, které s jinými komunikuje po standardizovaných průmyslových sběrnících.



Obrázek 2 – Inovované zapojení prediktivního řídicího systému

Toto zapojení vylepšuje samotné real-time chování, jelikož MPC regulátor běží pod operačním systémem reálného času a nahrazuje kritickou OPC komunikaci komunikací po průmyslových sběrnících Profibus (Process Field Bus) nebo PROFINET (Process Field Network).

V nově navrhovaném směru, popsaném také ve [10], je kombinace PID a MPC regulátoru na jednom PLC zařízení. Toto řešení tudíž nepotřebuje žádný komunikační protokol. Oproti PC-based řešením je u PLC-based řešení zachována podpora a snadné napojení na průmyslové sběrnice a případné akční členy či senzory. Jelikož výpočet PID i MPC algoritmu je realizován na jednom zařízení, je nutné pro toto řešení oproti předešlým počítat s výkonějším moderním PLC systémem.



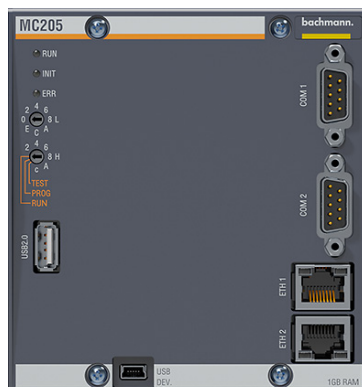
Obrázek 3 – Navrhované a realizované zapojení prediktivního řídicího systému

3 Implementace do PLC a použité nástroje

Hlavní částí práce byla samotná implementace algoritmu prediktivního řízení do PLC systému. Na tento systém byl kladen nárok na vysoký výpočetní výkon a možnost programování aplikací v pokročilejších programovacích jazycích než popisuje norma IEC 1131-3. Protože laboratoře katedry 352 nedisponují dostatečně výkonnými programovatelnými automaty, bylo nutno tento hardware zakoupit. Jelikož je plánováno v budoucnu nasadit implementovaný prediktivní regulátor i v reálném provozu, což proběhne ve spolupráci s firmou VOIGT+WIPP Engineers GmbH, měla tato skutečnost hlavní vliv na výběr zakoupeného hardwaru. Zmíněná firma má tradici v nasazování zařízení od firmy Bachmann electronic GmbH, s kterými jeden z autorů článku již mohl osobně pracovat, a u každého jejího zákazníka je instalován minimálně jeden stejně výkonný programovatelný automat, kde bude možno otestovat realizovaný prediktivní regulátor. Byl tedy zakoupen a použit modulární systém právě od firmy Bachmann electronic GmbH. Celek se skládá ze zdroje, procesorového modulu, dvou I/O modulů a zadní propojovací desky.

3.1 Procesorový modul MC200

Z důvodu výpočetní náročnosti prediktivních metod řízení, byl vybrán výkonný procesorový modul MC200, který je zobrazen na obrázku 4. Na interní paměti je nahrán real-time operační systém VxWorks.



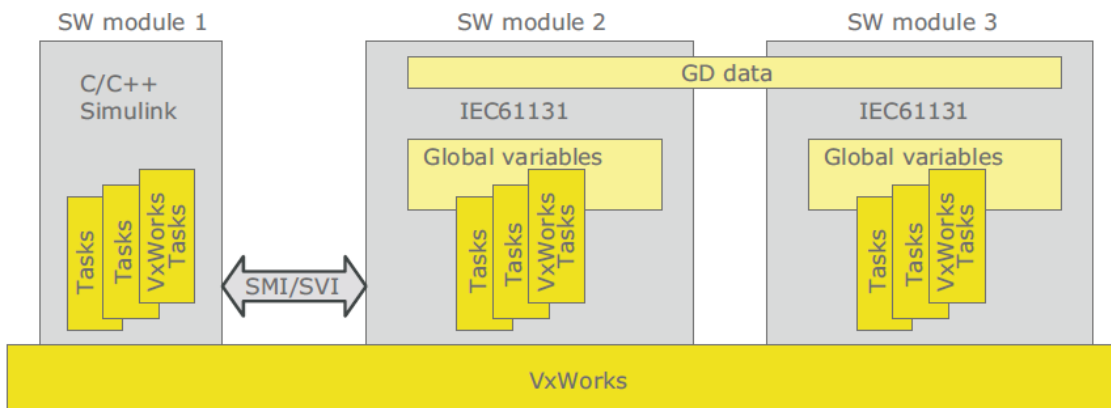
Obrázek 4 – Procesorový modul Bachmann MC200 [2]

Parametry procesorového modulu:

- Procesor: 32 bitový 1,6 GHz ATOM E680
- RAM: 1 GB DRAM DDR2
- Paměť pro programy: 64 MB
- Rozšiřující paměť: 4 GB CFAST Card
- Operační systém: VxWorks
- Programovací jazyky: IEC 61131-3, C/C++
- Vzdálená vizualizace: ANO
- Vzdálený management: ANO
- Komunikační rozhraní: 1x USB-Host, 1x Service USB, 1x RS232, 1x RS232/422/485
- Protokoly: OPC DA, OPC UA (dokoupitelné)

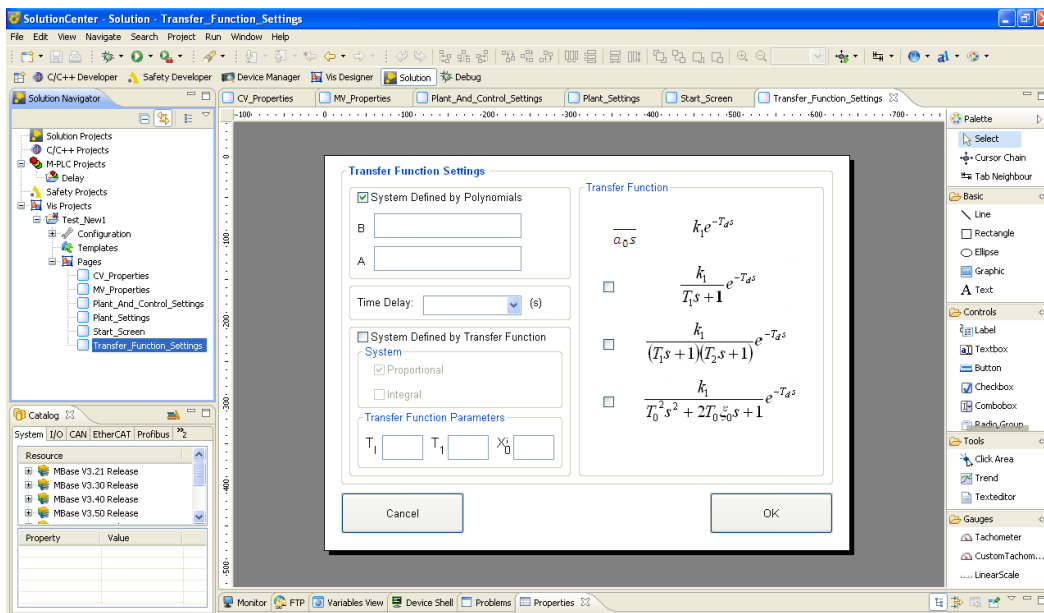
3.3 Programovací prostředí

K programovatelnému automatu je dodáván software pod názvem SolutionCenter, z kterého lze konfigurovat a diagnostikovat hardware, vytvářet samospustitelné vizualizace, či programovat a odladovat aplikace pro PLC. Lze programovat v jazycích C/C++ a dle normy IEC 61131-3. Pro programování v jazycích definovaných normou IEC 61131-3 je dodáván software CoDeSys. Pro programování v C/C++ je implementován nástroj pod názvem C/C++ Developer, který vychází z vývojového prostředí Eclipse. Vytvořené programy mohou mezi sebou komunikovat nezávisle na užitém programovacím jazyku přes tzv. Standard Variable Interface (SVI) rozhraní. Způsob, jak jednotlivé programy mezi sebou komunikují je znázorněn na obrázku 5.



Obrázek 5 – Komunikace programových modulů v PLC Bachmann [2]

Pro snadnější parametrizaci regulátoru byla vytvořena uživatelská aplikace, přes kterou je možné vkládat koeficienty jednotlivých přenosů řízeného systému a parametry pro prediktivní řízení. Na obrázku 6 je vidět pracovní plocha programu SolutionCenter s otevřeným nástrojem Vis Designer, který byl použit pro tvorbu obrazovek. Tento systém patří do kategorie programů SCADA/HMI.



Obrázek 6 – Pracovní prostředí SolutionCenter

3.4 Softwarový balíček qpOASES

Pro implementaci MPC algoritmu byl použit programovací jazyk C++, pro který je mnoho dostupných volně šiřitelných knihoven. Pro řešení kvadratických optimalizačních problémů byla vybrána funkce qpOASES ze stejnojmenné externí knihovny. Tuto funkci lze pomocí mex funkce implementovat také do programu MATLAB, Simulink nebo Scilab a řeší optimalizační problémy ve tvaru

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

kde je \mathbf{H} – symetrická kladně definitní Hessova matice,
 \mathbf{g} – vektor gradientů
 lb – vektor dolních omezujících podmínek

- ub – vektor horních omezujících podmínek
- A – mezuující matice
- lbA – omezující vektor vázaný na dolní omezující podmínky
- ubA – omezující vektor vázaný na horní omezující podmínky.

Pomocí matice A je možno realizovat omezení změny akční veličiny nebo horní a dolní meze regulované veličiny. Tuto formu kvadratického kritéria používá také MATLAB ve funkci quadprog.

3.5 Knihovna funkcí lineární algebry Armadillo

Druhá použitá C++ knihovna se nazývá Armadillo a obsahuje funkce pro řešení úloh lineární algebry, tedy funkce pro operace s vektory a maticemi. Tato knihovna je opět volně šiřitelná. Syntax (API) je podobný programu MATLAB i názvy funkcí jsou přibližně stejné. Tento aspekt výrazně ulehčil proces implementace algoritmu do jazyka C++, jelikož byl nejdříve naprogramován v programu MATLAB. Podle [7] je toto řešení kompromisem mezi uživatelskou přívětivostí a výpočetní rychlostí.

4 Matematické odvození prediktivního algoritmu

Použitý algoritmus prediktivního řízení vychází z knihy [9] s jedinou modifikací, kdy pro výpočet optimálního řízení se používá místo funkce quadprog z Optimization Toolboxu funkce qpOASES z výše popsaného volně šiřitelného softwarového balíčku.

Prediktivní regulátor je schopen řídit mnohorozměrové systémy, avšak pro zjednodušení bude uvedeno jen odvození pro jednorozměrný systém. MPC regulátor řeší tzv. účelovou funkci, což je funkce vektoru řešení (akční veličiny) a vyjadřuje závislost této veličiny na rozhodovacích proměnných (regulační odchylka, změna akční veličiny). Podle [8] je předpokladem znalost budoucích hodnot referenčního signálu $w(k+i)$ pro $i=1,2,\dots,N_2$. Ve většině případů $w(k+i)$ bude konstanta rovna hodnotě referenčního signálu $w(k)$ v čase k , nicméně někdy bude znám celý vektor obecně různých referenčních hodnot v čase.

Účelová funkce může obecně mít libovolný tvar a obvykle je dána vztahem

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} \delta(i) [\hat{y}(k+i) - w(k+i)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \lambda(i) [\Delta u(k+i-1)]^2, \quad (2)$$

- kde je
- N_1 – spodní hranice predikčního horizontu,
 - N_2 – horní hranice predikčního horizontu,
 - N_u – horní hranice řídicího horizontu,
 - \hat{y} – predikovaný výstup regulované soustavy,
 - w – referenční signál,
 - δ – penalizační koeficient regulační odchylky,
 - λ – penalizační koeficient změny akčního zásahu,
 - u – akční veličina a platí, že $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$.

Kriteriální funkce tedy minimalizuje nejen vážený čtverec rozdílu mezi žádaným a skutečným výstupem soustavy, ale také minimalizuje vážený kvadrát jednotlivých změn akční veličiny. Parametry δ a λ mají konstantní nebo exponenciální závislost.

Během každého řídicího kroku jsou prováděny následující body:

1. Je stanovena sekvence budoucích hodnot referenčního signálu $w(k+i)$.

2. Je vypočtena predikce budoucích výstupů regulované soustavy $\hat{y}(k+i)$ a je porovnána s referenčním signálem $w(k+i)$.
3. Pro danou kombinaci $N_1, N_2, N_u, \delta(i), \lambda(i)$ je pomocí minimalizace řídicího kritéria vypočten vektor optimálních budoucích hodnot akční veličiny $u(k+i)$.
4. První hodnota ze zjištěného vektoru je aplikována jako řízení regulované soustavy a výpočet se v dalším kroku opakuje.

Realizovaný prediktivní regulátor byl založen na stavovém modelu soustavy a je tedy jednoduše aplikovatelný i na mnohorozměrové soustavy. Jeho malou nevýhodou je, že musíme měřit nebo dopočítávat aktuální stavy modelu. Z toho také plyne vyšší výpočetní náročnost. Model jednorozměrné soustavy v diskretním stavovém popisu, ze kterého vycházíme je popsán jako

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{b}u(k) \\ y(k) &= \mathbf{c}^T \mathbf{x}(k) + du(k), \end{aligned} \quad (3)$$

kde je $\mathbf{x}(k)$ – vektor stavů,
 \mathbf{A} – matice systému,
 \mathbf{b} – vektor řízení,
 \mathbf{c} – výstupní vektor,
 d – konstanta převodu.

Konstanta převodu d je rovna nule, jelikož předpokládáme splněnou silnou podmínku fyzikální realizovatelnosti. Podle [9] pro zajištění integračního charakteru regulátoru musíme tento stavový model nejprve upravit do odchylkového tvaru tím, že budeme uvažovat diferenci na obou stranách stavové rovnice tedy

$$\mathbf{x}(k+1) - \mathbf{x}(k) = \mathbf{A}(\mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(k-1)) + \mathbf{b}(u(k) - u(k-1)). \quad (4)$$

Když zavedeme substituci $\Delta\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k+1) - \mathbf{x}(k)$, $\Delta\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(k-1)$ a $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ můžeme (4) přepsat do tvaru

$$\Delta\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x}(k) + \mathbf{b}\Delta u(k). \quad (5)$$

U tohoto zápisu je vstup do stavového modelu $\Delta u(k)$.

Dalším krokem je navázání $\Delta\mathbf{x}(k)$ na výstup $y(k)$. K tomu je třeba přidat novou stavovou proměnnou a stavový vektor se změní na

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x}(k) \\ y(k) \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

Pro rozdíl mezi současným a minulým výstupem modelu platí

$$\begin{aligned} y(k+1) - y(k) &= \mathbf{c}^T (\mathbf{x}(k+1) - \mathbf{x}(k)) = \\ &= \mathbf{c}^T \Delta\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{c}^T \mathbf{A} \Delta\mathbf{x}(k) + \mathbf{c}^T \mathbf{b} \Delta u(k) \end{aligned} \quad (7)$$

Pokud vyjdeme z rovnic (5) a (7), můžeme sestavit výsledný rozšířený stavový popis

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x}(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{o}^T \\ \mathbf{c}^T \mathbf{A} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x}(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{c}^T \mathbf{b} \end{bmatrix} \Delta u(k) \\ y(k) &= \begin{bmatrix} \mathbf{o} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x}(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \end{aligned}, \quad (8)$$

kde je \mathbf{o} – nulový vektor.

Rovnici (8) můžeme přepsat do standardního tvaru

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}'\mathbf{x}(k) + \mathbf{b}'\Delta u(k) \\ y(k) &= \mathbf{c}'^T \mathbf{x}(k), \end{aligned} \quad (9)$$

kde je $x(k)$ – vektor stavů,
 A^t – matice systému,
 b^t – vektor řízení,
 c^t – výstupní vektor rozšířeného stavového popisu.

Predikce výstupu systému \hat{y} je vypočítána pomocí volné odezvy systému a nucené odezvy

$$\hat{y} = Gu + f, \quad (10)$$

kde se volná odezva vypočítá ze vztahu

$$f = Fx(k). \quad (11)$$

Matice G určuje dynamické vlastnosti systému a vypočítá se z matice A a vektorů b a c^T stavového popisu stejně jako matice F .

$$F = \begin{bmatrix} c^{tT} A^{t1} \\ c^{tT} A^{t2} \\ c^{tT} A^{t3} \\ \vdots \\ c^{tT} A^{tN_1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$G = \begin{bmatrix} c^{tT} b^t & 0 & 0 & \dots & 0 \\ c^{tT} A^t b^t & c^{tT} b^t & 0 & \dots & 0 \\ c^{tT} A^{t2} b^t & c^{tT} A^t b^t & c^{tT} b^t & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c^{tT} A^{tN_1-1} b^t & c^{tT} A^{tN_1-2} b^t & c^{tT} A^{tN_1-3} b^t & \dots & c^{tT} A^{tN_1-N_0} b^t \end{bmatrix}$$

Dále účelovou funkci (2) převedeme do maticové podoby

$$J = (w - \hat{y})^T Q_0 (w - \hat{y}) + u^T Q_\lambda u, \quad (13)$$

kde je w - vektor budoucích hodnot referenčního signálu na horizontu predikce N_2 ,
 u - vektor změn akčních zásahů,
 Q_λ - diagonální matice vah důležitosti změn akčního zásahu,
 Q_0 - diagonální matice vah důležitosti regulačních odchylek.

Po dosazení vztahu (10) a (11) do (13) platí

$$J = (w - Gu - Fx(k))^T Q_0 (w - Gu - Fx(k)) + u^T Q_\lambda u \quad (14)$$

Minimum účelové funkce (14) získáme, když první derivace $\partial J / \partial u$ se položí rovny nule a vyřešíme vzniklou rovnici, z které se dá za pomoci substituce (11) odvodit vztah (15) pro optimální posloupnost řízení pro analytický regulátor (bez omezení).

$$u = (G^T Q_0 G + Q_\lambda)^{-1} G^T Q_0 (w - f) \quad (15)$$

Takto se vypočte celá trajektorie budoucích přírůstků akční veličiny. Nyní se jedná o řízení v otevřeném regulačním obvodu. Pokud se jedná o uzavřený regulační obvod, tak se aplikuje pouze první prvek z u , tj. $\Delta u(k)$ a celý postup se poté opakuje v další periodě vzorkování $k+1$, tzv. princip postupného horizontu.

Pro mnohorozměrný prediktivní regulátor s omezeními je nutné numericky řešit problém kvadratického programování nebo tzv. úlohu optimálního řízení s omezeními ve tvaru (16).

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{H} \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \mathbf{g} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{lb} \mathbf{A} &\leq \mathbf{A} \mathbf{u} \leq \mathbf{ub} \mathbf{A} \\ \mathbf{lb} &\leq \mathbf{u} \leq \mathbf{ub}, \end{aligned}$$

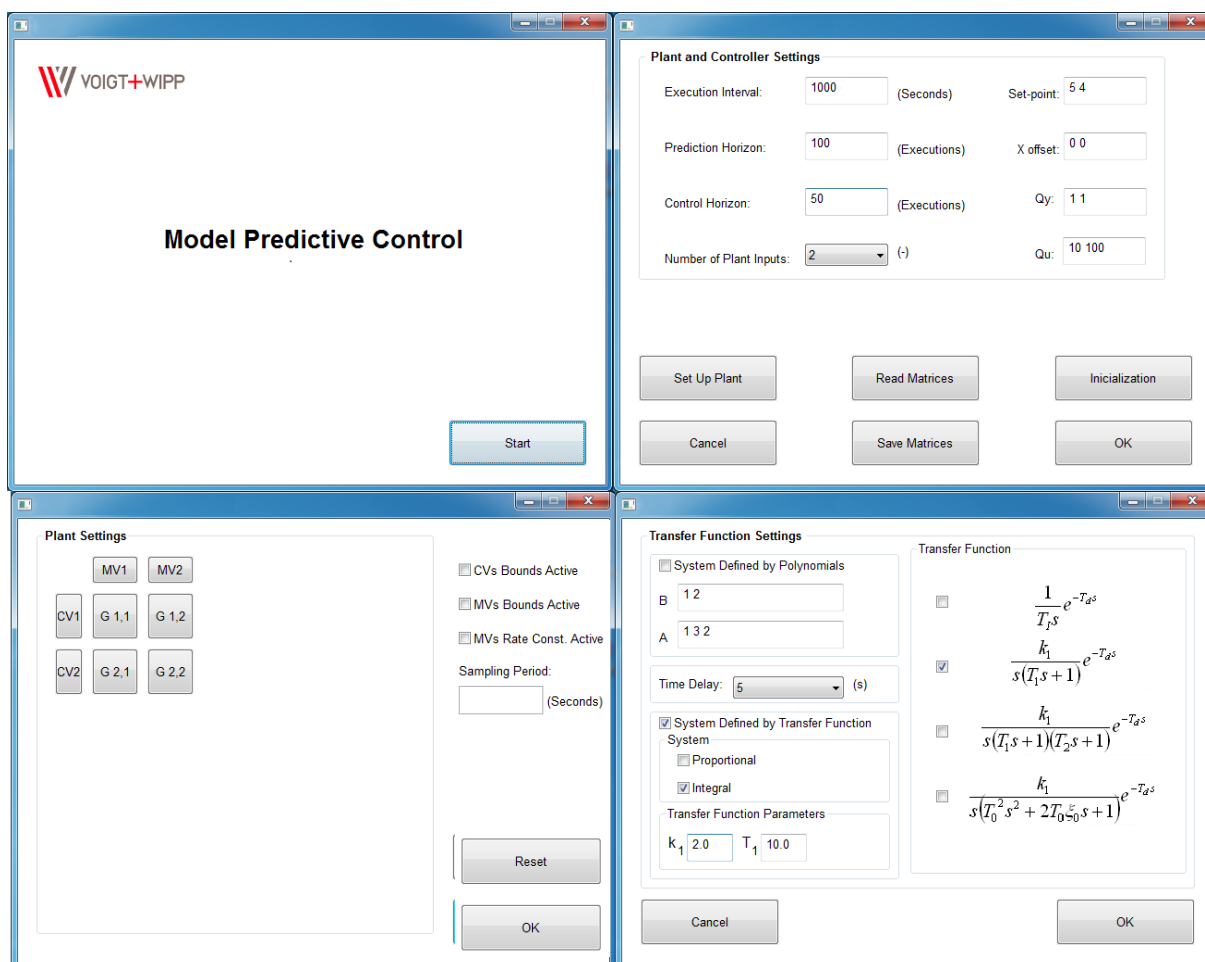
Konstrukci matice \mathbf{H} a vektoru \mathbf{g} popisují následující rovnice

$$\mathbf{H}_{\mathbf{H}} = 2(\mathbf{G}^T \mathbf{Q}_e \mathbf{G} + \mathbf{Q}_k), \quad (17)$$

$$\mathbf{g} = -2\mathbf{G}^T \mathbf{Q}_e (\mathbf{w} - \mathbf{F} \mathbf{x}(k)).$$

5 Softwarová podpora prediktivního řízení - parametrizace prediktivního regulátoru

Pro změnu parametrů MPC regulátoru a vkládání interního modelu byla navržena a realizována aplikace vytvořená v nástroji Vis Designer softwaru SolutionCenter. Jednotlivé obrazovky vytvořené pro nastavování prediktivního regulátoru můžete vidět na obrázku 7.



Obrázek 7 – Obrazovky softwarové podpory regulátoru (zleva úvodní obrazovka, obrazovka pro nastavení parametrů řízení, vstup do obrazovky pro zadávání přenosů nebo omezení, obrazovka zadávání přenosů)

Mezi obrazovkami se přepíná tlačítka OK a Cancel a vždy jen jedna obrazovka je aktivní. Nejprve je třeba zvolit počet vstupů řízeného systému a zadat jej do v pořadí druhé obrazovky. Dále je nutné řízený systém identifikovat a zjištěné spojité přenosové funkce

vložit přes obrazovku pro zadávání přenosů do MPC regulátoru. V PLC budou automaticky převedeny na diskretní stavový popis. Dalším krokem je určení periody vzorkování T . Musí být správně zvolena s ohledem na dynamiku systému a typ řízení, např. supervizní nebo přímé řízení. Po stisknutí tlačítka MV nebo CV se otevře páska výše neuvedená obrazovka pro definování omezení akční veličiny, případně regulované veličiny. Obrázek 8 ukazuje hlavní část této obrazovky.

The image shows a 'MV Properties' dialog box with the following fields and options:

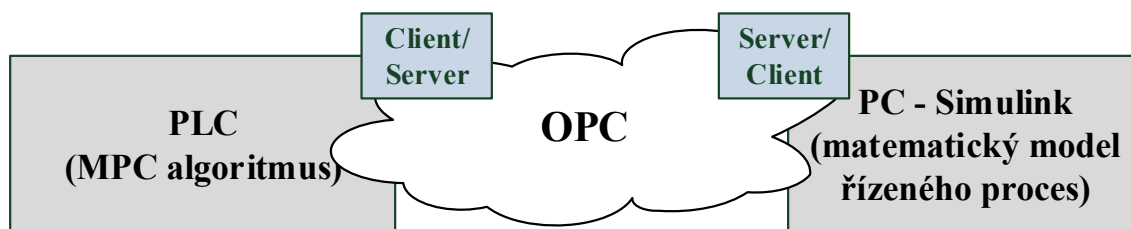
- Name: [text input]
- Bounds Active
- MV Range:
 - Maximum: [text input] (-)
 - Minimum: [text input] (-)
- Rate Constraints Active
- Maximal Rate of Change:
 - deltaU: [text input] (-)
 - + deltaU: [text input] (-)

Obrázek 8 – Část obrazovky pro zadávání rozsahu akční veličiny

Podle [1] jsou hlavní parametry ladění váhové matice Q_0 a Q_1 . V případě neznámého systému se doporučuje volit nižší hodnoty Q_0 a vyšší hodnoty Q_1 . Pokud chování interního identifikovaného modelu se blíží chování reálnému, je možno přistoupit k agresivnější volbě parametrů (malé hodnoty Q_1 a vysoké Q_0). Dalšími volitelnými parametry regulátoru jsou ještě horizont predikce N_2 a horizont řízení N_u . Pomocí tlačítka Save Matrices na obrázku 7 je možné všechny parametry a interní model regulátoru exportovat do XML souboru a v budoucnu pomocí tlačítka Read Matrices opět načíst.

6 Ověření funkčnosti při HIL simulaci a srovnání prediktivního řízení s řízením s pomocnou regulovanou veličinou

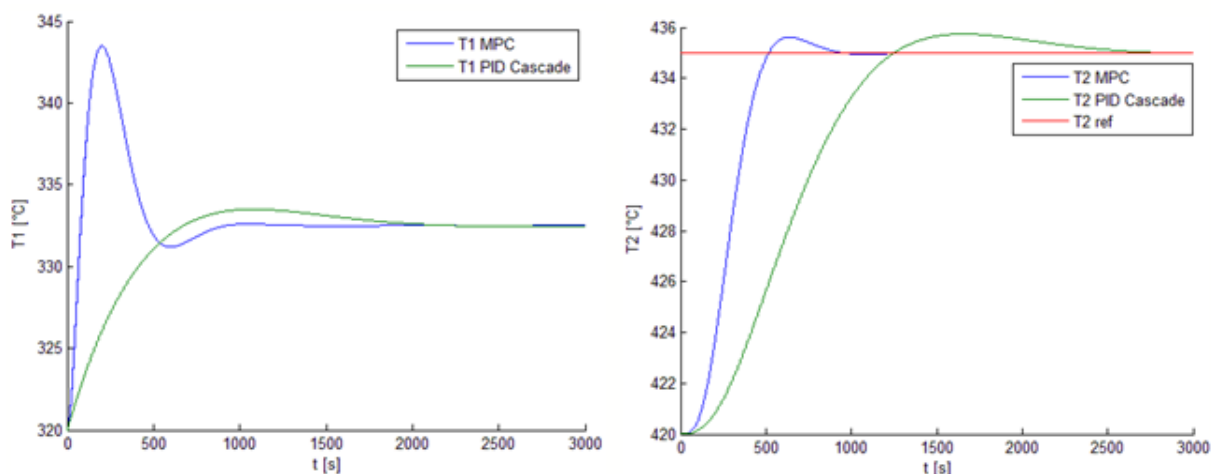
Pro ověření funkčnosti implementovaného MPC regulátoru jsem použil mimo jiné i tzv. Hardware-in-the-Loop (HIL) simulaci, kdy řízeným procesem bylo simulační schéma (v sérii zapojené dva přenosy) v programu Simulink simulující výrobu přehřáté páry v elektrárně. Vypočtená hodnota akční veličiny, hodnota stavové veličiny (výstup prvního přenosu) i měřená regulovaná veličina (výstup druhého přenosu), byly v daných intervalech posílány přes OPC komunikační protokol. Na obrázku 9 je znázorněno schéma zapojení.



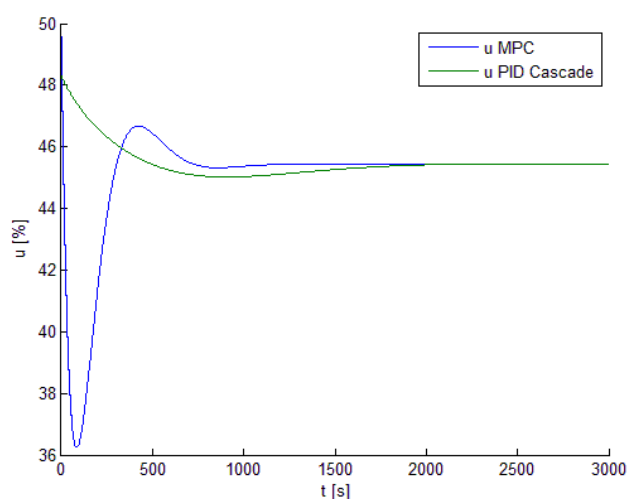
Obrázek 9 – Zapojení při HIL simulaci

Měřenou stavovou veličinou je teplota T_1 před přehřívákem, která je regulovaná vstřikem vody, tudíž akční veličina je míra otevření vstřikovacího ventilu od 0 do 100%. Regulovanou veličinou je simulovaná teplota páry T_2 za přehřívákem (tepelným výměníkem). Jako důkaz lepší kvality regulace v případě nasazení prediktivního řízení uvádím i výsledky simulace při nasazení klasické kaskádové regulace realizované pomocí dvou PI regulátorů. Obrázek 10

ukazuje průběhy požadovaných a regulovaných veličin (vpravo) a průběh stavové veličiny (vlevo). Na obrázku 11 jsou zobrazeny průběhy akčních veličin.



Obrázek 10 Průběhy akčních a žádaných veličin



Obrázek 11 Průběhy akčních a žádaných veličin

Z naměřených průběhů je patrné, že v případě nasazení prediktivního řízení bylo rychleji dosaženo žádané teploty páry než v případě běžné kaskádové regulace současně s dosažením menší hodnoty překmitu. Vzorkovací perioda byla rovna 1 s a parametry MPC regulátoru byly zvoleny jako horizont predikce 500s, horizont řízení 50s, penalizační koeficient regulační odchylky byl 10 a penalizační koeficient změny akčního zásahu 1000. Při těchto parametrech regulátoru byl procesor PLC systému vytížen přibližně na 50%. Počáteční podmínky simulace představovaly otevření ventilu na 50% při vstupní teplotě T_1 rovné 320°C a výstupní teplotě T_2 420°C. Žádaná hodnota byla rovna 435°C.

8 Závěr

Článek zmiňuje výsledky implementace algoritmu prediktivního řízení do PLC systému, kdy byl nejprve prezentován použitý hardware a programovací prostředí společně s využívanými knihovnami Armadillo a qpOASES. Dále byl matematicky odvozen samotný prediktivní algoritmus. Pro parametrizaci MPC regulátoru byla vytvořena softwarová podpora, což představuje samo spustitelnou Java aplikaci komunikující s PLC systémem, ze které lze vkládat i parametry interního modelu regulátoru. V poslední řadě jsou v článku uvedeny výsledky HIL simulace s porovnáním prediktivního řízení a kaskádové regulace pro řízení simulačního modelu přehříváku. Touto simulací byla prokázána správnost celkového řešení prediktivního řízení a jeho budoucí možné nasazení pro řízení reálného technologického procesu. Závěry práce tedy potvrzují zamýšlený směr budoucího výzkumu, kdy bude cílem použít prediktivní řízení běžící v PLC systému právě pro řízení teploty přehřáté páry v elektrárně na biomasu.

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] BACHMANN ELECTRONIC GmbH, Bachmann info, 2016.
Dostupné z: <http://www.bachmann.info/en/>

[3] CAMACHO, E. F, BORDONS, C., Model Predictive Control, London: Springer, 2007. ISBN 978-0-85729-398-5

[4] HAFFNER, L., VOIGT, A., High dynamic process control of a large scale industrial incineration power plant, IASTED Software Engineering: Control Applications, Greece, 2012.

[5] FERREAU, H. J., qpOASES User's Manual, Optimization in Engineering Center (OPTEC) and Department of Electrical Engineering, KU Leuven, 2012.

[6] 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>

[7] SANDERSON, C., CURTIN, R., Armadillo C++ linear algebra library, NICTA, Brisbane
Dostupné z: <http://arma.sourceforge.net/>

[8] NAJVÁREK, J. Neuronové sítě v prediktivním řízení: disertační práce. Brno: Ústav automatizace a měřicí techniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, 1998. 79 s.

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

[10] WENGER, M., HAMETNER, R., ZOITEL, A., VOIGT, A., Industrial embedded model predictive controller platform, IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation France, 2011.

Temperature Measurement Process of Freezing Food

KRŠÍKOVÁ, Jana¹, KLVAČOVÁ, Simona² & ĎURIŠ, Stanislav³

¹ Ing. Jana Kršíková, ✉ Slovenská technická univerzita v Bratislave, Strojnícka fakulta, Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky, Nám. slobody 17, 812 31 Bratislava, 🖥️ jana.krsikova@stuba.sk, 🌐 http://www.sjf.stuba.sk/sk/ustavy/ustav-automatizacie-merania-a-aplikovanej-informatiky.html?page_id=3182

² Ing. Simona Klvačová, 🖥️ simona.klvacova@stuba.sk

³ doc. Ing. Stanislav Ďuriš, PhD., 🖥️ stanislav.duris@stuba.sk

Abstract: National and international level of attention is given to food problematic. Provide healthy harmless food is conditioned by ensure complete food supply chain quality. Special requirements are imposed to perishable foods. These foods are going through refrigeration, freeze or speed freeze, storage and transportation process. Temperature must be monitored cross complete food supply chain. Food freeze process along with temperature measurement options is designed in the article. Optimal methodics design for temperature measurement process during food freeze is an article objective taken into the account food attributes based on the dimension influence and other factors. Other factors impact monitoring in precision of temperature measurement and most accurate determines presentable temperature at points of real state of frozen food is required. An article is given base for the corresponding experiment execution with the real food species, where practical designed measurement method are verified along legal requirements and therefore food quality parameters can be ensured. Authors would also like to thank the Slovak University of Technology in Bratislava, the grant agency VEGA projects number 1/0604/15, 1/0748/15 and the agency KEGA project number 014STU-4/2015 for their support.

Keywords: measurement, temperature, perishable foods

1 Introduction

Perishable foods are processed by reason of storage and late usability for centuries. Processing helps improve the quality of perishable foods and maintain the nutrients in them. Processing takes place within the frame of all food chain and that is from harvesting of crops to their diverse ways of culinary treatment at households, which contributes significantly to perishable foods harmlessness all over the world. The temperature has to be monitored throughout cold chain, i.e. from production, processing, storage, transportation to sale.

Freezing is one of methods for processing perishable foods. Today is in focus that fast freezing together with relevant procedures of perishable foods processing prior to freezing has a potential to ensure excellent results of nutritional values preservation in many perishable foods. Air temperature and a temperature of perishable foods must be monitored constantly during the processing of fast freezing for achievement of perishable foods wholesomeness. The temperature is monitored by temperature sensors that are connected to the recorder. Resistance or thermoelectric temperature sensors are the most used. All measuring devices that are used in this domain must be on high level from metrological aspect.

Freezing process is considered mainly on the basis of that whether perishable foods are suitable for consumption in term of perishable foods quality on the present. We have decided to focus on method innovation of temperature measurement and consecutive improving of freezing process at the work based on scientific approach. We detect influencing factors for measurement and their interdependencies from this reason, which affects measurement result and thus the accuracy of temperature sensing in real time of freezing process.

2 Fast freezing process

Perishable foods must be stored in such conditions and such time while their natural spoilage is reduced to a minimum. Recommended temperature is from -1°C to 10°C in a storage of pervertible perishable foods depending of their type. Perishable foods should be cooled quickly to the temperature bellow 10°C after processing and cooking and after that they should be frozen as quickly as possible. If perishable foods cannot be cooled immediately after heat treatment, they should be kept at temperatures above 63°C until the time of cooling.

Freezing process must be done so that physical, biochemical and microbiological changes will be minimized. Immediately after cooling perishable foods must be frozen by a method which ensures that the temperature in thermal centre of product passes quickly through maximum crystallization zone. This zone is between -1°C and -5°C for the most of the products (Figure 1). That is noted freezing system or process, its capacity, type of product (conductivity, thickness, shape, inlet temperature) and product volume.

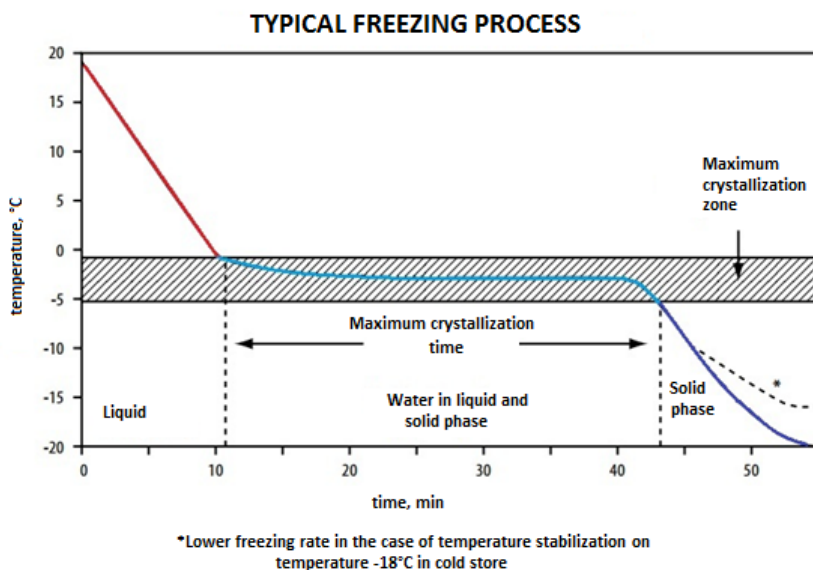


Figure 1 Freezing process

It is very important to ensure during freezing process that a space or channels allow the air to circulate among cardboards and various pieces of perishable foods. This is especially important just then while large quantities are frozen or if individual pieces of perishable foods e.g. whole turkey are large. If this air channels won't be ensured the most of pieces of perishable foods can become that internal parts will be cooled and frozen very slowly despite of intense freezing. Fast freezing processes is not completed until product temperature has reached -18°C (optimally as well as for other frozen products, but in any case the temperature must be minimally -12°C).

The product must be kept at -18°C on leaving freezing device. The product must not be exposed to higher temperature and it must be transferred to cold store as quickly as possible. The manufacturers should notice cooling curves, until a stabilization of product temperature won't be achieved at -18°C or for freezing products -12°C .

3 Realisation of experiment

The first phase of experiment consists of air temperature measurement of freezing process realised in shock cooler (Figure 2), which is used for fast cooling or freezing perishable foods. The proliferation of unwanted microorganisms and bacteria that can spoil the food is avoided by this device. Shock cooler is used in gastro services where is needed to pre-prepare raw materials for concrete using purpose with preservation of natural moisture, colour, taste and aroma what the device declares.

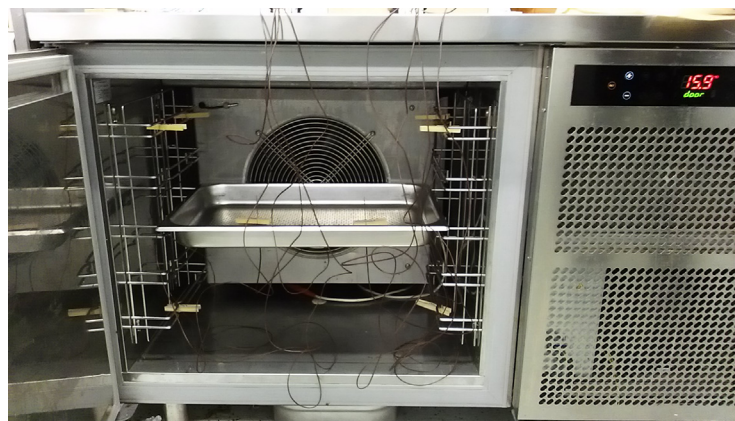


Figure 2 Shock cooler

We deployed temperature sensors to freezing space according to pre-defined model situations (Figure 3). We used calibrated thermoelectric temperature sensors of type T and temperature recorders Testo 176 T4 that match the requirements of the norm STN EN 12830.

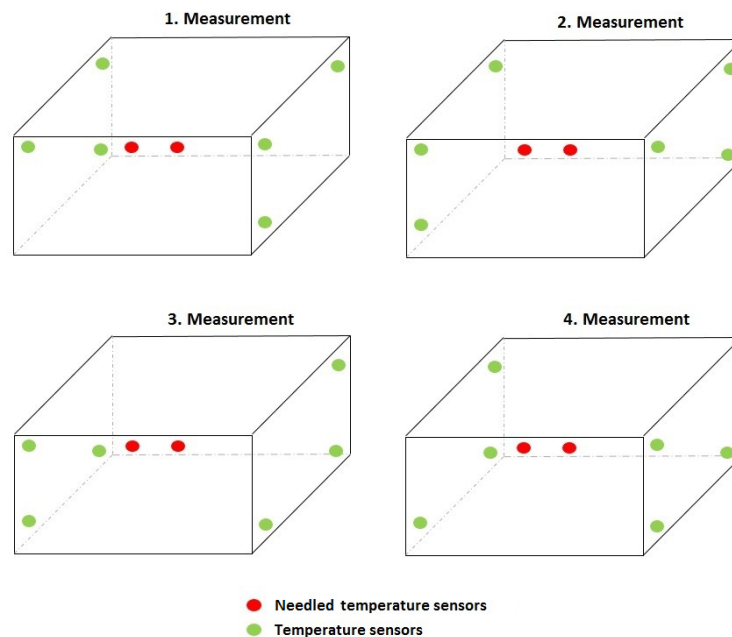


Figure 3 Model situations of temperature sensors layout

The device has temperature sensor which is placed in freezing space. The temperature of this sensor is displayed in shock cooler display. That is air temperature monitoring at concrete points of freezing space (Figure 4). We watched the power of device before the realisation of experiment. The cooling of space at -35°C is its maximum. The measurement were done four times under the same freezing conditions, at which temperature sensors layout was varied as is shown in Figure 3. One measurement course i.e. cooling process from outdoor temperature to the temperature -35°C lasted 45 minutes and the return to original initial conditions i.e. device heating to outdoor temperature took about 30 minutes. The interval of reading values for representation of time temperature course was set in 10 seconds. Temperature courses of chosen measurements are shown in the graphs (Figure 5, 6).

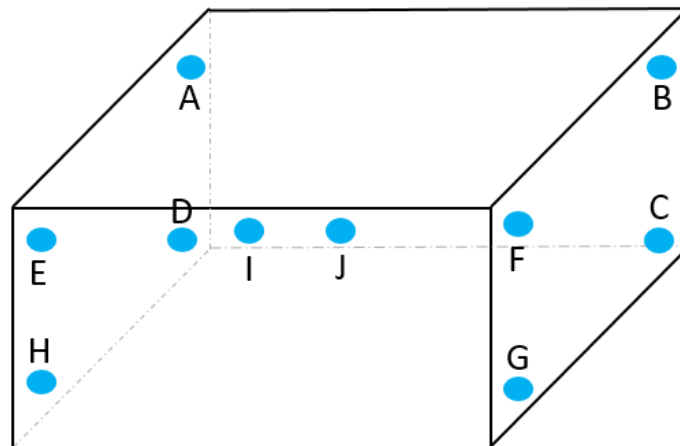


Figure 4 Air temperature monitoring at concrete points of freezing space

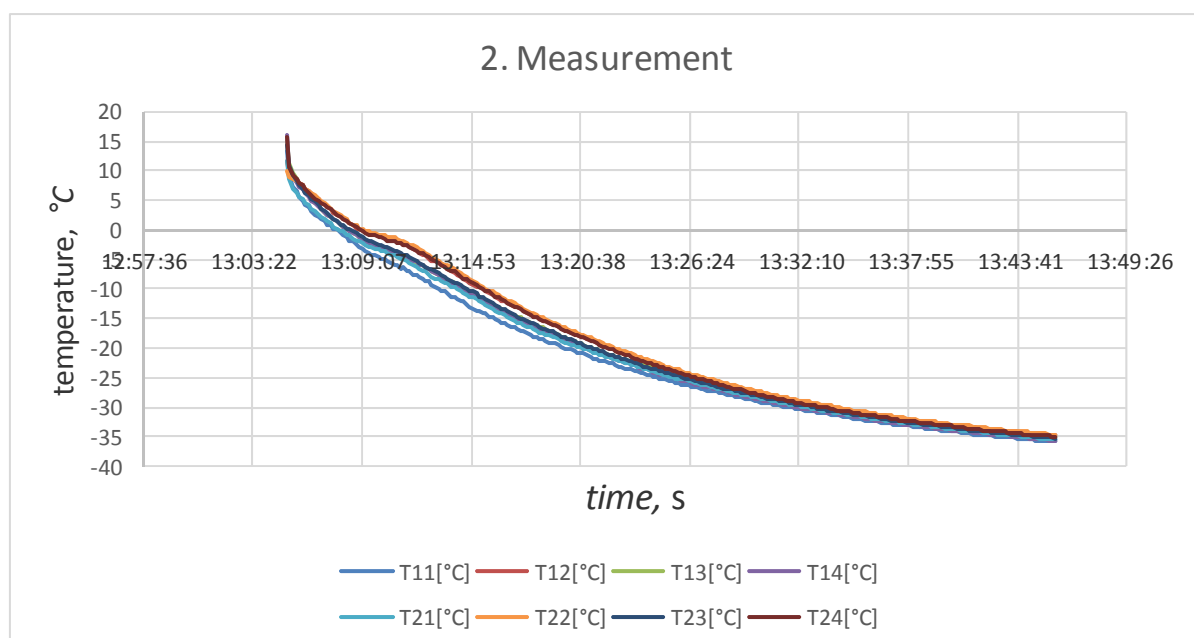


Figure 5 Air temperature measurement of freezing process

We can see in the graphs (Figure 5, 6) that temperature decrease is not uniform, mainly in initial freezing phase. Mostly we can see that time temperature courses are different by individual freezing processes. It can be concluded that these differences are caused by the properties of freezing device whereas temperature sensor with evaluation units have been calibrated. That is mainly the method of cooling regulation. It is clear that the effect of individual sensors for temperature measurement is minimal by comparing calibration results (Table 1).

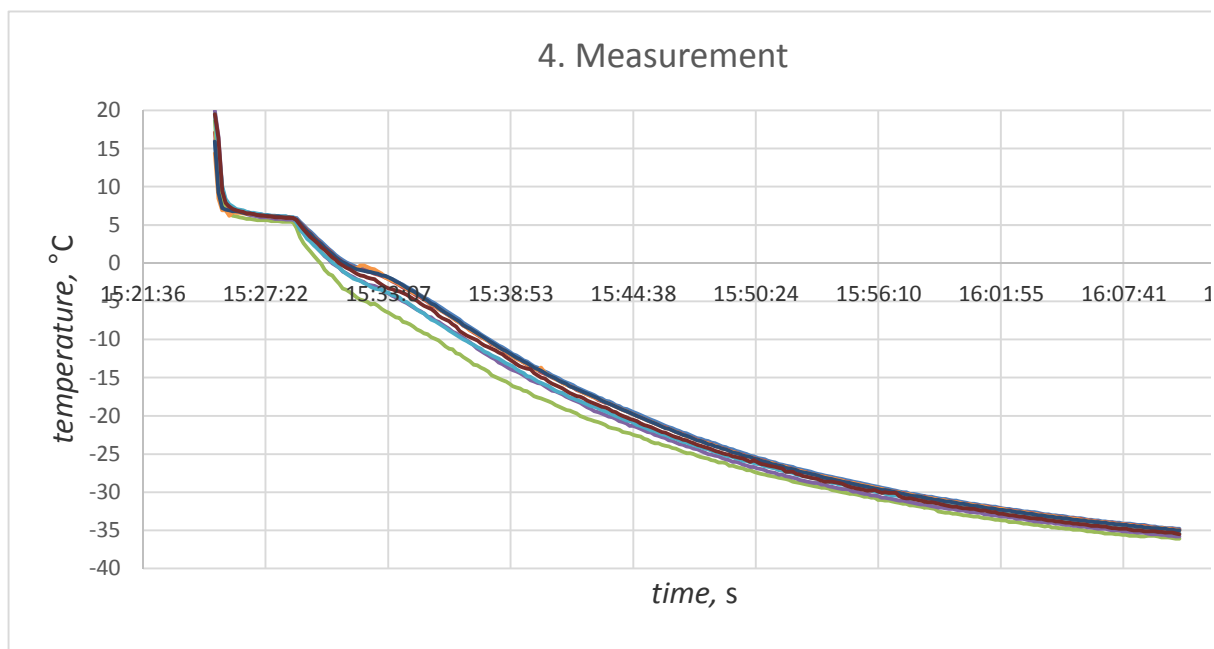


Figure 6 Air temperature measurement of freezing process

Table 1 The calibration of temperature sensors

Nominal temperature value / °C	The temperature measured with the etalon / °C	The temperature measured with calibrated measuring tool								U (k=2) / °C
		The recorder Testo Z1				The recorder Testo Z2				
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
		The indication of temperature sensors								
		11	12	13	14	21	22	23	24	
-30	-29,47	-29,4	-29,4	-29,4	-29,5	-29,4	-29,5	-29,4	-29,4	0,1
-20	-19,88	-19,9	-19,9	-19,9	-19,9	-19,9	-19,9	-19,9	-19,9	0,1
-10	-10,04	-10,1	-10,1	-10,1	-10,1	-10,1	-10,1	-10,1	-10,1	0,1
0	0,00	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,1
10	10,05	9,8	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	0,1
20	19,97	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	0,1
30	29,92	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	0,1

The graph (Figure 7) shows temperature courses of individual measurements at point G (Figure 4). Temperature sensors was occurred at this point three times from four realised measurements and that was the first, the third and the fourth measurement. Significant difference is between the first and the fourth measurement.

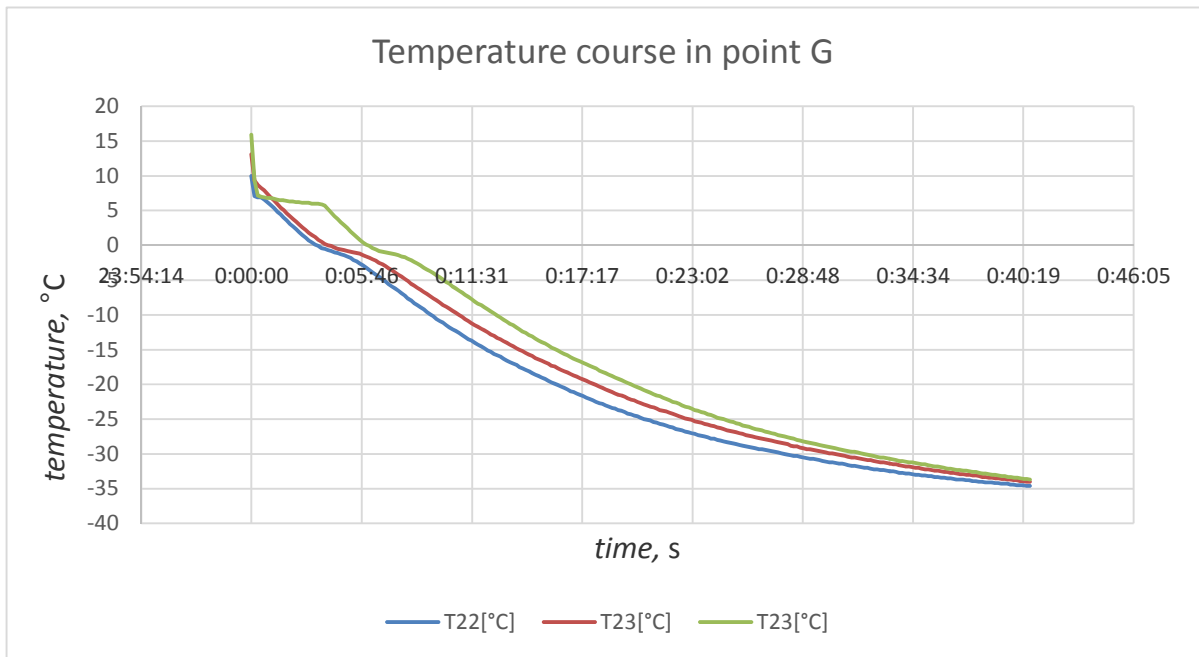


Figure 7 Temperature course at point G

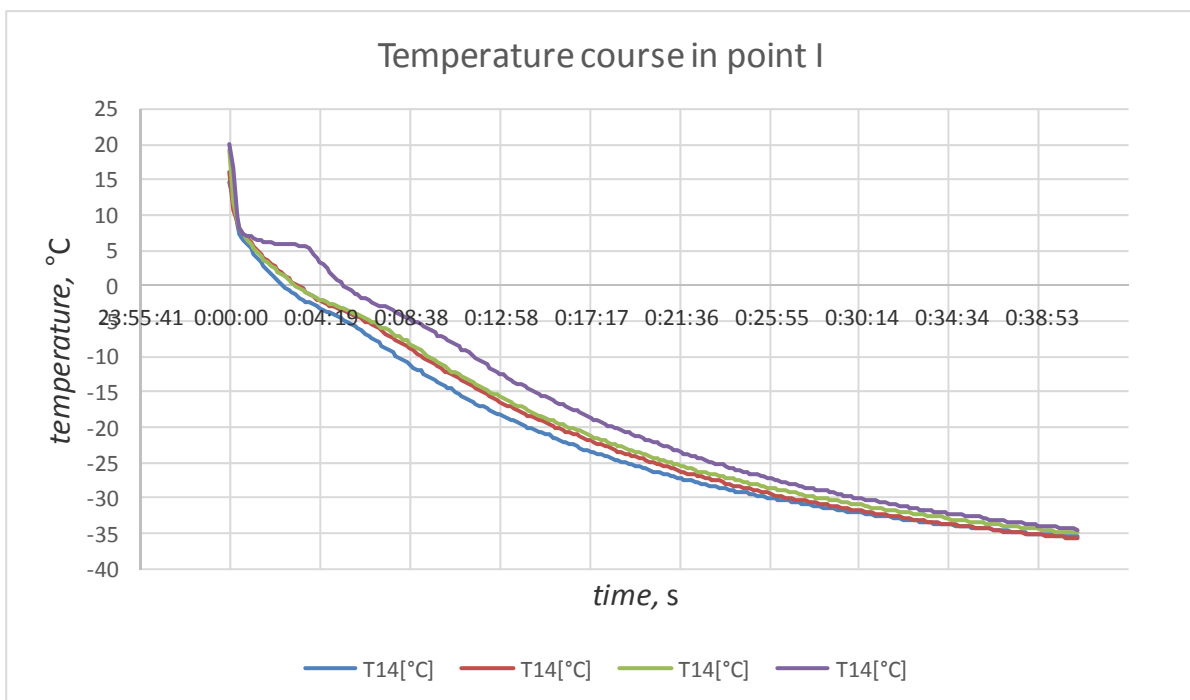


Figure 8 Temperature course at point I

The graph (Figure 8) shows temperature courses of individual measurements at point I (Figure 4), thus in the middle of freezing space. The difference is 5,3°C in the second minute during the measurements between the first and the fourth measurement. Unevenly air temperature layout in the space is caused by air dissipation by the fan which is attached to cooling machine with high probability.

No perishable food was in freezing space during the measurement. Acquired results are the basis for the next phases of proposed experiment. It will be interesting to watch changing fields of temperature in regard to the layout of different types of perishable foods in the space where temperature courses by freezing will be significantly affected by thermodynamic and shaped properties of this perishable foods.

4 Conclusions

Measurement model situation has been designed for concrete device that is used for freezing food. The proliferation of unwanted microorganisms and bacteria that can spoil the food is avoided by this device. The measurements that point to different temperature courses at individual space points were done in accordance with the model. It is possible to conclude based on measurement results that it is necessary for freezing food to consider freezing time and it is needed to test each device separately before their activation into the use. These aspects are considered in performing of experiments with concrete food. We will realise the measurements in this device in the next phase of experiment. The aim will be to monitor temperature courses measured by the help of temperature sensors mounted on the box used for freezing, at first without food and then in the presence of it. We will acquire the information about packing impact on the freezing and also the information about impact of food layout in cold space for freezing process thus gradually.

5 References

LUPTÁKOVÁ O., ORLOVSKÝ J., MARKOVIČ J., ŠVANTNER T. *Metrológia pri uplatňovaní zásad HACCP: Hlbokozmrazené potraviny a mrazené potraviny*. Prvé vydanie. Banská Bystrica, 2008. 43s. ISBN 978-80-970035-9-3

STN EN 12830:2002 Prístroje na zaznamenávanie teploty pri preprave, skladovaní a distribúcii chladených, zmrazených a hlboko zmrazených/rýchlo zmrazených potravín a zmrzliny

CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION: Food and agriculture organization of the United Nations Recommended International Code of Practice for the Processing and Handling of Quick Frozen Foods. In: *CX 5/105*. 2007

Monitorovanie technologického procesu delenia hydroabrazívnym prúdom

Technological Process Monitoring of Abrasive Water Jet Cutting

MOLITORIS, Matúš¹ & HLOCH, Sergej²

¹ Ing., ✉ Bayerova 1, 080 01 Prešov, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove,
💻 matus.molitoris@tuke.sk, 🌐 <http://www.fvt.tuke.sk/sk>

² Prof. Ing. PhD, ✉ Štúrova 31, 080 01 Prešov, Fakulta výrobných technológií so sídlom
v Prešove, 💻 sergej.hloch@tuke.sk, 🌐 <http://www.fvt.tuke.sk/sk>

Abstrakt: *Technológia abrazívneho vodného prúdu je zo svojej podstaty veľmi náročná na riadenie. Je to kvôli mnohým procesným faktorom a ich vzájomnej interakcii, ktorá má vplyv na výsledok. Často sú procesné parametre pre danú úlohu volené iba operátorom alebo zamestnancom zodpovedným za procesné operácie. Tieto vedomosti sú častokrát získané empiricky, spôsobom pokus-omyl a odovzdávané navzájom medzi pracovníkmi. Pre automatickú riadiacu slučku tohto procesu je nevyhnutné jeho on-line monitorovanie. Príspevok prezentuje možnosti monitorovania technologického procesu abrazívneho vodného prúdu s využitím akustických emisií a vibrácií. Taktiež je v príspevku prezentovaná metóda pre predikciu procesných parametrov využitím umelých neurónových sietí.*

Kľúčové slová: *abrazívny vodný prúd, akustická emisia, monitorovanie procesu*

1 Úvod

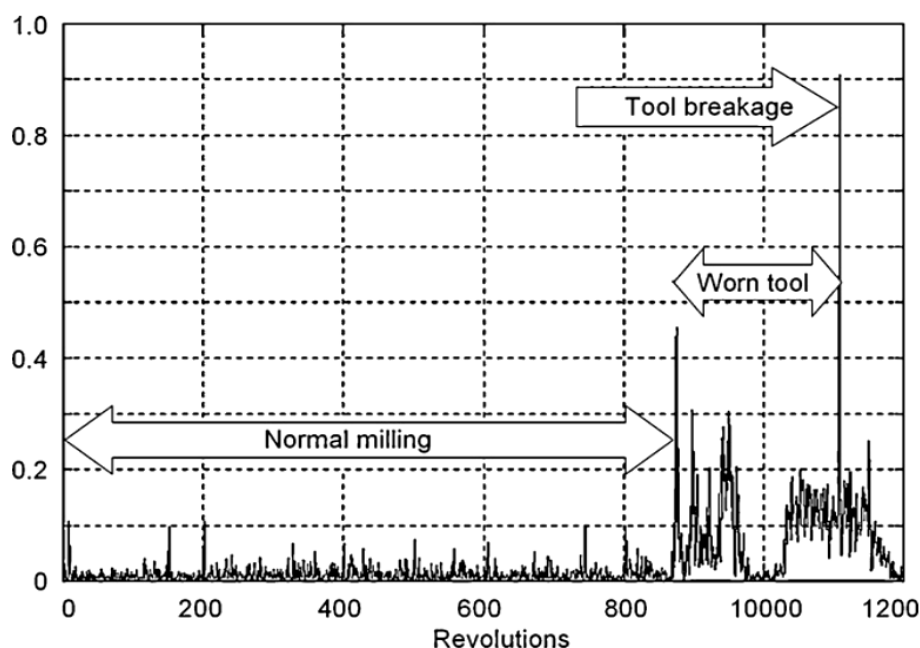
V minulosti, jediným kto vykonával monitorovanie technologického procesu bol operátor stroja. On sám dohliadal na proces obrábania, aby prebiehal tak ako bolo plánované technologom. V dnešnej dobe s CNC výrobnými zariadeniami už operátor nie je zapojený do procesu ako v minulosti, preto je nutné aby existovali spôsoby ako monitorovať výrobný proces bez operátora. Monitorovanie technologického procesu je vykonávané aby bola zaistená schopnosť vyrobiť výsledný povrch podľa predpísaných technologických podmienok. Monitorovanie má v prvom rade zabezpečiť:

- detekciu chýb,
- opotrebenie nástroja,
- kontrolu kvality.

Existuje mnoho spôsobov ako dosiahnuť monitorovanie technologického procesu. Jedným zo spôsobov je využitie sprievodných javov ktoré vznikajú počas technologického procesu. Najviac využívané prejavy sú:

- silové/zátťažové,
- momentové/napätové,
- vibračné,
- zvukové,
- tlakové,
- teplotné,

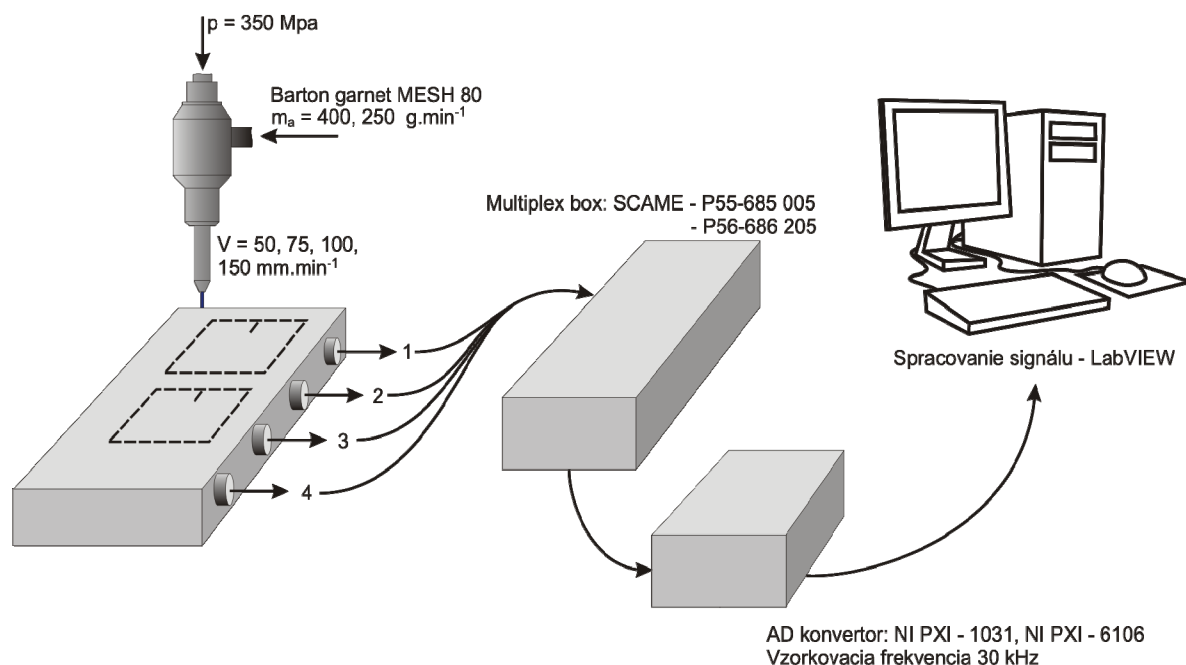
- prúdové/napät'ové,
- akustické emisie.



Obrázok 1 - DWT silového signálu pri frézovaní [TETI et al., 2010]

Za účelom využitia javu akustických emisií (AE) a vibračných signálov pre riadenie technologického procesu abrazívneho vodného prúdu bolo vykonaných mnoho pokusov. Choi et al. (1997) sa pokúsil zhodnotiť AE generované pri delení hliníkových keramik abrazívnym vodným prúdom aby potvrdil vzťah medzi parametrami procesu odoberania materiálu. Autori našli dobrú zhodu medzi energiou AE a procesnými parametrami, čo naznačuje praktickú implementáciu snímania AE pre účely procesného riadenia. Mohan et al. (1997) v ich posudku ukázali niekoľko pokusov o aplikáciu AE – Kwak et al. (1997) použili AE pre monitorovanie vŕtania slepých dier a Mohan et al. pre hĺbku rezu. Skonštatovali že AE ponúka lepší náhľad na mieru odoberania materiálu. Nasledujúc tento posudok, Kovacevic et al. (1998) študoval proces odoberania materiálu pri vŕtaní keramiky abrazívnym vodným prúdom za pomoci techniky snímania AE. Momber et al. (1999) využil techniku snímania AE pre monitorovanie hydroabrazívneho procesu delenia keramiky. Bolo zistené že AE dokáže veľmi dobre identifikovať proces materiálového odoberania a výkonu obrábania. Mohan et al. (2002) použil vyhodnocovanie AE na určenie rozptylu kinetickej energie pri delení hydroabrazívnym prúdom. Hassan et al. (2004) predložil model pre online predikciu hĺbky rezu založenom na odozve AE pri delení hydroabrazívnym prúdom. Pozoroval, že RMS energie AE je lineárne proporcionálne hĺbke rezu. Takisto poznamenal, že AE je vysoko citlivé k zmenám v hĺbke rezu. Konceptia online diagnostického systému pre detekciu delaminácie u kompozitov s uhlíkovými vláknami bol predstavený Karpinskim (2006). Z článku vyplýva že AE je veľmi dobrým ukazovateľom delaminácie. Analýza signálu ukázala že delaminácia je náhly proces a nemôže byť predikovaný dostatočne rýchlo aby sa zabránilo jeho vzniku. Axinte et al. (2009) ohlásil vývoj kalibrovaného integrovaného na energii založenej monitorovacej metódy pre hydroabrazívny prúd. Autori prezentovali multisenzorový systém ktorý ponúka možnosť detekcie viacerých zlyhaní vznikajúcich na hydroabrazívnej tryske ako aj na úrovni obrobku. Tento systém sa spolieha na niekoľko senzorov rozložených na kritických miestach hydroabrazívneho deliaceho systému. Rabani at al. (2012) monitoroval výstupnú energiu prúdu využitím akustickej emisie. To mu umožnilo monitorovať niekoľko procesných parametrov, ktoré nezávisle ovplyvňujú obrusovanú plochu, spoločným prístupom. Tento nový prístup dohľadu nad hĺbkou penetrácie prúdom sa

nazýva miera prenosu energie (Transfer Rate of Energy – TRE). Hreha et al. (2012) analyzoval AE zaznamenanú počas delenia nehrdzavejúcej ocele hydroabrazívnym prúdom, aby objasnil interakciu medzi faktormi hydroabrazívneho delenia a drsnosťou povrchu generovaného povrchu. Autori prezentovali lineárnu regresnú funkciu, ktorá môže byť použitá ako riadiaca funkcia hydroabrazívneho delenia nerezovej ocele. V ďalšom článku sa Hreha et al. (2014) sústredili na možnosti využitia vibračnej emisie ako potenciálneho zdroja informácií pre detekciu porúch prívodu abrazíva a zaostrovacej trubice v procese hydroabrazívneho delenia. Boli identifikované oblasti vo frekvenčnom spektre, ktoré môžu poslúžiť ako zdroje informácií o procese delenia. Stanovenie frekvencie vibračnej emisie na základe množstva dopadajúcich abrazívnych častíc bolo predmetom štúdie Hrehu et al. (2015). Bolo zistené že množstvo dopadajúcich častíc zodpovedá signifikantným frekvenciám v spektre vibračnej emisie. V ďalšom príspevku Hrehu et al. (2015) bola multiparametrickou regresnou analýzou s použitím vibračných signálov vypočítané parametre drsnosti povrchu. Hloch et al. (2012) skúmal vibračný signál a jeho spektrum získané počas hydroabrazívneho delenia vzorky, aby ukázal vzťah medzi hodnotami vstupných faktorov a parametrami sprievodných javov ako vibrácie a AE.



Obrázok 2 - Schematické znázornenie získavania AE a vibrácií [Hloch et al., 2011]

2 Monitorovanie hydroabrazívneho prúdu

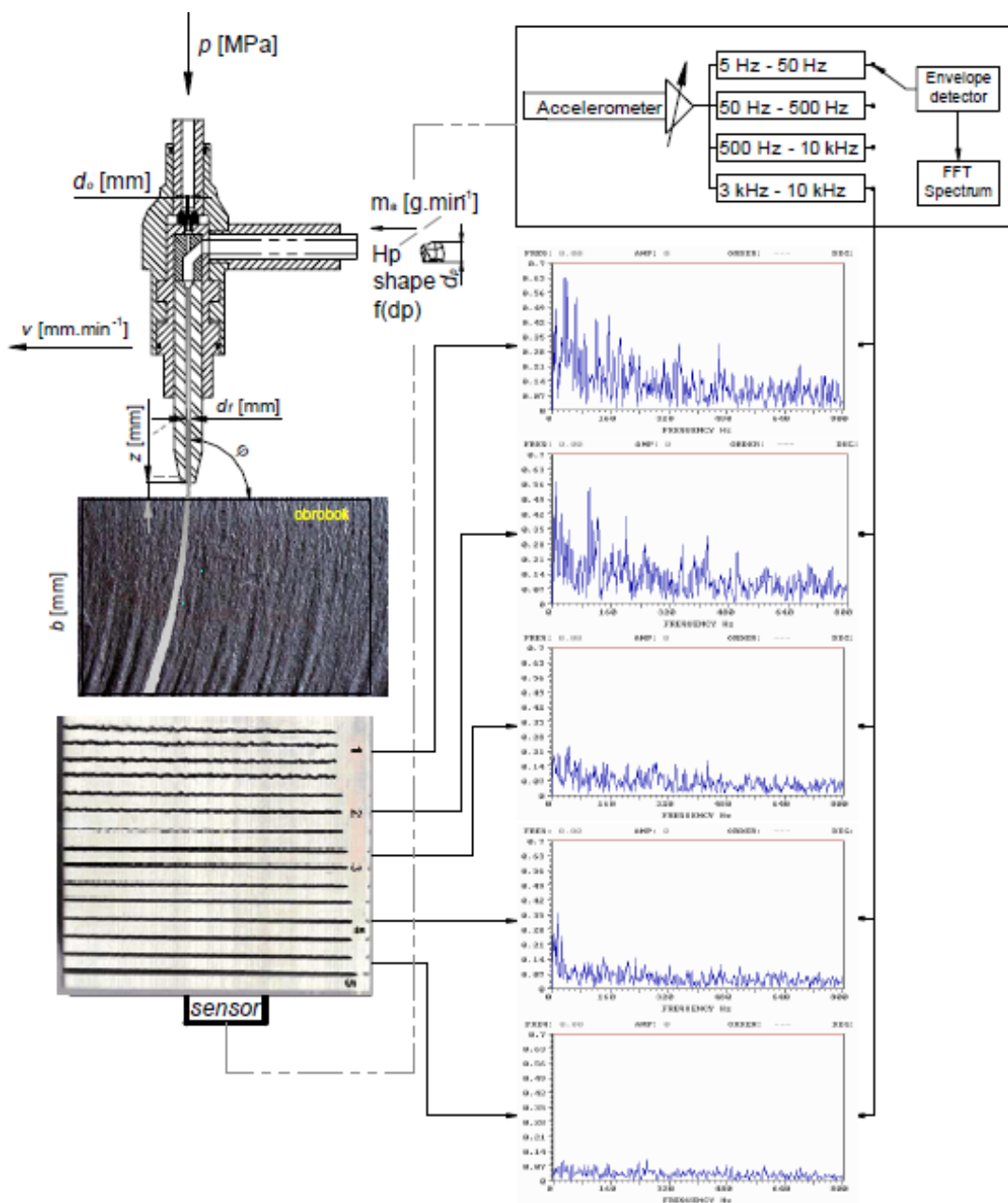
2.1 Využitie sprievodných javov

Keďže je hydroabrazívny nástroj tvorený zmesou vody, vzduchu a abrazíva je zložitý využiť mnoho zo spomínaných sprievodných javov. Obrábanie nemá externé silové / momentové účinky na obrobok, preto snímanie silového zaťaženia je neúčinné. Tepelné účinky sú negované ochladzovaním prúdom vody. Nástroj takisto neprenáša silové účinky na pohonné ústrojenstvo, preto snímanie elektrických veličín pohonov nemá veľký význam. Technológia je veľmi hlučná, preto získavanie informácií zo zvukových/hlukových prejavov je náročné. Jedným z mála vhodných sprievodných javov na monitorovanie a kontrolu sú akustické emisie a vibrácie.

2.2 Akustické emisie

Akustické emisie sú definované ako prechodné pružné napätové vlny generované mikroskopickými deformáciami v materiáli počas ich namáhania [LAURO et al., 2014]. Sú asociované s pohybom dislokácií, tvorbe a šíreniu trhlín, deformácií inklúzií alebo iných mechanizmov zahŕňajúcich mikroskopické deformácie v namáhanom materiáli, a môžu byť klasifikované ako kontinuálne alebo s náhlym uvoľnením energie (burst). Kontinuálne sú asociované s plastickými deformáciami kujných materiálov a eróznym procesom u materiálov krehkých. Typ s náhlym uvoľnením energie je spojený s nestabilným procesom ako praskaním, odlupovaním a kavitáciou. Zdrojom takýchto akustických emisií a vibrácií sú najmä:

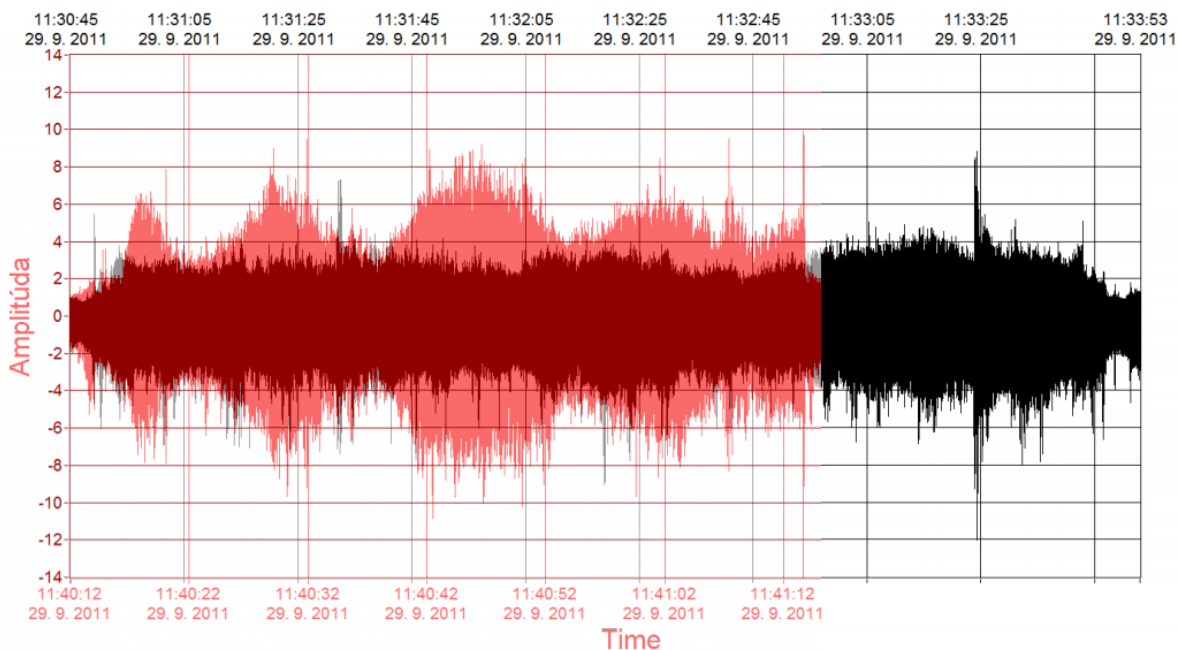
- elastické zrážky častíc,
- tvorba a šírenie trhlín,
- odoberanie materiálu,
- štiepenie jednotlivých zŕn.



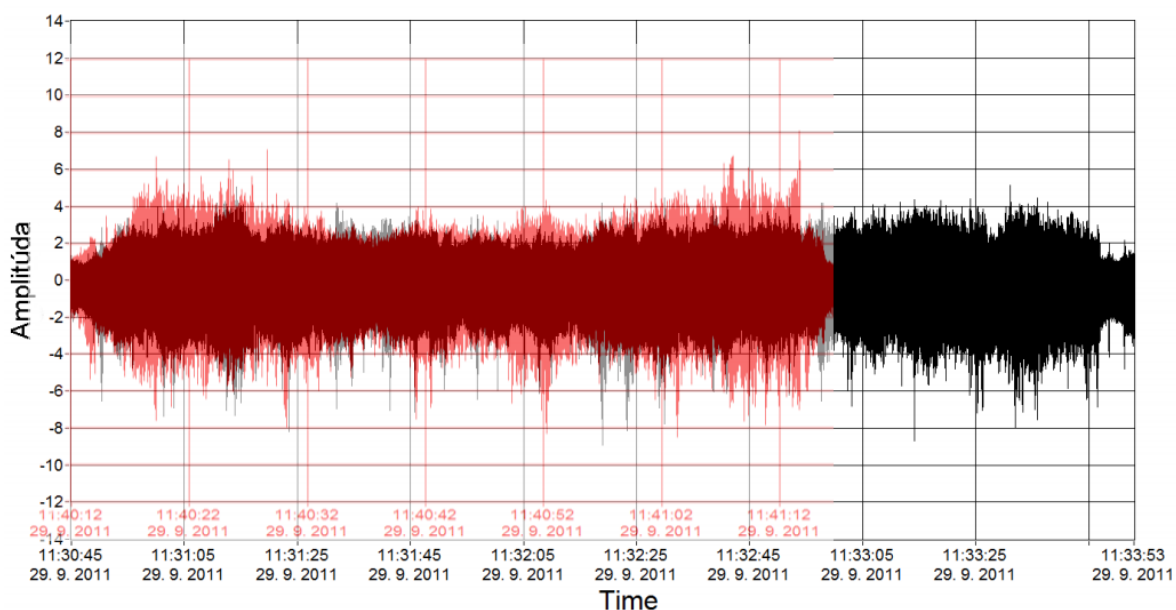
Obrázok 3 - Znázornenie vzťahu medzi vibračným signálom a kvalitou reznej medzery [HREHA et al., 2014]

3 Predchádzajúci výskum

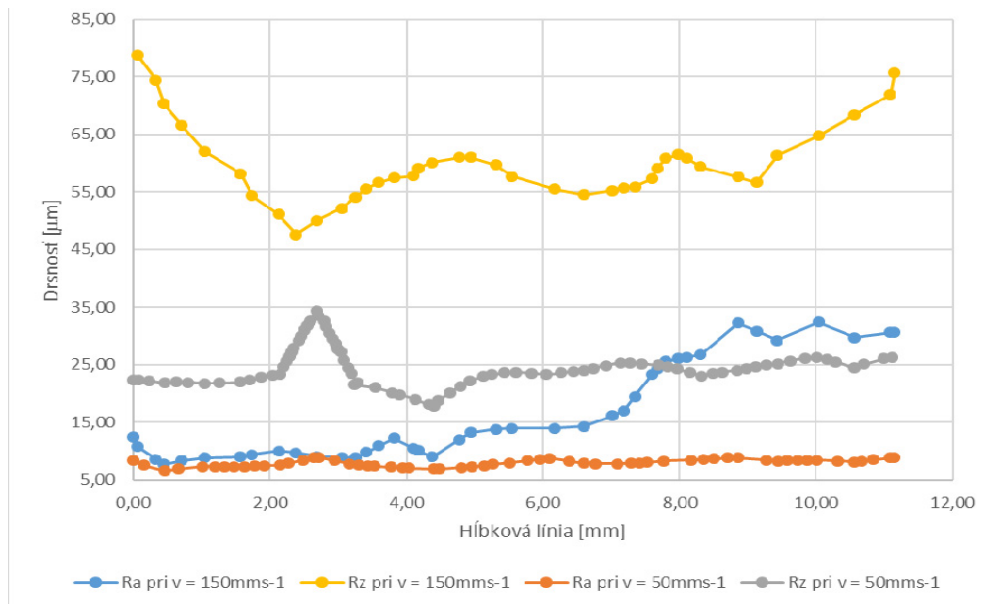
V predchádzajúcom výskume v oblasti delenia hydroabrazívnym prúdom bolo skúmaných niekoľko závislostí charakteru (topológie) obrobeného povrchu so zreteľom na vzťah akustických emisií a vibrácií na charakter technologického procesu. Bola vykonaná analýza erózneho procesu na základe generovaných vibrácií a akustickej emisie pri delení hydroabrazívnym prúdom. Vykonala sa kalkulácia profilu drsnosti na základe analýzy akustickej emisie a vibrácií. Opotrebenie zaostrovacej trubice a detekcia porúch na základe vibračnej analýzy boli takisto skúmané.



Obrázok 4 - Amplitúda vibračných signálov (horizontálny smer) pri delení hydroabrazívnym prúdom pri rýchlosti posuvu $v = 150 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (červená) a $v = 50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (čierna)

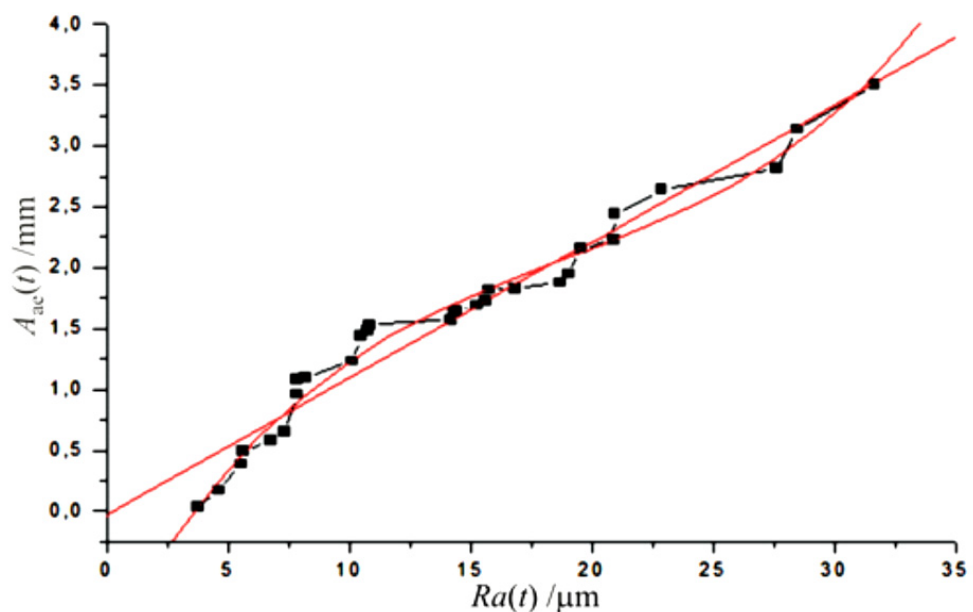


Obrázok 5 - Amplitúda vibračných signálov (vertikálny smer) pri delení hydroabrazívnym prúdom pri rýchlosti posuvu $v = 150 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (červená) a $v = 50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (čierna)

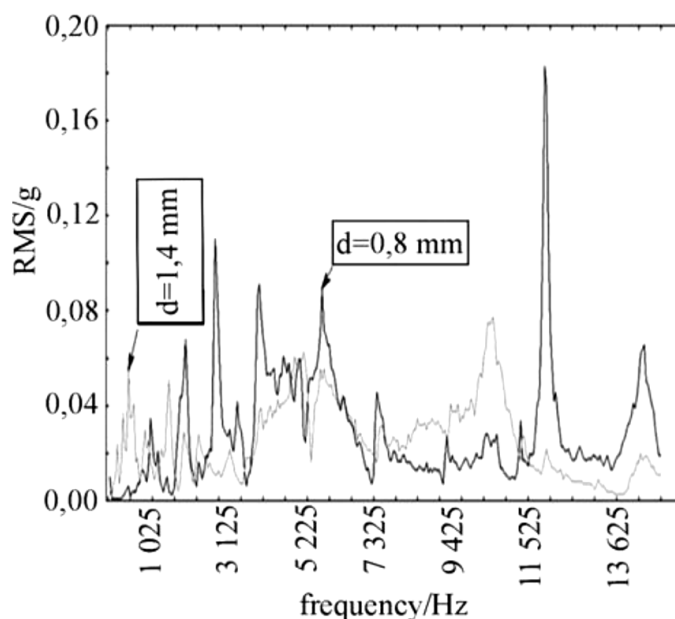


Obrázok 6 - Znázornenie drsností povrchu vytvoreného hydroabrazívnym prúdom

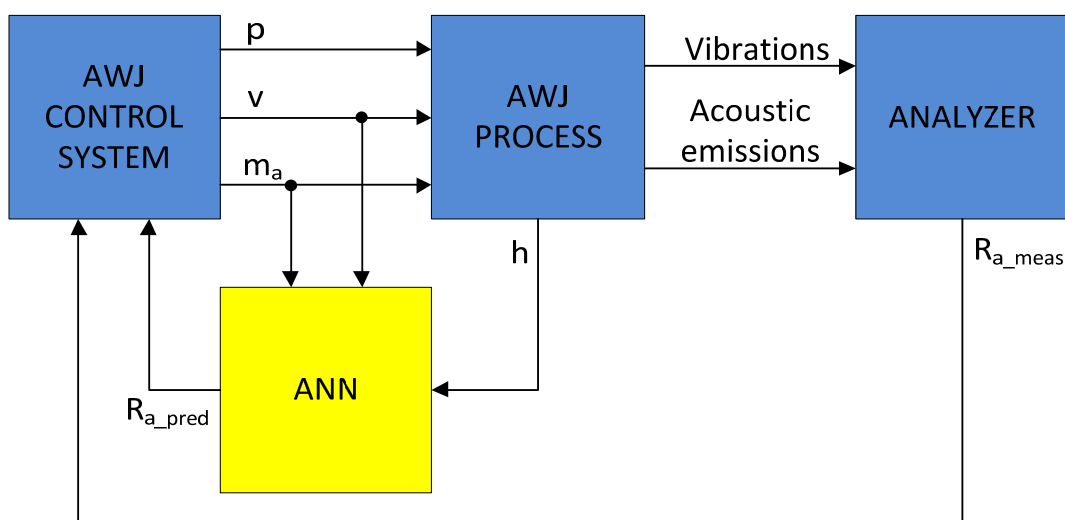
Na Obrázok 3 - Znázornenie vzťahu medzi vibračným signálom a kvalitou reznej medzery. Obrázok 3 sú znázornené spektrá vibračných signálov pri rôznych technologických podmienkach delenia materiálu hydroabrazívnym prúdom. Rôzne technologické podmienky delenia majú za následok rôzny charakter topológie vytvoreného povrchu. Z priebehov spektier je možné posúdiť za akých technologických podmienok bol povrch vytvorený a aký je charakter povrchu. Podobne na Obrázok 4 a Obrázok 5 sú znázornené časové priebehy dvoch vibračných signálov pri rôznych technologických podmienkach, super-imponovaných na seba, v dvoch na seba kolmých smeroch. Na Obrázok 6 je grafické znázornenie drsností povrchu pri oboch technologických podmienkach obrábania ($v = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $v = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). Z grafického vyjadrenia je zrejmé, aký vplyv majú technologické podmienky na generovanie povrchu a aký je vzťah topológie povrchu ku generovaným vibráciám. Následnou analýzou takto zozbieraných dát bola regresnou analýzou zostavená závislosť amplitúdy akustických emisií a topológie (drsnosti) vytvoreného povrchu (Obrázok 7).



Obrázok 7 - Grafické znázornenie vzťahu amplitúdy akustických emisií a drsnosti povrchu [HREHA et al. 2012]



Obrázok 8 - Spektrum vibračného signálu simulovaného opotrebenia zaostrovacej trubice [HREHA et al., 2014]



Obrázok 9 - Návrh monitorovania a možného on-line riadenia hydroabrazívneho delenia

Obrázok 8 znázorňuje vibračné signály simulovaného opotrebenia zaostrovacej trubice. Tu je badateľný posun špičkových hodnôt v hornej časti spektra ($>11,5\text{kHz}$) na nižšie frekvencie, ako aj celkové zníženie (RMS) týchto hodnôt. Z predchádzajúcich prác bola navrhnutá koncepcia (Obrázok 9) možného on-line riadenia a monitorovania technológie hydroabrazívneho prúdu [Gánovská et al., 2016]. Z charakteru signálov je zrejmé, že extrahovať užitočné informácie z časových priebehov alebo spektier nebude jednoduché. Ideálnym prostriedkom na analýzu takýchto dát sa javia umelé neurónové siete. Použitie neurónových sietí umožňuje vyčítať z dát vzory, ktoré by bolo veľmi zložité popísať analyticky, podľa ktorých by bolo možné vytvoriť regulačnú slučku [Hošovský et al., 2014]. V navrhovanom riešení bola použitá neurónová sieť so spätným šírením chyby (BP) s tromi vstupnými neurónmi, jedným výstupným neurónom a dvoma skrytými vrstvami. Simuláciou na nameraných dátach z predchádzajúcich meraní bolo ukázané, že tento prístup sa ukazuje ako vhodný.

4 Záver

Potreba monitorovania technologických procesov sa bude neustále zvyšovať. Mnoho signálov sprievodných javov nie je možné jednoducho vzťahovať s monitorovanými technologickými procesmi. Z týchto dôvodov bude rásť aj dôležitosť využitia techník výpočtovej inteligencie, napr. umelých neurónových sietí, ako prostriedku na monitorovanie a riadenie technologického procesu hydroabrazívneho delenia materiálov.

Príspevok bol vypracovaný s finančnou podporou projektu APVV-0207-12 „Monitorovanie interakcie hydroabrazívneho prúdu pomocou vibrácií a akustickej emisie“.

5 Použitá literatúra

AXINTE, D.A. A, KONG, M.C. C. An integrated monitoring method to supervise waterjet machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2009, Vol. 58, No. 1, pp. 303 – 306. ISSN 0007-8506.

GÁNOVSKÁ, B., MOLITORIS, M., HOŠOVSKÝ, A., PITEL, J., KRÓLCZYK, J., RUGGIERO, A., KRÓLCZYK, G., HLOCH, S. Design of the Model for the On-line Control of the AWJ Technology based on Neural Networks. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. (in press). ISSN 0971-4588.

HASSAN, A.I., CHEN, C., KOVACEVIC, R. On-line monitoring of depth of cut in AWJ cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, Vol. 44, No. 6, pp. 595 – 605. ISSN 0890-6955.

HLOCH, S. et al. Vibration as a Source of Information for Abrasive Waterjet Monitoring. In: *Journal of Naval Science and Engineering*. 2011, Vol. 7, No. 1, pp. 71 – 85.

HOŠOVSKÝ, A., MIŽÁKOVÁ, J., PITEL, J. Improved Modeling of Pneumatic Muscle Actuator Using Recurrent Neural Network. In: *2014 IEEE World Congress on Computational Intelligence: 2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Beijing, July 6-11, 2014, IEEE, 2014. pp. 4019-4024. ISBN 978-1-4799-1484-5

HREHA, P., HLOCH, S., PERŽEL, V. Analysis of Acoustic Emission Recorded During Monitoring of Abrasive Waterjet Cutting of Stainless Steel AISI 309. In: *Technický vjesník*. 2012, Vol. 19, No. 2, pp. 355 – 359.

HREHA, P. et al. Monitoring of focusing tube wear during Abrasive WaterJet (AWJ) cutting of AISI 309. In: *Metalurgija*. 2014, Vol. 53, No. 4, pp. 533 – 536. ISSN 0543-5846.

HREHA, P. et al. Determination of vibration frequency depending on abrasive mass flow rate during abrasive water jet cutting. In: *Int J Adv Manuf Technol*. 2015, pp. 763 – 774

HREHA, P. et al. Roughness Parameters Calculation by Means of On-line Vibration Monitoring Emerging from AWJ Interaction with Material. In: *Metrol. Meas. Syst* [online]. 2015, Vol. XXII, No. 2, pp. 315 – 326.

CHOI, G. S., CHOI, G. H. Process Analysis and Monitoring in Abrasive Water Jet Machining of Alumina Ceramics. In: *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 1997, Vol. 37, No. 3, pp. 295 – 307.

KARPINSKI, A.. An Introduction to the Diagnosis of the Delamination Process for Glass/Epoxy Composites During High-Pressure Abrasive Water-Jet Cutting. In: *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*. 2006, Vol. 52, pp. 532 – 538.

KINÍK, D. et al. On-line Monitoring of Technological Process of Material Abrasive Water Jet Cutting. In: *Technický vjesnik*. 2015, Vol. 22, No. 2, pp. 351 – 357. ISSN 1330-3651.

KORAT, M. M., ACHARYA, G. D. A Review on Current Research and Development in Abrasive Waterjet Machining. In: *Journal of Engineering Research and Application* [online]. 2014, Vol. 4, No. 1, pp. 423 – 432.

KOVACEVIC, R., MOMBER, A.W., MOHEN, R.S. Energy Dissipation Control in Hydro-Abrasive Machining Using Quantitative Acoustic Emission. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2002, Vol. 20, No. 6, pp. 397 – 406. ISSN 0268-3768.

KOVACEVIC, R, KWAK, H-S, MOHAN, R. S. Acoustic emission sensing as a tool for understanding the mechanisms of abrasive water jet drilling of difficult-to-machine materials. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 1998, Vol. 212, No. 1, pp. 45 – 58. ISSN 0954-4054.

LAURO, C.H. et al. Monitoring and processing signal applied in machining processes – A review. In: *Measurement* [online]. 2014, Vol. 58, pp. 73 – 86. ISSN 0263-2241.

MOHAN, R et al. State of the Art of Research and Development in Abrasive Waterjet Machining. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 1997, Vol. 119, No. November, pp. 776 – 785. ISSN 1087-1357.

MOMBER, A.W., MOHAN, R.S., KOVACEVIC, R. An Acoustic Emission Study of Cutting Bauxite Refractory Ceramics by Abrasive Water Jets. In: *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 1999, Vol. 8, No. 4, pp. 450 – 454.

RABANI, A., MARINESCU, I., AXINTE, D. Acoustic emission energy transfer rate: A method for monitoring abrasive waterjet milling. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012, Vol. 61, pp. 80 – 89. ISSN 0890-6955.


TETI, R et al. Advanced monitoring of machining operations. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2010, Vol. 59, No. 2, pp. 717 – 739. ISSN 0007-8506.

WANG, W., WANG, M. Abrasive water-jet process control overview. In: *2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)* [online]. 2011, pp. 66 – 69.

YAO, Y, FANG, X.D., ARNDT, G. Comprehensive Tool Wear Estimation in Finish-Machining via Multivariate Time-Series Analysis of 3-D Cutting Forces. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 1990, Vol. 39, No. 1, pp. 57 – 60. ISSN 0007-8506.

Automaticky přeladitelný pásmový filtr Automatically Tunable Bandpass Filter

PAWLENKA, Miroslav¹ & TŮMA, Jiří²

¹ Ing., ✉ VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 703 88 Ostrava,  miroslav.pawlenka@vsb.cz

² prof. Ing. CSc.,  jiri.tuma@vsb.cz

Abstrakt: Tento příspěvek se zabývá automaticky přeladitelným pásmovým filtrem druhého řádu. Filtr je realizován v programu Matlab Simulink a bude se aplikovat na zkušební stav pro aktivní řízení kluzných ložisek s polohovým regulátorem a stabilizačním regulátorem. Filtrovaná veličina bude výchylka hřídele, která vystupuje jako regulační odchylka.

Klíčová slova: motor, ložiska, simulace, pásmový filtr

1 Úvod

Úkolem pásmového filtru, nebo také pásmové propusti, je filtrovat signál jen určitých frekvencí. Tento příspěvek řeší laditelný pásmový filtr, který umožní dynamicky měnit střední frekvenci propustného pásma. Filtr je druhého řádu, aby nevnášel do zpětnovazební smyčky zbytečně velké fázové zpoždění. V článku bude popsána realizace a simulace filtru v programu Matlab Simulink. Kvalita filtrace bude vyhodnocena spektrální analýzou. Nejpoužívanějším algoritmem je rychlá Fourierova transformace FFT.

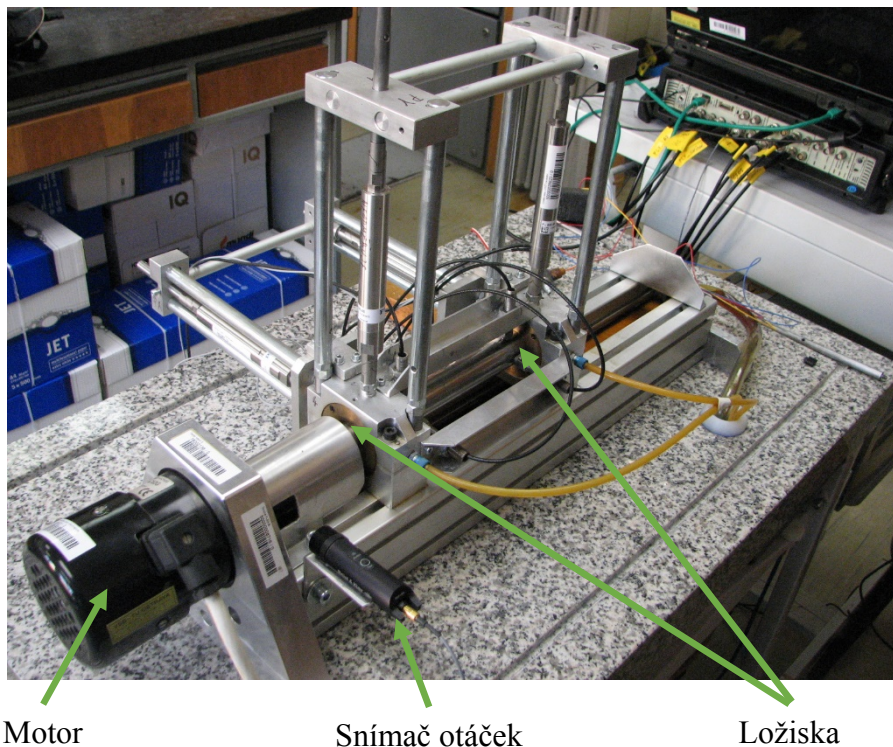
Vytvořený algoritmus pásmového filtru bude využit při řízení kluzných ložisek vysokootáčkového stroje, jehož popis je uveden v článku. Tento zkušební stav slouží pro aktivní tlumení vibrací a pásmový filtr má regulaci zkvalitnit ve frekvenčním pásmu, ve kterém vzniká porucha. Dalším zkvalitněním je použití Kalmanova filtru na měření otáček. Úkolem Kalmanova filtru je odstranit chybu měření nějaké veličiny. Kalmanův filtr je matematický aparát, který redukuje šum z měřeného signálu v oblasti času, což je výhoda oproti jiným algoritmům filtrace, kdy je nutné signál nejprve převést do frekvenční oblasti pomocí Fourierovy transformace.

2 Popis zkušebního stavu

Zkušební stav je složen z hřídele, která je uložena ve dvou kluzných radiálních hydrodynamických ložiscích, jehož účelem je sledování nestability rotoru a jeho řízení. Je tedy potřeba monitorování odchylek rotujícího hřídele v okolí kluzných ložisek, do kterých je tento hřídel uložen. Do kluzných ložisek je pod tlakem dodáván mazací olej pomocí mazacího agregátu. Konstrukce obsahuje kanálky, kterými odtékající olej putuje zpátky do nádrže agregátu. Snímání aktuální polohy hřídele ve dvou rovinách kolmých na osu hřídele zajišťují čtyři senzory odchylek s analogovým výstupem, které jsou rozloženy, tak aby pokryly osy x a y v blízkosti kluzných ložisek [3].

Pouzdrém ložiska lze pohybovat v malých mezích pomocí piezoaktuátorů. Motor, který hřídel pohání, je trojfázový asynchronní. Je napájen z frekvenčního měniče Commander SKA1200075 (Control Techinques), jehož maximální frekvence je do 400Hz. Maximální otáčky motoru tedy mohou být až do 24 000 ot/min. Typ motoru firmy ATAS Náchod je FT4C52G s výkonem 500W. Výkon měniče je 750W. Laserová sonda pro měření otáček

dokáže s adaptérem pro vysoké rychlosti měřit až do 250 000 ot/min na vzdálenost 50mm až 2m.



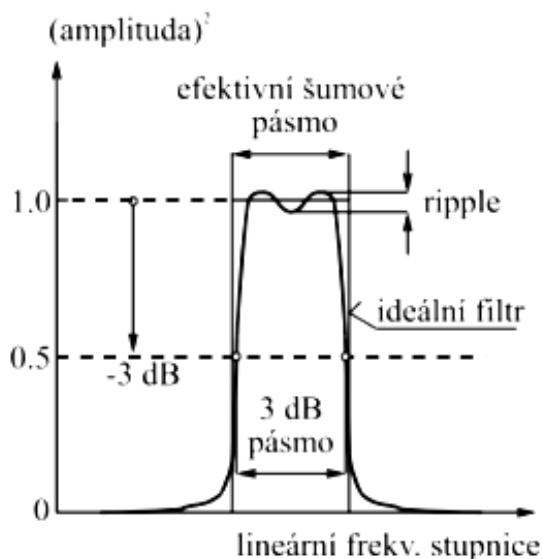
Obrázek 1 - Zkušební stav

Aktivní tlumení vibrací je umožněno pohyblivým cylindrickým pouzdrem, ve kterém se hřídel otáčí. Poloha hřídele je měřena vzhledem k rámu stroje nebo pevnému ložiskovému tělesu snímači přiblížení. Žádaná poloha hřídele v horizontálním a vertikálním směru v rovině kolmé na osu hřídele se porovnává v signálovém procesoru dSPACE se skutečnou polohou. Rozdílem žádané a skutečné polohy vzniknou regulační odchylky, které budou filtrovány právě vytvořeným laditelným pásmovým filtrem.

Signálový procesor dSPACE obsahuje pro každou souřadnici proporcionální regulátor a pásmový filtr typu IIR druhého řádu. Výhodou dSPACE je programování úloh v Simulinku. Regulace v celém frekvenčním pásmu se provádí jen v pásmu, ve kterém vzniká periodická porucha vyvolávající vibrace hřídele typu whirl.

3 Pásmový filtr

Pásmový filtr neboli pásmová propust patří mezi digitální filtry. Propustné pásmo filtru je omezeno horní a spodní frekvencí. Použitý pásmový filtr je druhého řádu, aby nevnášel do zpětnovazební smyčky zbytečně velké fázové zpoždění.



Obrázek 2 – Charakteristika pásmového filtru [4]

Laditelný pásmový filtr má Laplaceův přenos s komplexní proměnnou $s = j\omega$.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{2K\xi T_0 s}{T_0^2 s^2 + 2\xi T_0 s + 1}, \quad (1)$$

$$\omega = \frac{1}{T_0}, \quad \omega = 2\pi f_{WIRL}, \quad (2)$$

kde je K – zesílení,
 T_0 – časová konstanta,
 ξ – tlumení.

Zesílení je pro úhlovou frekvenci $\omega = 1/T$ jednotkové a pro ostatní frekvence nižší. Pro úhlovou frekvenci $\omega = 0$ a $\omega \rightarrow \infty$ je zesílení nulové. Šířka propustného frekvenčního pásma je závislá na poměrném tlumení filtru ξ .

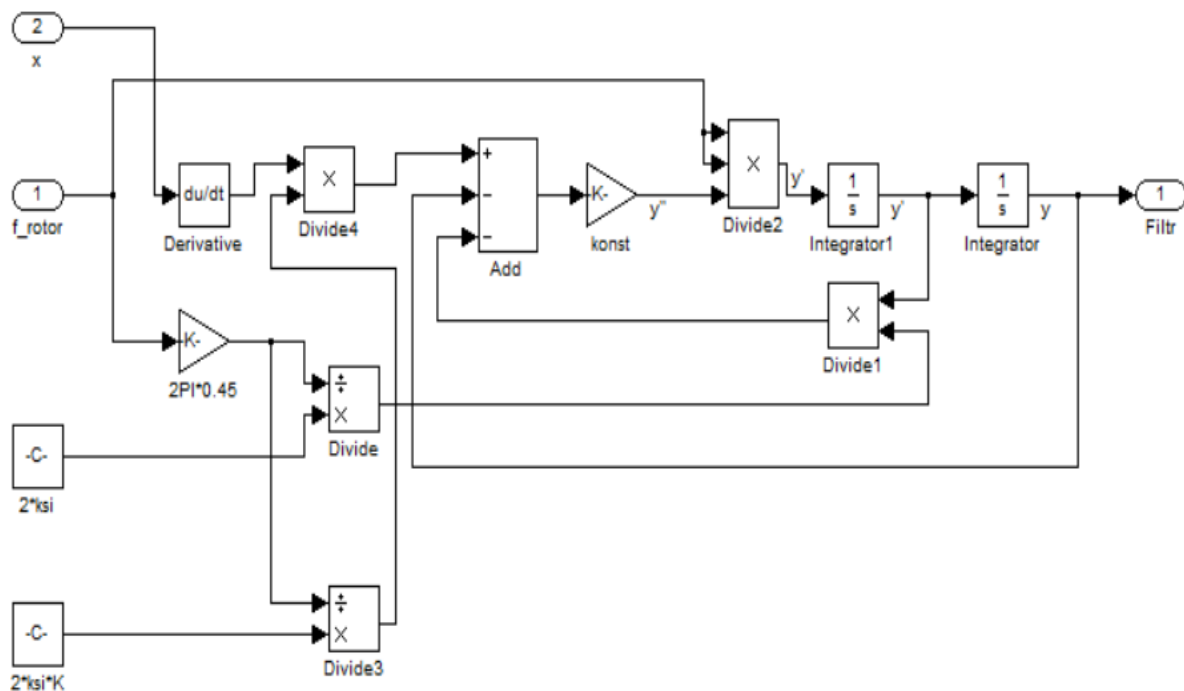
Frekvence f_{WIRL} , na kterou se ladí pásmový filtr, je závislá na frekvenci otáčení hřídele.

$$f_{WIRL} = (0,42 \text{ až } 0,48) f_{ROTOR}, \quad (3)$$

Jelikož je v Simulinku model aktivního řízení kluzných ložisek v časové oblasti, musí se Laplaceův přenos převést do oblasti času. Po převodu je dán matematický model filtru touto diferenciální rovnicí:

$$y'' = (2\pi f_{rotor} * 0,45)^2 \left[\frac{2K\xi}{2\pi f_{rotor} * 0,45} x' - \frac{2\xi}{2\pi f_{rotor} * 0,45} y' - y \right] \quad (4)$$

Místo frekvence f_{WIRL} je již dosazen vztah (3).

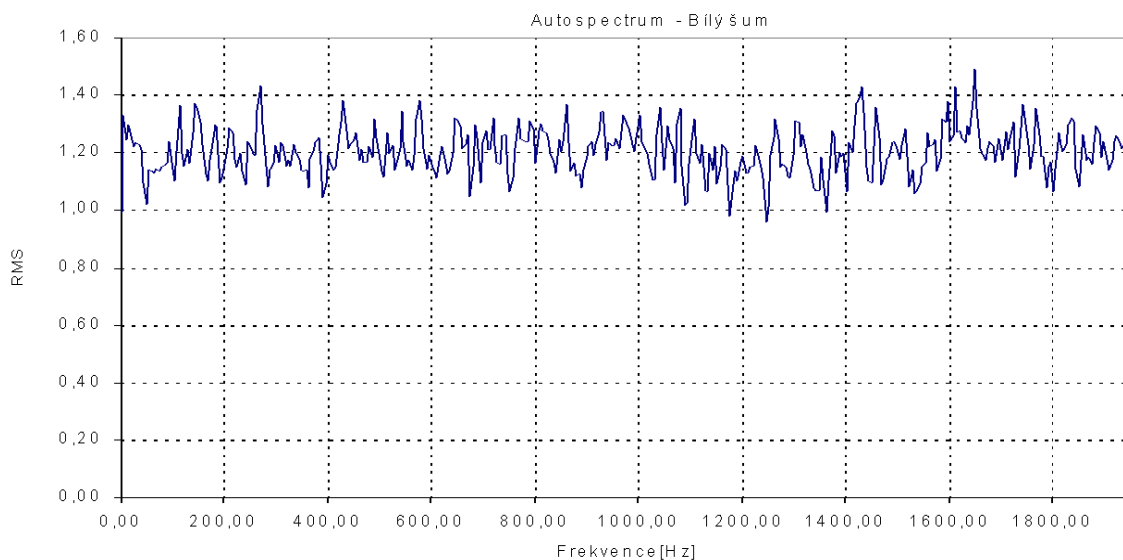


Obrázek 3 – Vytvořený model v Simulinku

Na obrázku 3 je vytvořený model pásmového filtru v Simulinku, který bude doplněn do modelu regulace. Celý algoritmus pak běží v signálovém procesoru dSPACE s pevným integračním krokem.

4 Simulace filtru

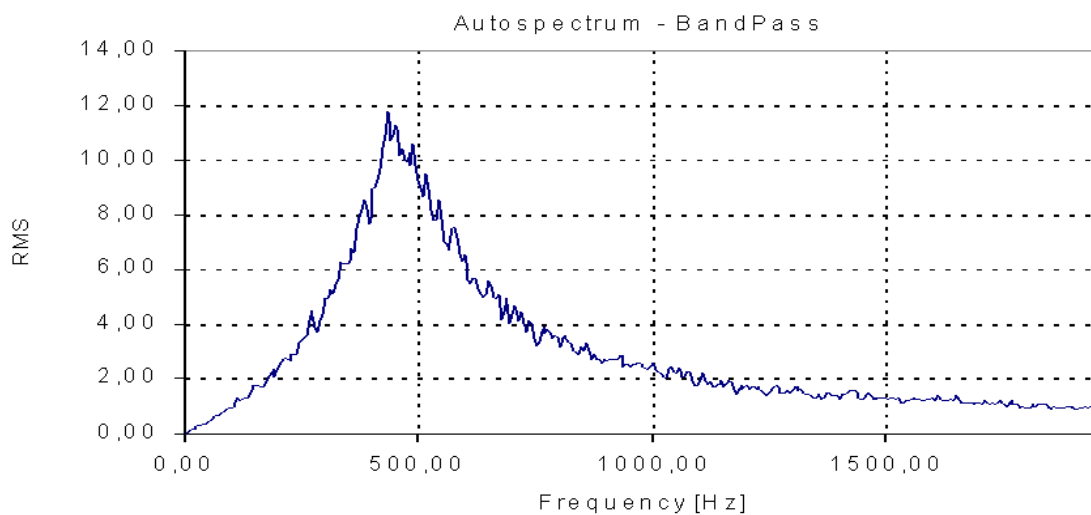
Filtr byl v Simulinku testován tak, že na vstup byl přiveden bílý šum a frekvence otáčení rotoru byla zadána konstantou.



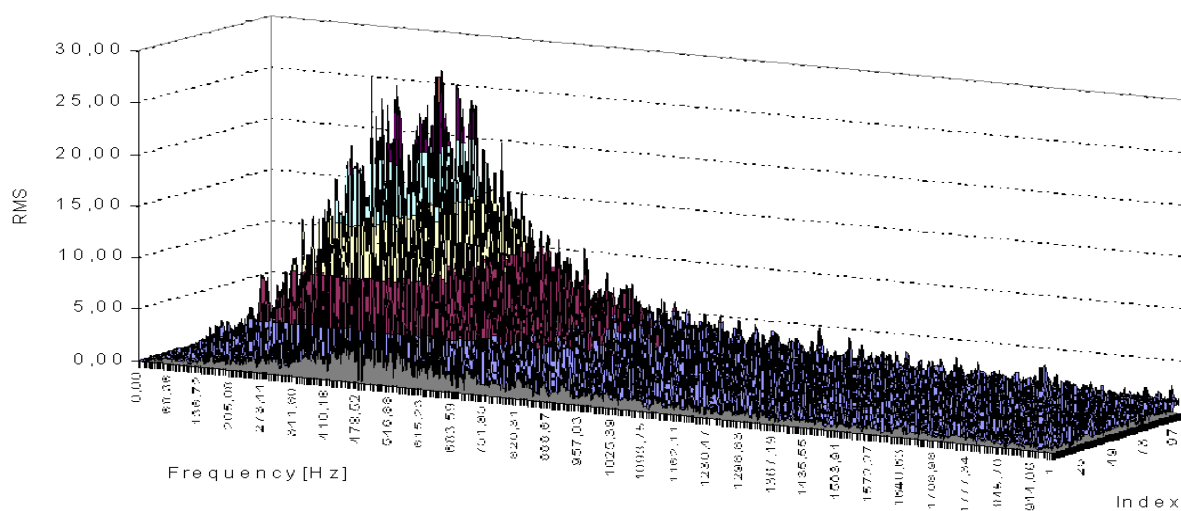
Obrázek 4 – Autospektrum bílého šumu

Nastavená doba simulace byla 60 sekund a vzorkovací frekvence 5 kHz. U autospektra bílého šumu je vidět, že jeho frekvenční rozsah je od 0 do 2,5 kHz. Zadaná konstanta frekvence rotoru je dána jako 1000 Hz. Výsledná frekvence, na kterou bude filtr naladěn je tedy dána vztahem (3) a pro zvolenou konstantu 0,45 se jedná o frekvenci 450 Hz. Simulace byla provedena pro 3 různé parametry poměrného tlumení filtru ζ a pro zesílení $K = 50$.

Pro $\xi = 0,2$:

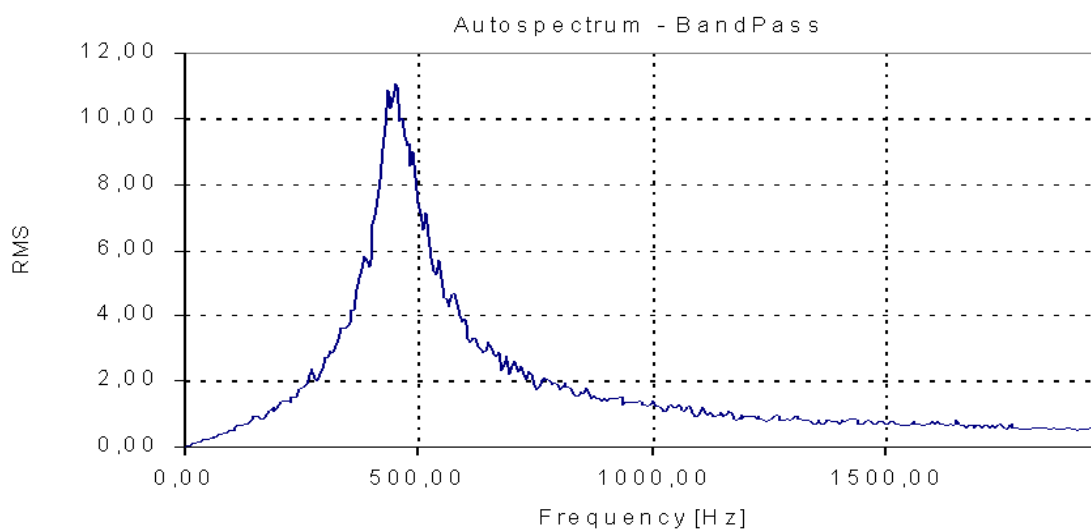


Obrázek 5 – Autospektrum pro $\xi = 0,2$

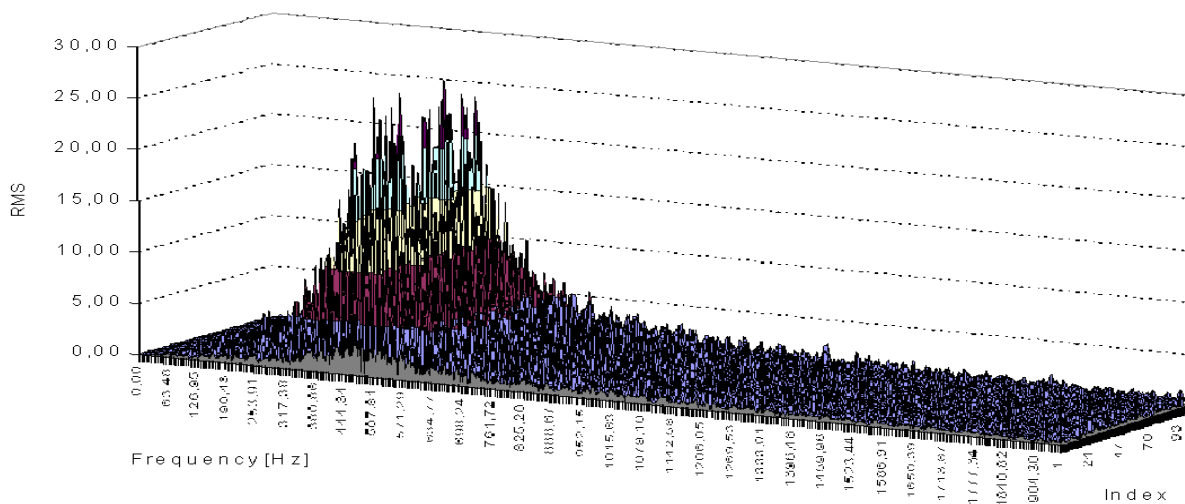


Obrázek 6 – Multispektrum pro $\xi = 0,2$

Pro $\xi = 0,1$:

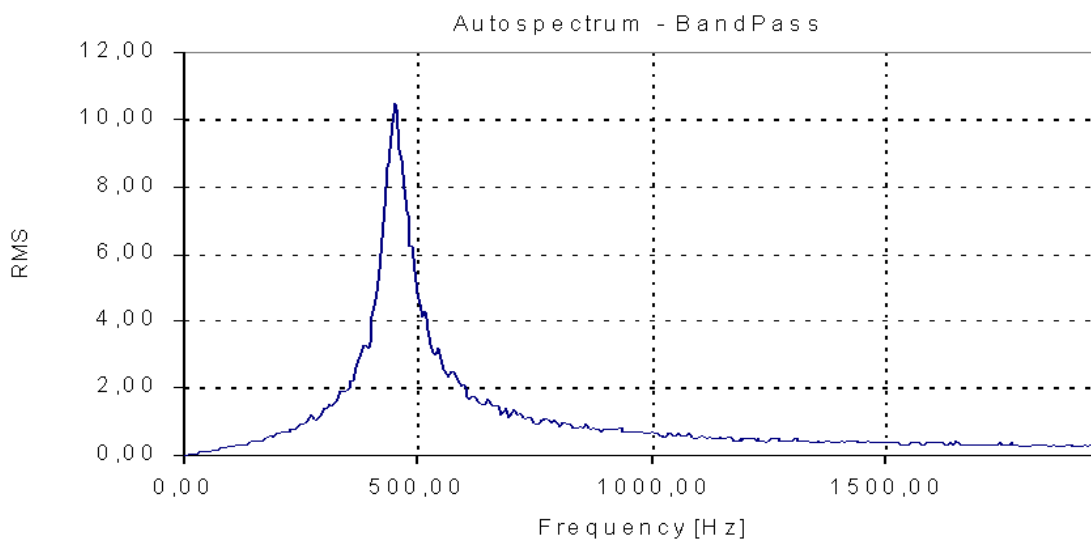


Obrázek 7 – Autospektrum pro $\xi = 0,1$

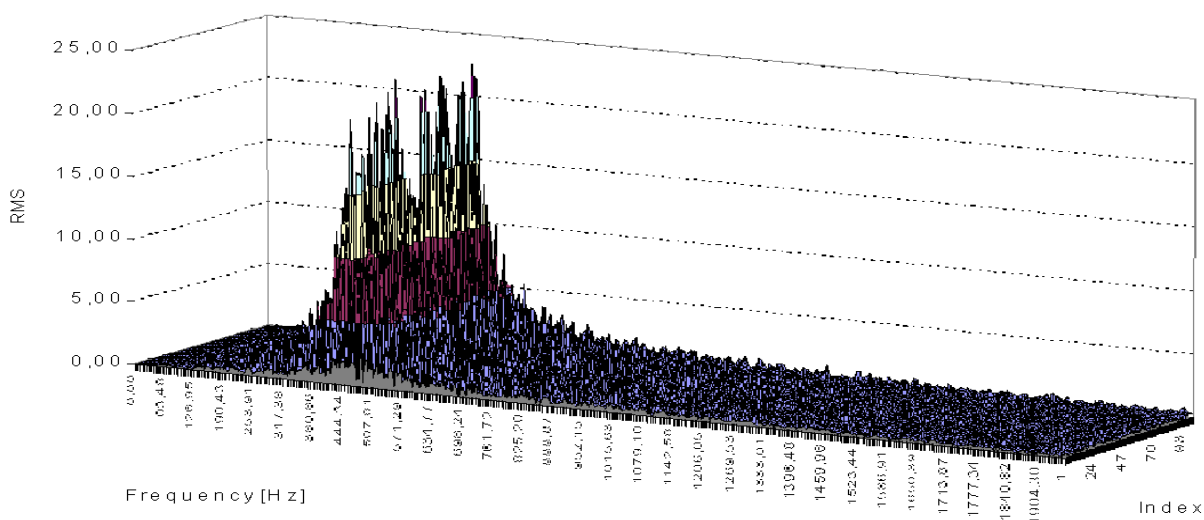


Obrázek 8 – Multispektrum pro $\xi = 0,1$

Pro $\xi = 0,05$:



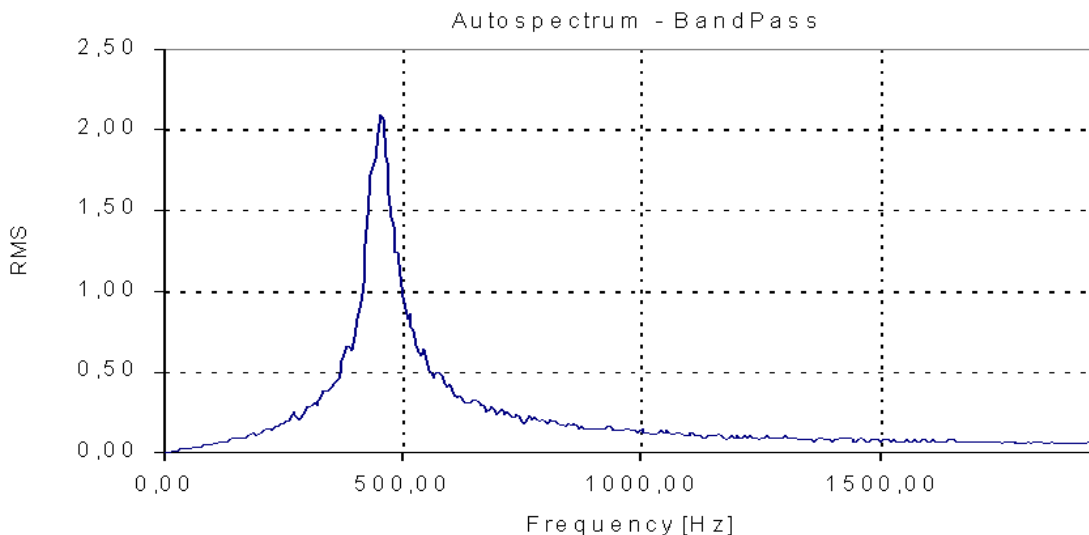
Obrázek 9 – Autospektrum pro $\xi = 0,05$



Obrázek 10 – Multispektrum pro $\xi = 0,05$

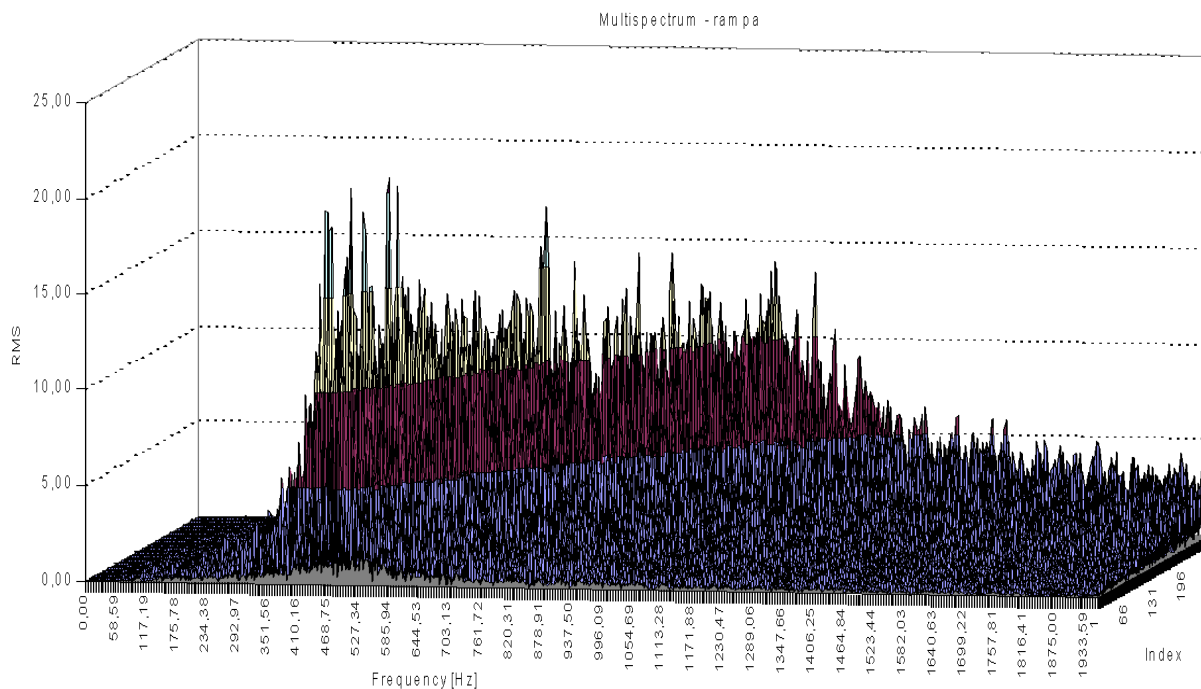
Z průběhů frekvenčních spekter je patrné, že při snižujícím se parametru poměrného tlumení filtru ζ se opravdu snižuje šířka propustného pásma filtru. Filtrovaná frekvence odpovídá zadané frekvenci. Pro testování filtru v regulačním obvodu aktivního řízení kluzných ložisek bude tedy použit parametr poměrného tlumení filtru $\zeta = 0,05$.

Dalším parametrem, který ovlivňuje vlastnosti simulace, je zesílení K . Nemá sice vliv na šířku propustného pásma ani na kvalitu filtrace, ale na svislou osu, na níž je efektivní hodnota signálu. Pokud se zesílení sníží z hodnoty 50 na hodnotu 10, projeví se to akorát na svislé ose, jak lze porovnat na obrázcích (7) a (11).



Obrázek 11 – Autospektrum pro $\zeta = 0,05$ a $K = 10$

Dále bylo třeba otestovat, zda se filtr opravdu automaticky přeladuje. Na vstup tedy místo konstantní frekvence byla přivedena rampa, která od počáteční frekvence 1000 Hz za 60 sekund simulace roste na hodnotu 2500 Hz. Frekvence, na kterou se bude ladit filtr, je tedy od 450 Hz do 1125 Hz.



Obrázek 12 – Přeladování filtru v čase

Na obrázku multispektra je patrné, že se filtr v čase opravdu přeladoval v zadaném frekvenčním pásmu.

5 Závěr

V příspěvku je popsána simulace pásmového filtru druhého řádu. Model filtru byl sestaven v softwaru MATLAB Simulink. Simulace probíhala tak, že byl na vstup filtru přiveden bílý šum, který obsahoval frekvence od 0 do 2,5 kHz. Frekvenci, na kterou se filtr ladí, lze měnit v průběhu simulace dynamicky. Kvalitu filtrace ovlivňuje poměrné tlumení filtru, které určuje šířku propustného pásma. Byly testovány tři různé parametry tlumení, přičemž nejlepší výsledek měla hodnota tlumení rovna 0,05. Naposledy byla otestována funkce automatického přeladování, kde se filtr během 60 sekund přeladil z frekvence 450 Hz na frekvenci 1125 Hz.

Filtr je určen pro zapojení do regulačního obvodu pro aktivní řízení vibrací pomocí kluzných ložisek. Algoritmus regulace je naprogramován v Simulinku a běží v signálovém procesoru dSPACE. Pásmový filtr ve zpětné vazbě by měl zpřesnit regulaci, což bude teprve testováno.

6 Použitá literatura

- [1] TŮMA, J. *Vehicle Gearbox Noise and Vibration: Measurement, Signal Analysis, Signal Processing and Noise Reduction Measures*. Wiley, Hoboken, NJ (2014), 260 pages, ISBN: 978-1-118-35941-9.
- [2] TŮMA, J. *Signal processing*, 1. vyd. Ostrava : Skripta VŠB - TU Ostrava, 2009. 156 s. ISBN 978-80-248-2114-6.
- [3] LOS, Jaroslav. *Konfigurace a monitorování testovacího stavu vysokootáčkového rotačního stroje*. Ostrava: katedra ATR-352 VŠB-TUO, 2009. 53 s. Diplomová práce, vedoucí: Škuta, J.
- [4] TŮMA, J. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. 174 pages, ISBN: 80-901936-1-7.
- [5] VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A., TŮMA, J. *Active Rotor Vibration Control, Mechanics and Control*, Volume 32, no.2. AGH University of Science and Technology 2013, pp. 77-81. ISSN 2300-7079.DOI: 10.7494/mech.2013.32.2.77


Návrh a simulace regulace 2DOF regulátorů

Design and Simulation Control with Two Degree of Freedom Controller

SLADKÁ, Karla¹ & VÍTEČKOVÁ, Miluše²

¹ Ing.,  17. Listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba  karla.sladka@vsb.cz

² Prof. Ing., CSc. & Prof. Ing., CSc., Dr.h.c.

 FS VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika,

 e-mail: miluse.viteckova@vsb.cz

Abstrakt:

Článek se zabývá seřizováním regulačních obvodů s 2DOF regulátory zejména pro regulační obvody s integrační soustavou, u kterých vzniká překmit odezvy při skokové změně polohy žádané veličiny při použití regulátorů s integrační složkou. Jsou zde uvedeny základní typy 2DOF regulátorů a jejich použití, návrh 2DOF regulátoru pomocí metody násobného dominantního pólu. Dále v článku je zpracována simulace v Matlabu, kde jsou porovnány výsledné průběhy řízeného pneumatického pohonu se standardním a 2DOF regulátorem.

Klíčová slova: regulátor, soustava, pneumatický pohon, regulace, PID, PI, 2DOF

1 Úvod

Standardní regulátory neumožňují seřízení podle žádané veličiny $w(t)$, a zároveň z hlediska poruchové veličiny $v_1(t)$ nebo $v_2(t)$, viz obr. 1 [O'DWYER, A, 2009; VÍTEČKOVÁ, M. a A. VÍTEČEK 2011].

Právě pro standardní regulátory je možné pouze kompromisní seřízení regulace, a to vůči žádané veličině $w(t)$ a poruchové veličině $v_1(t)$ nebo $v_2(t)$ [SUCHÁNEK, M, 2015]. Dokonce větší problémy u kvality regulace mohou nastat zejména v případě, že regulovaná soustava má integrační charakter a regulátor obsahuje integrační složku. V tomto případě je pak v odezvě překmit. Tento překmit lze odstranit pomocí použití regulátoru se dvěma stupni volnosti (2DOF).

Přenosy regulačního obvodu podle obr.1 jsou

$$G_{wy} = \frac{G_R G_S}{1 + G_R G_S}, \quad (1)$$

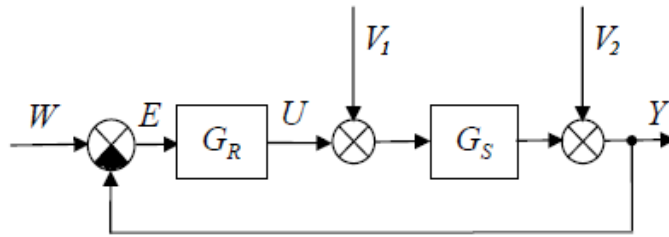
$$G_{v_1y} = \frac{G_S}{1 + G_R G_S}, \quad (2)$$

$$G_{v_2y} = \frac{1}{1 + G_R G_S}, \quad (3)$$

$$G_{we} = \frac{1}{1 + G_R G_S}, \quad (4)$$

kde G_R – přenos regulátoru, G_S – přenos soustavy, G_{wy} – přenos řízení, G_{v_1y} – přenos poruchy v_1 , G_{v_2y} – přenos poruchy v_2 , G_{we} – odchylkový přenos řízení, W – obraz žádané

veličiny, E – obraz regulační odchylky, U – obraz akčního zásahu, V_1, V_2 – obrazy odchylek a Y – obraz výstupní veličiny.



Obrázek 1 – Schéma jednoduchého regulačního obvodu

2 Regulátory se dvěma stupni volnosti

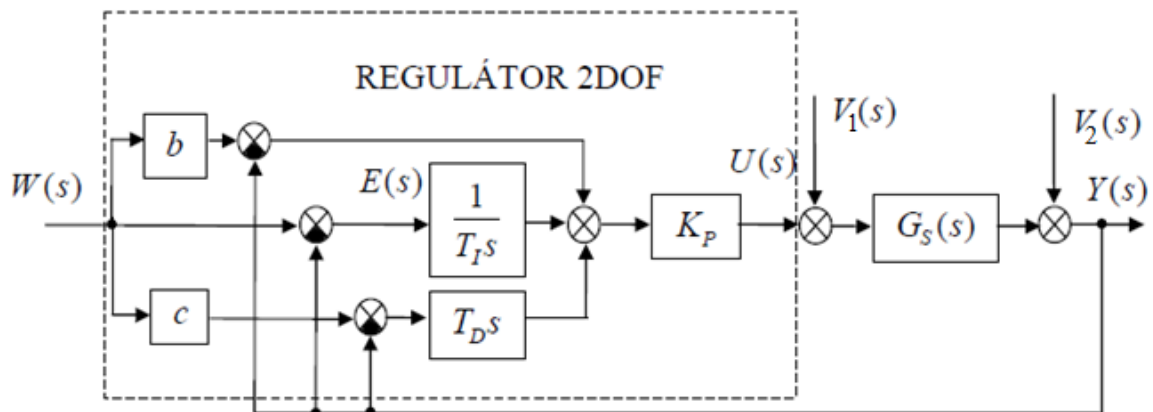
Standardní regulátor není schopen odstranit nuly v přenosu řízení, které způsobují překmit při skokové změně žádané (vstupní) veličiny. Z toho vyplývá, že ne vždy lze regulátory kompromisně seřadit. Pro tento případ regulačních obvodů je vhodné řešení použít regulátor se dvěma stupni volnosti (2DOF), který pomocí filtru odstraní nuly z čitatele a k tomu umožňuje zrychlit regulační pochod.

2.1 Základní typy

Regulátor PID 2DOF má základní tvar, popsany vztahem [VÍTEČKOVÁ, M. a A. VÍTEČEK, 2008; VÍTEČKOVÁ, M. a A. VÍTEČEK, 2011]

$$U(s) = K_p \left\{ bW(s) - Y(s) + \frac{1}{T_I s} [W(s) - Y(s)] + T_D s [cW(s) - Y(s)] \right\}, \quad (5)$$

kde b je váha žádané veličiny u proporcionální složky, c – váha žádané veličiny u derivační složky.



Obrázek 2 - Schéma regulačního obvodu s 2DOF regulátorem

Na obr. 2 je znázorněné schéma regulačního obvodu s 2DOF regulátorem podle vztahu (5), které lze upravit do tvaru

$$U(s) = K_p \left(b + \frac{1}{T_I s} + c T_D s \right) W(s) - K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) Y(s), \quad (6)$$

po zjednodušení dostaneme

$$U(s) = G_{ff}(s)W(s) - G_R(s)Y(s), \quad (7)$$

kde

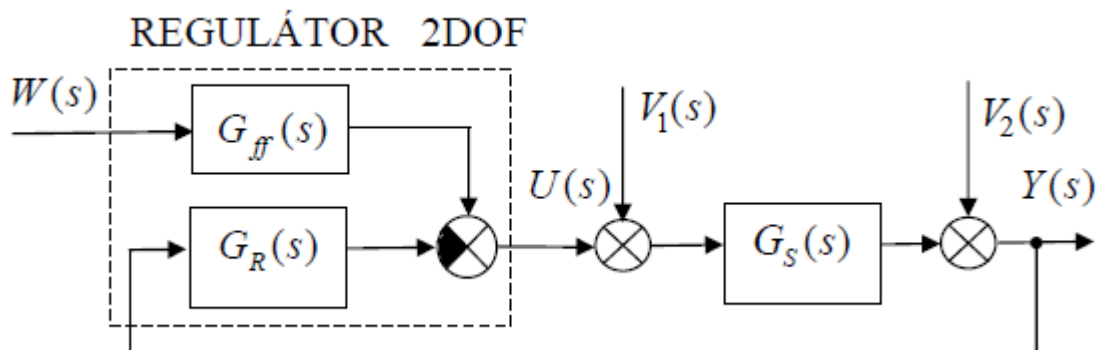
$$G_{ff}(s) = K_P \left(b + \frac{1}{T_I s} + c T_D s \right) = K_P \frac{c T_D T_I s^2 + b T_I s + 1}{T_I s}, \quad (8)$$

$$G_R(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = K_P \frac{T_D T_I s^2 + T_I s + 1}{T_I s}. \quad (9)$$

Schéma regulačního obvodu na obr. 3 odpovídá vztahu (7). Dále pak vztah (9) vyjadřuje přenos standardního regulátoru PID.

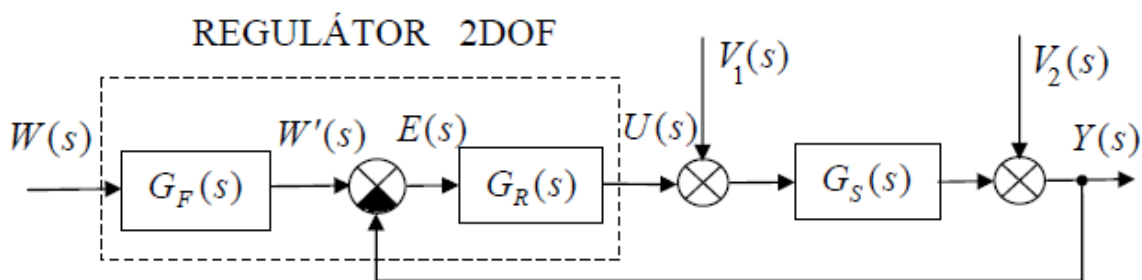
Podílem vztahů (8) a (9) dostaneme přenos vstupního filtru $G_F(s)$, který je filtrem žádané veličiny

$$G_F(s) = \frac{c T_D T_I s^2 + b T_I s + 1}{T_D T_I s^2 + T_I s + 1}. \quad (10)$$



Obrázek 3 - Schéma regulačního obvodu s 2DOF regulátorem se zapojením ve zpětné vazbě a vstupním filtrem G_{ff}

Struktura regulačního obvodu se vstupním filtrem G_F (10) je znázorněna na Obrázek 4.



Obrázek 4 - Regulační obvod s regulátorem 2DOF s přenosem vstupního filtru

2.2 Speciální případ 2DOF regulátoru

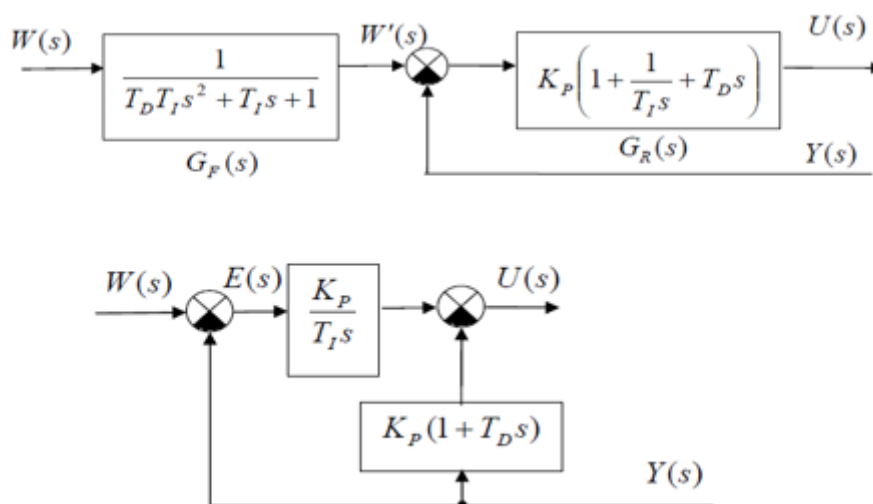
V regulátorech 2DOF jsou nejčastěji voleny váhy b a c nulové nebo jednotkové, tímto vznikají speciální případy 2DOF regulátorů.

Nejčastěji používaný případ 2DOF regulátoru je I – PD regulátor, který z regulátoru PID 2DOF vznikne dosazením váhových složek $b = 0$ a $c = 0$ do vztahu (6). Odvozená schémata regulátoru jsou znázorněna na obr. 5 a regulátor I – PD je dán vztahem

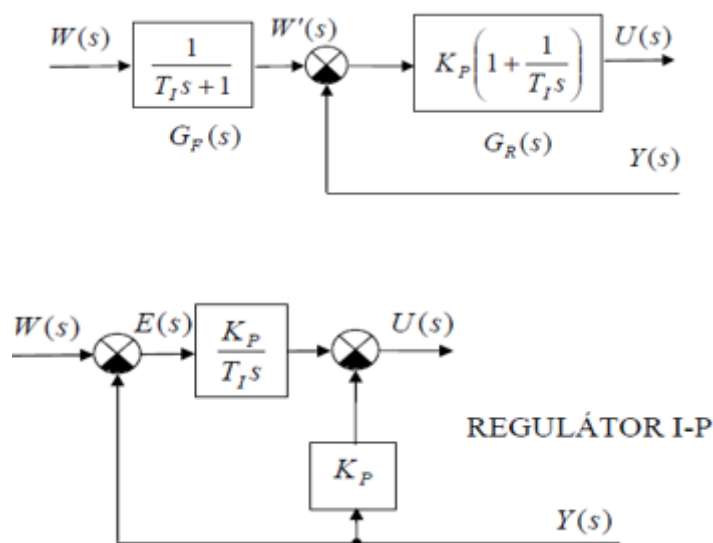
$$U(s) = K_P \frac{1}{T_I s} E(s) - K_P (1 + T_D s) Y(s). \quad (11)$$

Dalším speciálním případem je regulátor I-P, který vznikne z 2DOF PI regulátoru, a to nastavením hodnoty váhové složky $b = 0$. Odvozená schémata I-P regulátoru jsou znázorněna na obr. 6 a vztah regulátoru regulátor I-P je následující

$$U(s) = K_p \left(\frac{1}{T_I s} \right) E(s) - K_p Y(s) \quad (12)$$



Obrázek 5 - Regulátor 2DOF typ I-PD



Obrázek 6 - Regulátor I-P

3 Použití 2DOF regulátorů

V případech kdy je nutné kompromisní seřízení z hlediska žádané veličiny $w(t)$ a poruchových veličin $v_1(t)$ a $v_2(t)$, se používají 2DOF regulátory. A to z důvodu, že u klasických regulátorů vznikají velké přeskmy při skokové změně polohy žádané veličiny $w(t)$. Dále 2DOF regulátory se používají u regulačních obvodů se stupněm astatismu větších než 2 ($q \geq 2$). U klasických regulátorů, kdy obvod má $q \geq 2$, vzniká vždy přeskmit při skokové změně polohy žádané veličiny $w(t)$ a nelze jej odstranit. Přeskmy jsou způsobeny především stabilními nulami v čitateli přenosu řízení G_{wy} a ty nelze s klasickým regulátorem odstranit. U

2DOF regulátorů odstranění stabilních nul je možné vhodnou volbou vstupního filtru $G_F(s)$ s přenosem (10), tj. vhodnou volbou vah žádané veličiny b a c ve vztahu (5) a obr. 2. Pro hodnoty vah žádané veličiny $b = 0$ a $c = 0$ se tímto sníží hodnota skoku polohy žádané veličiny $w(t)$ a dochází ke snížení překmitu.

Přenos řízení se standardním regulátorem PID

$$G'_{wy}(s) = \frac{(T_D T_I s^2 + T_I s + 1)G_S(s)}{T_I s + (T_D T_I s^2 + T_I s + 1)G_S(s)} \quad (13)$$

a přenos řízení s 2DOF regulátorem s vhodnou volbou vstupního filtru $G_F(s)$ například s přenosem

$$G_F(s) = \frac{1}{T_D T_I s^2 + T_I s + 1}, \quad (14)$$

$$G_{wy}(s) = \frac{G_S(s)}{T_I s + (T_D T_I s^2 + T_I s + 1)G_S(s)}. \quad (15)$$

Když se porovná přenos řízení se standardním regulátorem s přenosem řízení s 2DOF regulátorem, lze vidět, že přidáním vstupního filtru (14) k žádané veličině, upravíme čítec přenosu, aby se odstranily stabilní nuly v čitateli. Dojde ke zpomalení odezvy a k výraznému potlačení překmitu. Právě vhodným zvolením nenulových vah b a c lze docílit rychlejší odezvy a zároveň potlačení nežádoucího překmitu.

Například, když je regulována integrační soustava s přenosem

$$G_S(s) = \frac{k_I}{s} e^{-T_d s}, \quad (16)$$

pak nelze zajistit, aby průběh regulace při skokové změně polohy žádané veličiny $w(t)$ byl bez překmitu se standardními PI a PID regulátory. Při vysokém překmitu je vhodné použít 2DOF regulátory.

4 Návrh a seřízení 2DOF regulátoru

Požaduje se nekmitavý regulační pochod pro integrační regulovanou soustavu. Součástí regulačního obvodu je integrační soustava s dopravním zpožděním. Pro seřízení regulačního obvodu je zvolena metoda násobného dominantního pólu (dále jen MNDP).

4.1 Metoda násobného dominantního pólu

MNDP je analytická metoda pro výpočet stavitelných parametrů regulátorů. Tato metoda umožňuje určit hodnoty stavitelných parametrů konvenčních regulátorů nebo regulátorů 2DOF. Metoda umožňuje výpočet regulátoru pro regulační obvod s integrační soustavou, která má dopravní zpoždění. Metoda předpokládá aperiodický regulační pochod, proto je nutné, aby byl násobný dominantní pól stabilní a reálný. Dále se předpokládá, že nedominantní póly a nuly nemají vliv na regulační pochod.

Použitím 2DOF regulátorů výsledný přenos řízení má tvar

$$G_{wy}(s) = G_F(s)G'_{wy}(s), \quad (17)$$

přenos vstupního filtru je $G_F(s)$ pro regulátor PI 2DOF

$$G_F(s) = \frac{bT_I s + 1}{T_I s + 1} \quad (18)$$

a pro regulátor PID 2DOF odpovídá vztahu (10).

Tabulka 1 - Stavitelné parametry standardních a 2DOF regulátorů [VÍTEČKOVÁ, M. a A. VÍTEČEK, 2011]

Analogový regulátor		Regulovaná soustava $\frac{k_1 e^{-T_d s}}{s}$
PI	s_3^*	$-\frac{2-\sqrt{2}}{T_d} \doteq -0,586 \frac{1}{T_d}$
	K_P^*	$\frac{2(\sqrt{2}-1)}{k_1 T_d} e^{\sqrt{2}-2} \doteq 0,461 \frac{1}{k_1 T_d}$
	T_I^*	$(3+2\sqrt{2})T_d \doteq 5,828T_d$
2DOF	b^*	$\frac{2-\sqrt{2}}{2} \doteq 0,293$
PID	s_4^*	$-\frac{3-\sqrt{3}}{T_d} \doteq -1,268 \frac{1}{T_d}$
	K_P^*	$\frac{6(2\sqrt{3}-3)}{k_1 T_d} e^{\sqrt{3}-3} \doteq 0,784 \frac{1}{k_1 T_d}$
	T_I^*	$(2+\sqrt{3})T_d \doteq 3,732T_d$
	T_D^*	$\frac{3+\sqrt{3}}{18} T_d \doteq 0,263T_d$
2DOF	b^*	$\frac{3-\sqrt{3}}{3} \doteq 0,423$
	c^*	$\frac{3-\sqrt{3}}{2} \doteq 0,634$

Pro integrační soustavu s dopravním zpožděním jsou analyticky odvozené vztahy pro výpočet stavitelných parametrů regulátorů, jak standardních, tak 2DOF regulátorů, které jsou uvedeny v tab. 1 [VÍTEČKOVÁ, M. a A. VÍTEČEK, 2011]. Přenos řízení regulačního obvodu s integrační soustavou (16) a PI regulátorem

$$G_R(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right),$$

Který je seřízen MNDP a je ve tvaru (19).

$$G'_{wy}(s) = \frac{k_1 K_P^* (T_I s + 1)}{T_I^* s^2 + k_1 K_P^* (T_I s + 1)} e^{-T_d s} \approx \frac{T_I^* s + 1}{\left(\frac{1}{|s_3^*|} s + 1 \right)^3} e^{-T_d s} \quad (19)$$

Pokud se použije regulátor PI 2DOF se vstupním filtrem (18), pak v souladu se vztahem (17) a (19) lze psát

$$G_{wy}(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = G_F(s)G'_{wy}(s) \approx \frac{bT_i^*s + 1}{\left(\frac{1}{|s_3^*|}s + 1\right)^3} e^{-T_d s}. \quad (20)$$

Váhu vstupního filtru u žádané veličiny b u proporcionální složky je možné volit tak, aby dvojiteln v čitateli přenos řízení (20) kompenzoval jeden dvojiteln ve jmenovateli. Hodnotu váhy b vypočítáme následovně

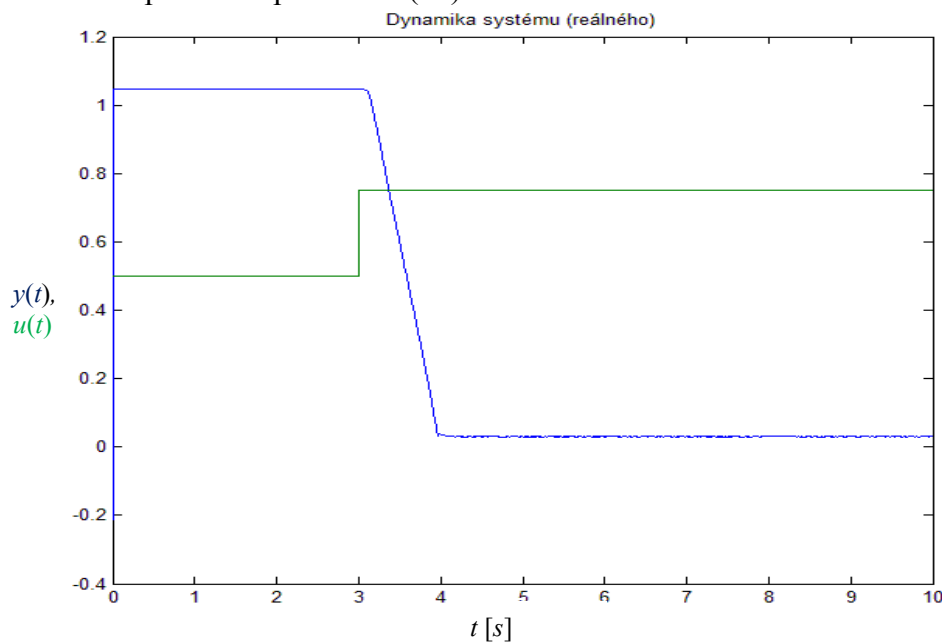
$$bT_i^*s + 1 = \frac{1}{|s_3^*|}s + 1 \Rightarrow b = \frac{1}{|s_3^*|T_i^*} = \frac{2 - \sqrt{2}}{2} \doteq 0,293. \quad (21)$$

Použitím PID 2DOF regulátoru (5) lze nalézt vhodnou volbu vah žádané veličiny b a c a kompenzovat tak dva dvojitelný. Získání vhodných vah je stejné jako u vah pro PI 2DOF regulátor. Výsledné hodnoty vah lze nalézt v tab. 1.

4.2 Příklad použití 2DOF regulátoru

Pro simulaci regulačního obvodu s 2DOF regulátorem byla vybrána integrační soustava reálného pneumatického pohonu. Přímou identifikací se vstupním skokovým signálem $u(t)$ jsou získány data popisující vlastnosti regulované soustavy [Noskiewicz, P. 1999].

Předpokládaný tvar přenosu soustavy dle metody aproximace odezev integračních členů má základní tvar s dopravním zpožděním (16).



Obrázek 7 - Dynamika reálného systému

Identifikací byly získány tyto parametry regulované soustavy:

$$T_d = 0,08 \text{ s}, k_1 = 4,8077 \text{ mV}^{-1}\text{s}^{-1}. \quad (22)$$

Výsledný přenos integrační soustavy je

$$G_S(s) = \frac{4,8077}{s} e^{-0,08s}. \quad (23)$$

V případě, že dopravní zpoždění se nahradí setrvačností, bude přenos soustavy uvažován ve tvaru

$$G_s(s) = \frac{4,8077}{(0,08s + 1)s}. \quad (24)$$

Při výpočtu stavitelných parametrů regulátoru se vychází z MNDP pro integrační soustavu viz tab. 1.

Výsledné hodnoty parametrů pro PI 2DOF regulátor po dosazení parametrů soustavy jsou následující

$$s_3^* = -\frac{0,586}{T_d} = \frac{0,586}{0,08} \doteq -7,3250 \quad (25)$$

$$K_P^* = 0,461 \frac{1}{k_1 T_d} = \frac{0,461}{4,8077 \cdot 0,08} \doteq 1,1986 \quad (26)$$

$$T_I^* = 5,828 T_d = 5,828 \cdot 0,08 \doteq 0,4662 \quad (27)$$

Pro výpočet PID regulátoru jsou parametry následující:

$$s_4^* = -\frac{1,268}{T_d} = -\frac{1,268}{0,08} \doteq -15,8500 \quad (28)$$

$$K_P^* = 0,784 \frac{1}{k_1 T_d} = \frac{0,784}{4,8077 \cdot 0,08} \doteq 2,0384 \quad (29)$$

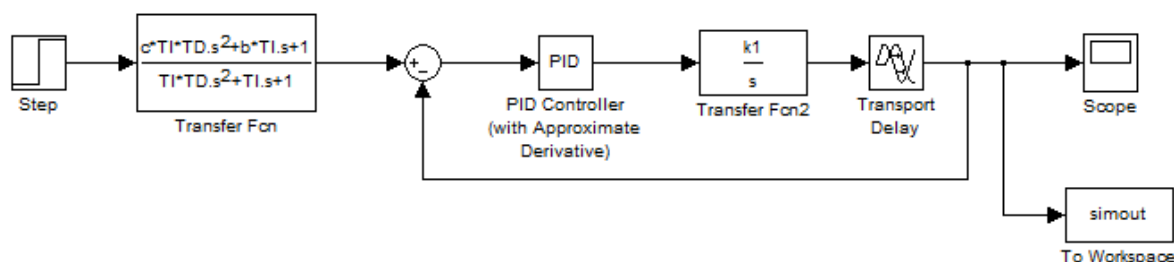
$$T_I^* = 3,732 T_d = 3,732 \cdot 0,08 \doteq 0,2986 \quad (30)$$

$$T_D^* = 0,263 T_d = 0,263 \cdot 0,08 = 0,0210 \quad (31)$$

Váhové konstanty b a c pro PI a PID 2DOF regulátor jsou uvedeny v tab. 1.

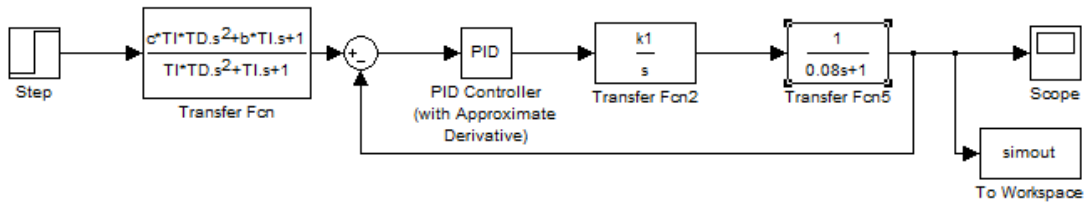
5. Simulace regulované soustavy

Aby bylo možné porovnat chování regulačního obvodu se standardním a 2DOF regulátorem s dopočítanými stavitelnými parametry PI a PID regulátoru bylo vytvořeno simulační schéma v prostředí Matlab/Simulink obr. 8. V regulačním schématu je integrační soustava s dopravním zpožděním (23). U regulačního obvodu s PI regulátorem je ve schématu derivační složka D nulová.



Obrázek 8 - Schéma regulačního obvodu s integrační soustavou s dopravním zpožděním

Pro zjištění robustnosti regulátoru 2DOF, který je seřízený metodou MNDP se provede simulace průběhu regulace pro integrační soustavu se setrvačností (24) viz obr. 9.



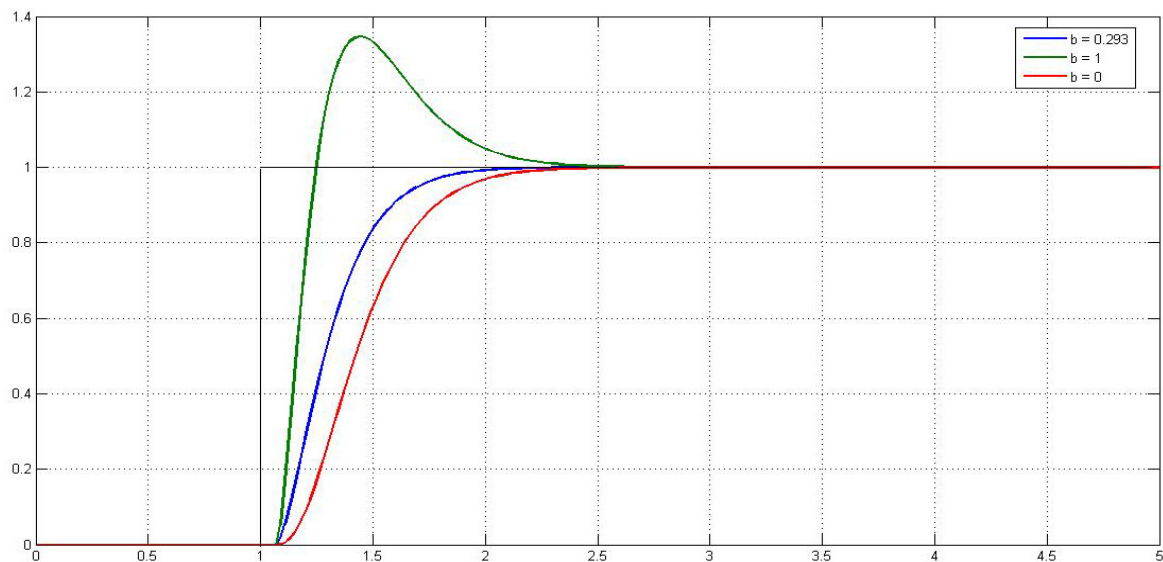
Obrázek 9 - Regulační schéma pro integrační soustavu se setrvačností

Pro porovnání výsledků simulace regulace v regulačním obvodu byly zvoleny 3 typy regulátorů. První typ je standardní regulátor. Pro standardní regulátor platí, že má váhové složky vstupního filtru $b=c=1$, čímž se vliv vstupního filtru rovná 1 a vznikne tak standardní PID regulátor. Pro regulátor PI je pouze váhová složka $b=1$. Druhý typ regulátoru je pro váhové složky vstupního filtru $b=c=0$ (pro regulátor PI je váhová složka $b=0$). Tento typ odpovídá regulátoru I-PD s přenosem (11) a schématem znázorňující obr. 5. Dojde tím k odstranění překmitu, a také k malému zmenšení doby regulace. Třetí typ regulátoru nám umožňuje potlačit překmit a zároveň mít dostatečně rychlou odezvu systému, tím že vhodným nastavením vah odstraníme člen stabilního pólu.

Doba regulace pro jednotlivé průběhy regulace pro regulátor 2DOF PI podle nastavení váhové složky vstupního filtru podle obr. 10 jsou následující (je uvažována 5% tolerance regulace):

Tabulka 2 – Doba regulace při použití PI regulátoru

Váhová konstanta b	Doba regulace [s]
$b = 0,293$	0,72
$b = 1$	0,99
$b = 0$	0,93

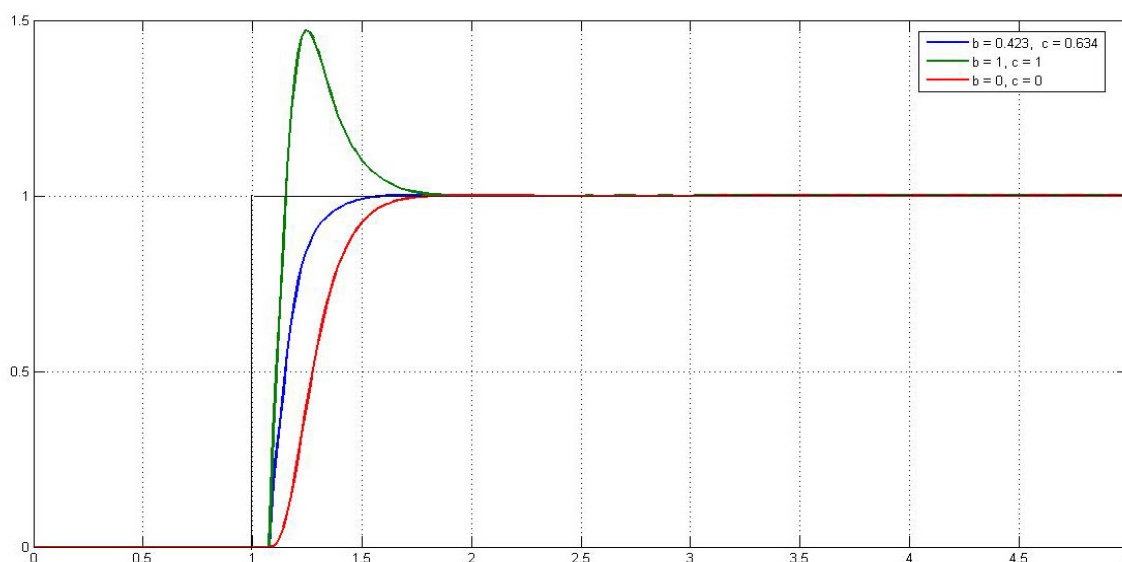


Obrázek 10 - Průběh simulace pro regulátor 2DOF PI

Doba regulace pro jednotlivé průběhy regulace pro regulátor 2DOF PID podle nastavení váhové složky vstupního filtru podle obr. 11 jsou následující:

Tabulka 3 - Doba regulace při použití PID regulátoru

Váhové konstanty b, c	Doba regulace [s]
$b = 0,423, c = 0,634$	0,36
$b = 1, c = 1$	0,59
$b = 0, c = 0$	0,54

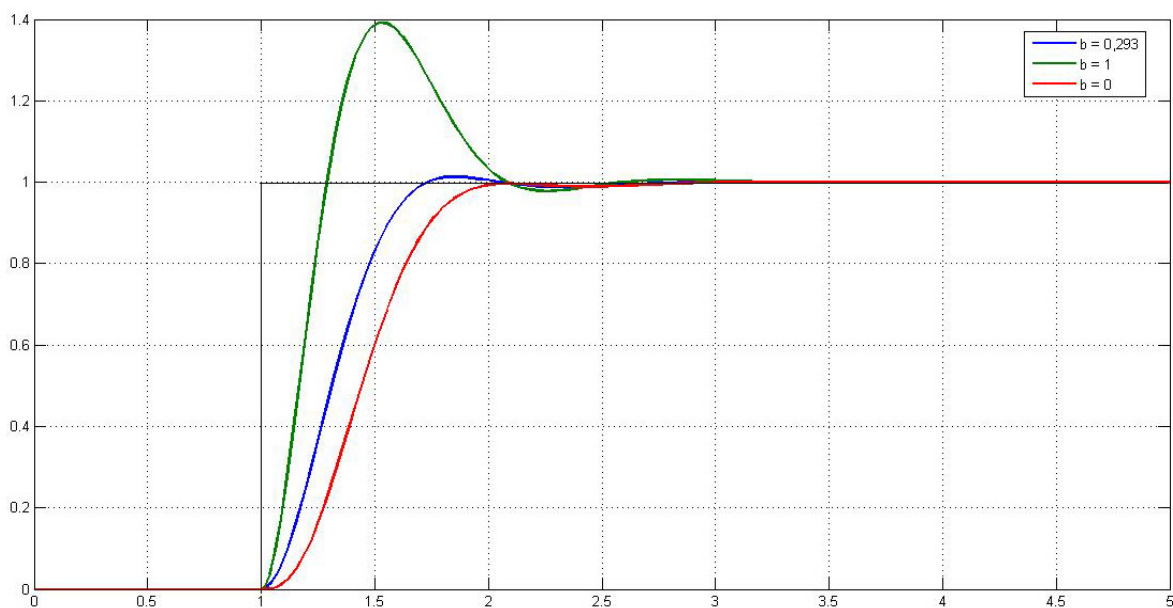


Obrázek 11- Průběh simulace pro regulátor 2DOF PID

Průběh simulace pro integrační soustavu se setrvačností 1. řádu (24), u které je použit regulátor PI 2DOF seřízený metodou MNDP s parametry (25) a (26) je na obr.12. Doba regulace je uvedena v tab.4.

Tabulka 4 - Doba regulace s uvažováním přenosu soustavy (24)

Váhové konstanty b	Doba regulace [s]
$b = 0,293,$	0,62
$b = 1,$	0,96
$b = 0$	0,82



Obrázek 12 - Průběh simulace pro regulátor 2DOF PI se soustavou se setrvačností

Z obr. 10 je zřejmé, že 2DOF regulátor PI jednoznačně potlačuje vysoký překmit způsobený skokovou změnou polohy žádané veličiny $w(t)$, oproti použití standardního regulátoru $b=1$. Dále lze vidět vliv váhy b , která upravuje rychlost odezvy. Při použití nenulových vah podle tab. 1, vidíme rychlejší odezvu než u použité hodnoty váhy $b=0$.

Z obr. 11, kde působí 2DOF regulátor PID, lze vidět podobný výsledek jako u PI z pohledu nastavení hodnot vah. Rozdíl je pouze v působení derivační složky a váhy u této složky na vstupním filtru, která regulační průběh urychluje.

Simulace průběhu regulace pro integrační soustavu se setrvačností se seřízeným 2DOF PI regulátorem pro soustavu čistě integrační s dopravním zpožděním obr. 12 dokazuje robustnost metody MNDP pro seřízení 2DOF regulátorů.

6 Závěr

V článku jsou souhrnně popsány základní typy 2DOF regulátorů a jejich nejpoužívanější případy. Dále je uvedeno použití 2DOF regulátorů na simulaci regulace u pneumatického pohonu jako integrační soustavy. Cílem simulace regulačního obvodu s 2DOF regulátorem a integrační soustavou bylo odstranit překmit odezvy při skokové změně polohy žádané veličiny. Nejrychlejší průběh regulačního pochodu, který byl bez překmitu, se podařilo docílit u regulace s optimálním nastavením hodnot vah b a c , jak pro PI, tak pro PID 2DOF regulátor. Dále bylo možné použít 2DOF PI regulátor seřízený pro soustavu integrační s dopravním zpožděním do regulačního obvodu s integrační soustavou se setrvačností místo dopravního zpoždění, kde simulace regulačního pochodu dokazuje, že metoda MNDP pro seřízení regulátorů je robustní.

7 Použitá literatura

NOSKIEVIČ, P. Modelování a identifikace systémů. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-7225-030-2.

O'DWYER, A. Handbook of PI and PID controller tuning rules. 3rd ed. Hackensack, NJ: Distributed by World Scientific Pub. c2009. ISBN 1848162421.

SUCHÁNEK, M. Srovnání metod syntézy pro řízení soustav s dopravním zpožděním. Ostrava, 2015. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce prof. Miluše Vítečková.

VÍTEČKOVÁ, M. a A. VÍTEČEK. Základy automatické regulace. Přepřac. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1924-2.

VÍTEČKOVÁ, M a A. VÍTEČEK. Vybrané metody seřizování regulátorů. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2011. ISBN 978-80-248-2503-8.

VORÁČEK, R. Automatizace a automatizační technika. Vyd. 1. Praha: Computer Press, 2000. ISBN 80-7226-247-5.

Simulácia pneumatického aktuátora využitím rôznych aproximácií statických charakteristík umelého svalu

Simulation of Pneumatic Actuator Using Different Approximations of Static Characteristics of Artificial Muscle

TÓTHOVÁ, Mária¹ & DUBJÁK, Ján²

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

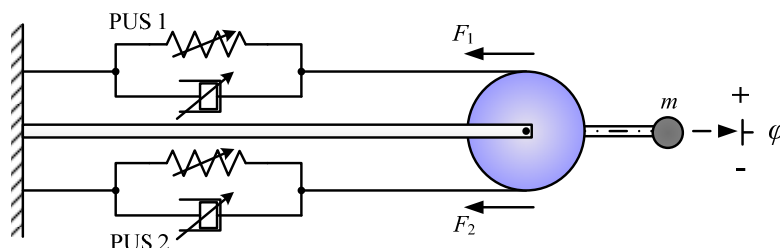
² Ing., 📧 jan.dubjak@tuke.sk

Abstrakt: Pre modelovanie a simuláciu pneumatických aktuátorov na báze umelých svalov je potrebná znalosť matematickej závislosti sily svalu na jeho kontrakcii pri rôznych tlakoch vo svaloch. Za týmto účelom boli aproximované statické charakteristiky pneumatického umelého svalu typu MAS-20-250N firmy FESTO používaného v experimentoch. V príspevku sú zobrazené simulačné výsledky pneumatického aktuátora v antagonistickom zapojení umelých svalov s využitím Hillovho modelu, v ktorom boli použité rôzne aproximácie statických charakteristík.

KLúčové slová: pneumatický aktuátor, umelý sval, modelovanie, aproximácia

1 Úvod

Vlastnosti, tvar a chovanie pneumatických umelých svalov (PUS) sú porovnateľné s ľudskými svalmi, čo umožňuje ich ľahké vzájomné prepojenie do zložitejších manipulačných mechanizmov [Pitel' a kol., 2015]. Veľmi zaujímavou vlastnosťou PUS (podobne ako u biologických) je ich schopnosť činnosti v antagonistickom zapojení, čo umožňuje regulovať ich vlastnú tuhosť/poddajnosť. Na obrázku 1 je zobrazený princíp pneumatického aktuátora na báze Hillovho modelu umelého svalu, kde dva PUS pôsobia proti sebe svojimi ťahovými silami (F_1 , F_2), ktoré sú prenášané pomocou prevodového reťazového mechanizmu. Výsledná poloha aktuátora je určená rovnováhou oboch ťahových síl a je daná uhlom (φ) ramena aktuátora so záťažou (m) [Hošovský a kol., 2012].



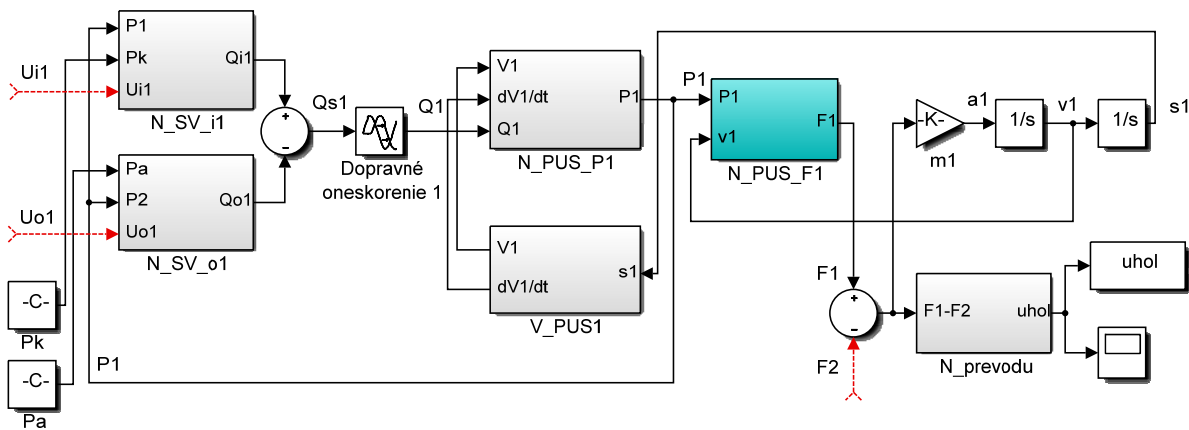
Obrázok 1 - Princíp pneumatického aktuátora s Hillovým modelom umelých svalov

Použitie PUS v praxi má množstvo výhod, z ktorých najzaujímavejšou je ich mimoriadne vysoký pomer výkonu a sily k hmotnosti a objemu. Medzi základné nevýhody ich použitia považujeme problém s polohovým riadením svalov vďaka značne nelineárnym charakteristikám a preto je potrebné modelovať tieto pohony [Pitel', 2008].

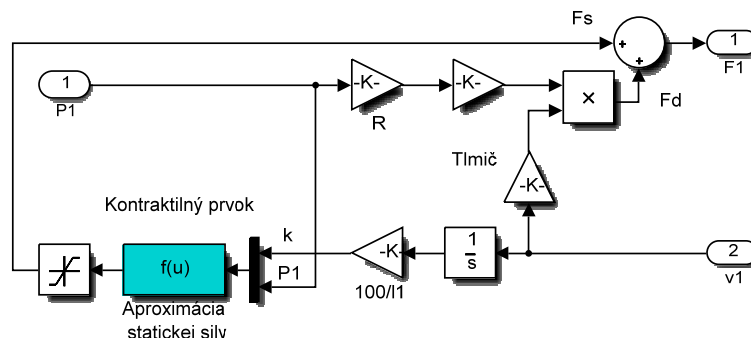
2 Modifikovaný Hillov model umelého svalu

Jedny z najjednoduchších modelov PUS sú jednoduchý a pokročilý geometrický model svalov, ktoré môžu byť relatívne ľahko použité v rámci určitého zjednodušenia pri získavaní statických a dynamických vlastností umelého svalu. Matematické vzťahy popisujúce závislosť medzi veličinami závisia od geometrických charakteristík daných svalov a fyzikálnych javov prebiehajúcich vo vnútri svalu [Piteľ a Balara, 2009]. Trojprvkový elastický Hillov model je jedným z najstarších modelov umelých svalov, ktorý využíva inžiniersky prístup k tvorbe modelu; presne a jednoducho popisuje fyzikálne vlastnosti umelého svalu [Hošovský a Havran, 2011].

Dynamický simulačný model pneumatického aktuátora na báze modifikovaného Hillovho modelu umelého svalu, podľa ktorého je sval reprezentovaný ako paralelné zapojenie nelineárnej pružiny a nelineárneho tlmiča (obrázok 1) bol vytvorený v programovom prostredí Matlab/Simulink. Obrázok 2 znázorňuje model jedného PUS, v ktorom subsystém „N_PUS_F1“ predstavuje nelinearitu sily svalu (obrázok 3), kde PUS vytvára dva druhy síl, a to aktívnu F_s a pasívnu F_d , ktorých súčet tvorí výslednú silu svalu. Vstupom do subsystému je rýchlosť prúdenia vzduchu vo svale a tlak vo svale, výstupom je sila svalu.



Obrázok 2 - Model jedného PUS na báze modifikovaného Hillovho modelu



Obrázok 3 - Subsystém nelinearity sily svalu

Podľa druhého Newtonovho zákona je možné modifikovaný Hillov model popísať pomocou nelineárnej diferenciálnej rovnice [Hošovský a Havran, 2012]:

$$\ddot{y} = \frac{1}{m} [F_E - F_s(\kappa, P) - F_d(\dot{\kappa}, P)], \quad (1)$$

kde y – posunutie svalu [m],
 m – hmotnosť ťahaná svalom [kg],
 F_E – vonkajšia sila pôsobiaca proti sile vyvinutej svalom [N],

$F_s(\kappa, P)$ – sila pružiny [N],

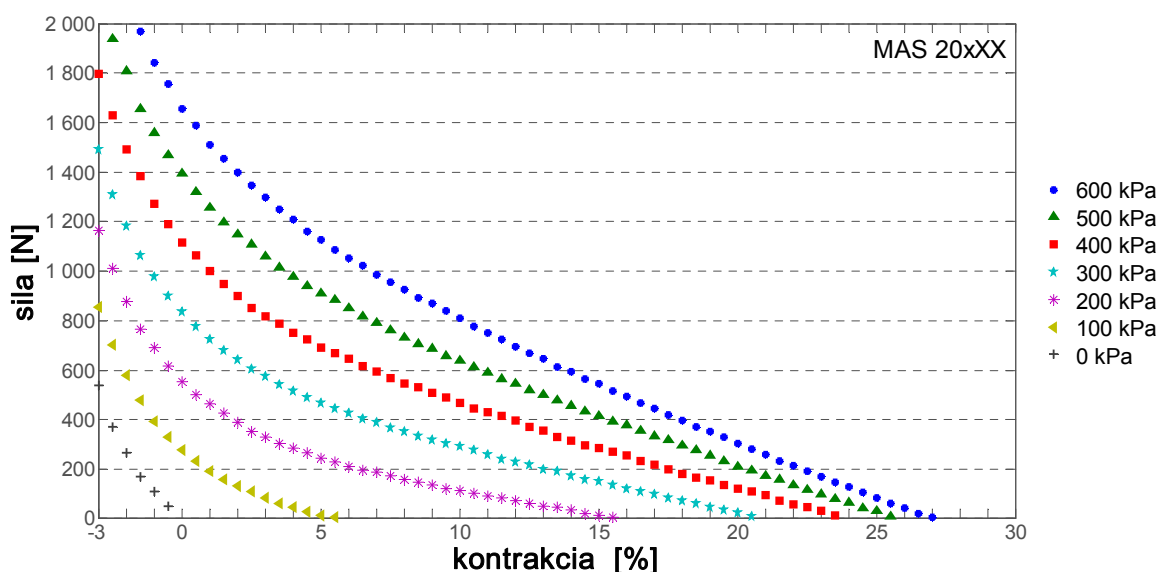
$F_d(\dot{\kappa}, P)$ – sila tlmiča [N],

P – absolútny tlak vo svali [Pa],

κ – kontrakcia [-] (definovaná ako $\kappa = \kappa_0 + \frac{y}{l_0}$, kde κ_0 – počiatočná kontrakcia a l_0 – počiatočná dĺžka svalu),

$\dot{\kappa}$ – rýchlosť svalu vyjadrená cez kontrakciu [s^{-1}].

V prípade antagonistického zapojenia predstavuje člen F_E silu proti pôsobiaceho svalu, pričom touto silou môže byť tiažová sila závažia, alebo trecia sila. Oba členy F_s aj F_d závisia nelineárne od tlaku vo svali (a od kontrakcie resp. rýchlosti pohybu svalu). Člen F_s odpovedá závislosti na obrázku 4, z ktorej vyplýva, že sila PUS je funkciou dvoch premenných – kontrakcie svalu a tlaku vo svali.



Obrázok 4 - Statické charakteristiky PUS typu FESTO MAS 20-20xXX [Festo, 2016]

Člen F_d závisí okrem koeficientu tlmenia aj od tlaku vo svali. Tento člen je teda tiež nelineárny:

$$F_d(\dot{\kappa}, P) = R \cdot P \cdot \dot{\kappa}, \quad (2)$$

kde R – koeficient tlmenia [m^2s],

$\dot{\kappa}$ – rýchlosť svalu vyjadrená cez kontrakciu [s^{-1}],

P – absolútny tlak vo svali [Pa].

3 Aproximácia statických charakteristík PUS

Statické charakteristiky PUS reprezentujú závislosť sily svalu na jeho kontrakcii pri rôznych tlakoch vo svaloch (obrázok 4). Pre praktické použitie je rozsah kontrakcie tohto typu svalu ohraničený zdola 0 % a zhora cca 25 %. Pri nižších kontrakciách je hodnota sily už veľmi vysoká a spôsobuje nadmerne zaťaženie materiálov svalu. Pri vyšších kontrakciách je pokles generovanej sily už veľmi veľký, hoci teoreticky kontrakcia svalu by mohla dosiahnuť hodnotu až okolo 50 %. Z obrázka 4 vyplýva, že umelý sval typu FESTO MAS 20-20xXX môže pri tlaku 600 kPa vyvinúť silu o veľkosti až 2000 N. V ďalšom boli aproximované statické charakteristiky tohto typu svalu použitím programu Matlab Curve Fitting Toolbox. Pre porovnanie boli vykonané aproximácie využitím štyroch rôznych prístupov.

Na základe fyzikálnych zákonov (zákona zachovania energie, Bernoulliho rovnici, atď.) a geometrických parametrov svalu (polomer, uhol vlákien) bol odvodený vzťah pre silu svalu. Následne bol doplnený člen $\varepsilon(P)$, ktorý popisuje trenie medzi jednotlivými vláknami a medzi opletením a trubicou a člen $\mu(\kappa)$, aby bolo možné získať korektné aproximácie aj pre menšie hodnoty tlaku. Výsledný vzťah má tvar [Boržíková, 2008]:

$$\begin{aligned} F(\kappa, p) &= \mu(\kappa) \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot p \cdot (a \cdot (1 - \varepsilon(p) \cdot \kappa)^2 - b) = \\ &= (a_\kappa \cdot e^{-\kappa \cdot c_\kappa} - b_\kappa) \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot p \cdot (a \cdot (1 - a_\varepsilon \cdot e^{-p} \cdot \kappa - b_\varepsilon \cdot \kappa)^2 - b) \quad [\text{N}] \end{aligned} \quad (3)$$

kde p – tlak vo svale,
 κ – kontrakcia svalu,
 α_0 – počiatkový uhol medzi osou svalu a vláknami.

Neznáme koeficienty a_ε , b_ε , a_κ , b_κ , c_κ boli vypočítané použitím Matlab Curve Fitting Toolbox [Tóthová a kol., 2015]. Hodnoty $a = \frac{3}{\tan^2 \alpha_0} [-]$, $b = \frac{1}{\sin^2 \alpha_0} [-]$ závisia od parametrov daného PUS (pre náš typ PUS: $a = 5,4$, $b = 2,8$).

Celkovú silu svalu, ako funkciu $F(\kappa, P)$ závislú na kontrakcii svalu pre rôzne hodnoty tlakov vo svale je možné vyjadriť pomocou maximálnej sily svalu F_{max} nasledovne:

$$F(\kappa, p) = F_{max}(\kappa) - (p_{max} - p) \cdot \left(\frac{a_0 - a_1 \kappa}{a_2} \right) \quad [\text{N}], \quad (4)$$

kde p_{max} – maximálny tlak,
 p – tlak vo svale,
 κ – kontrakcia svalu,
 a_0 [N], a_1 [N·m⁻¹], a_2 [Pa] – neznáme koeficienty, ktoré boli vypočítané použitím Matlab Curve Fitting Toolbox [Tóthová a kol., 2015].

Potom maximálna sila svalu F_{max} môže byť vyjadrená polynómom štvrtého stupňa pri maximálnom tlaku $p_{max} = 600$ kPa:

$$F_{max}(\kappa) = b_0 + b_1 \kappa + b_2 \kappa^2 + b_3 \kappa^3 + b_4 \kappa^4 \quad [\text{N}], \quad (5)$$

kde κ – kontrakcia svalu,
 b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – neznáme koeficienty, ktoré boli vypočítané použitím Matlab Curve Fitting Toolbox [Tóthová a kol., 2015].

Závislosť sily svalu $F(\kappa, P)$ od kontrakcie svalu pri konštantnom tlaku vo svale je možné s dobrou presnosťou aproximovať aj exponenciálnou funkciou so šiestimi neznámymi koeficientmi v tvare [Sárosi, 2012]:

$$F(\kappa, p) = (a_1 \cdot p + a_2) \cdot e^{a_3 \cdot \kappa} + a_4 \cdot \kappa \cdot p + a_5 \cdot p + a_6 \quad [\text{N}], \quad (6)$$

kde κ – kontrakcia svalu,
 p – tlak vo svale,
 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – neznáme koeficienty, ktoré boli vypočítané použitím Matlab Curve Fitting Toolbox [Tóthová a kol., 2015].

Štvrtá metóda aproximácie statických charakteristík na obrázku 4 je aproximácia polynomickou funkciou. V tomto prípade je na dosiahnutie čo najlepšej aproximácie týchto charakteristík zvolený polynóm piateho stupňa s dvadsaťjeden koeficientmi:

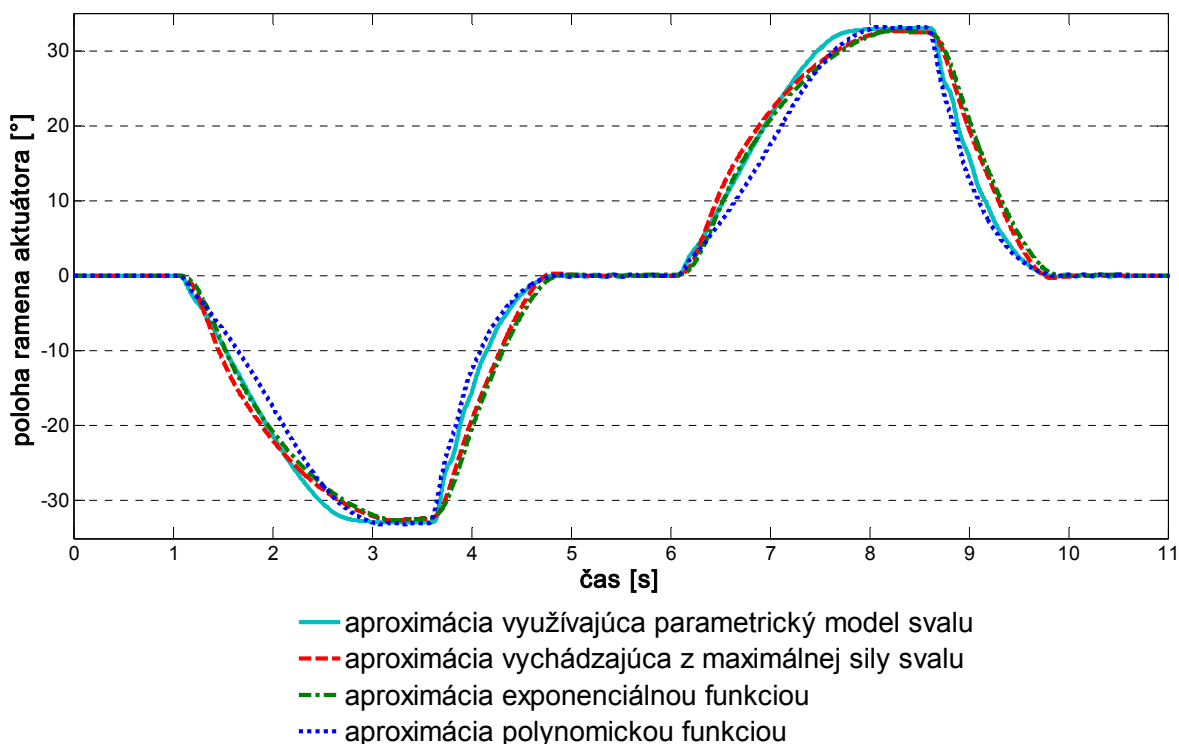
$$\begin{aligned}
F(\kappa, p) = & a_{00} + a_{10} \cdot \kappa + a_{01} \cdot p + a_{20} \cdot \kappa^2 + a_{11} \cdot \kappa \cdot p + a_{02} \cdot p^2 + a_{30} \cdot \kappa^3 + \\
& a_{21} \cdot \kappa^2 \cdot p + a_{12} \cdot \kappa \cdot p^2 + a_{03} \cdot p^3 + a_{40} \cdot \kappa^4 + a_{31} \cdot \kappa^3 \cdot p + a_{22} \cdot \kappa^2 \cdot p^2 + \\
& + a_{13} \cdot \kappa \cdot p^3 + a_{04} \cdot p^4 + a_{50} \cdot \kappa^5 + a_{41} \cdot \kappa^4 \cdot p + a_{32} \cdot \kappa^3 \cdot p^2 + a_{23} \cdot \kappa^2 \cdot p^3 + \\
& + a_{14} \cdot \kappa \cdot p^4 + a_{05} \cdot p^5 \text{ [N]},
\end{aligned}
\tag{7}$$

kde κ – kontrakcia svalu,
 p – tlak vo svali.

Hodnoty ostatných koeficientov zo (7) boli vypočítané použitím Matlab Curve Fitting Toolbox [Tóthová a kol., 2015].

4 Simulačné výsledky

Simulácie boli vykonané na simulačnom modeli pneumatického aktuátora na báze Hillovho modelu umelého svala vytvoreného na základe obrázka 2. Pre porovnanie boli do bloku „Aproximácia statickej sily“ (obrázok 3) postupne vložené závislosti pre štyri aproximácie statických charakteristík F_s umelých svalov typu MAS-20-250N firmy FESTO uvedené vyššie. Výsledky simulácií zmeny polohy ramena aktuátora pre rôzne aproximácie statických charakteristík umelých svalov sú zobrazené na obrázku 5. Priebeh získaný aproximáciou využívajúcou parametrický model svalu bol vytvorený na základe (3); priebeh získaný aproximáciou vychádzajúcou z maximálnej sily svalu bol vytvorený na základe (4) a (5); priebeh získaný aproximáciou exponenciálnej funkcie bol vytvorený na základe (6) a priebeh získaný aproximáciou polynomickej funkcie bol vytvorený na základe (7). Z priebehov je možné vidieť, že rozdiel nastáva v dynamických stavoch pri napúšťaní a vypúšťaní vzduchu do a zo svalu, pričom v ustálenom stave poloha ramena aktuátora dosahuje približne rovnakú hodnotu.



Obrázok 5 – Simulované priebehy pneumatického aktuátora pre štyri rôzne aproximácie statických charakteristík umelých svalov

5 Záver

V príspevku boli prezentované simulované dynamické priebehy pneumatického aktuátora na báze Hillovho modelu umelého svalu získané simuláciou jeho dynamického modelu v prostredí Matlab/Simulink využitím štyroch rôznych aproximácií statických charakteristík umelého svalu typu MAS-20-250N firmy FESTO. Prezentované priebehy sú značne nelineárne, čo kladie vysoké nároky na algoritmy riadenia takéhoto aktuátora. Z porovnania tiež vyplýva, že prístup k tvorbe jednotlivých aproximácií statických charakteristík umelého svalu bol správny.

Príspevok bol vypracovaný s finančnou podporou projektu VEGA 1/0822/16 „Výskum inteligentného manipulačného zariadenia na báze pneumatických umelých svalov s tromi stupňami voľnosti“.

6 Použitá literatúra

BORŽÍKOVÁ, J. Nelineárne aproximácie statickej charakteristiky $F=f(p,k)$ antagonistického systému. In: *Zborník príspevkov ARTEP 2008*, Stará Lesná, február 20-22, 2008, Košice: SJF TU v Košiciach, 2008, s. 4-1 – 5. ISBN 978-80-8073-981-2

HOŠOVSKÝ, A., HAVRAN, M. Dynamic Modeling of One Degree of Freedom Pneumatic Muscle-based Actuator for Industrial Applications, *Tehnicki Vjesnik*, Vol. 3/19, 2012, pp. 673–681. ISSN 1330-3651

HOŠOVSKÝ, A., HAVRAN, M. Hill's Muscle Model-based Modeling of Pneumatic Artificial Muscle. In: *Annals of DAAAM for 2011*, November 23-26, 2011, Vienna: DAAAM International, 2011, pp. 1005-1006. ISBN 978-3-901509-83-4

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, pp. 1-11. ISSN 1729-8806

PITEĽ, J. Modelling of the PAM Based Antagonistic Actuator. *Cybernetic Letters*. Vol. 6, 2008, pp. 1-4. ISSN 1802-3525

PITEĽ, J., BALARA, M. Pneumatický umelý sval perspektívny prvok mechatroniky (3). *AT&P Journal*. Roč. 16, č. 2, 2009, s. 77-79. ISSN 1335-2237

PITEĽ, J., LÍŠKA, O., JANÁČOVÁ, D., CHARVÁTOVÁ, H. Pneumatic Muscle Actuator for Industrial Robotic Applications. In: *2nd International Conference on Sensors and Materials Manufacturing Science (ICSMMS 2015)*, January 17-18, 2015, Paris, pp. 1-5.


TÓTHOVÁ, M., PITEĽ, J., HOŠOVSKÝ, A., SÁROSI, J. Numerical Approximation of Static Characteristics of McKibben Pneumatic Artificial Muscle. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. Vol. 9, 2015, pp. 228-233. ISSN 1998-0159


SÁROSI, J. New approximation Algorithm for the Force of Fluidic Muscles. In: *Proceeding 7th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2012)*, May 24-26, 2012, Timisoara: IEEE, 2012, pp. 229-233. ISBN 978-1-4673-1013-0

Fluidic muscles DMSP-.../MAS-... [online] [cit. 2016-03-27] Available at: https://www.festo.com/cat/en-us_us/data/doc_enus/PDF/US/DMSP-MAS_ENUS.PDF.

Development and Testing of Algorithm for EEMUA 191

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

Abstract: *This article deals with development and testing of a newly designed tool for engineering work during commissioning of control systems in process industries. The control systems are very sophisticated software and hardware solutions, which require engineering tools for administration of large amounts of data and the knowledge of engineers corresponding not only to the production processes, but also to events and alarms received at a certain period of time by an operator of the process workstation. An analysis of received events and a better understanding of a process at the level of human - machine interface of the control system brings a feedback to a knowledge cycle and new knowledge, which can be built in and implemented into configuration and settings of a control system. By automating this process the data processing becomes faster and highly effective. This newly created tool extends the possibilities of the control system settings and its testing before its implementation in a real time process.*

Keywords: *development, testing, .NET, algorithm, research*

1 Introduction to software tools used in automation projects

Consistency, reliability, availability and lower costs are the main goals of all automation system users. The key to achieving these goals is the ability to reuse knowledge or “best practice solutions” across multiple projects or organizations. Systems provide a scalable, modular framework, in which applications can be easily built from a comprehensive library of standard reusable components without having to be “re-engineered”. In this way the tools address the largest single cost element of most of today's industrial automation projects - and that element is software.

Engineers use several software tools, which ease and enhance the project implementation. Especially when straightforward routines cannot be applied, these tools provide a user-friendly and easy-to-use approach for the selection, commissioning and use of equipment.

Tools and the integrated software suite for machine builders and system integrators wanting to automate their machines and systems in a productive way combine the tools required for configuring, programming, debugging and maintaining automation projects from a common intuitive interface.

Engineering tools can also be used by operators for checking recent system and process events. For example, where the protection equipment has tripped and what the conditions were that caused the tripping. The tool we are introducing in this contribution is an engineering tool designed for helping application engineers to analyse the alarm control system settings.

2 Alarm system settings for process control

Alarm system capabilities of the control system allow us to evaluate the operation of a controlled process or a control system from several points of view [URBAN, P., 2015c]. The control system functions provide the alarm processing and alarm display functionalities at the operator workstation. The function of alarm systems is prescribed and its design is recommended mainly by ISA 18.2 [ANSI/ISA, 2009] and EEMUA 191 [EEMUA, 2014] standards. Together with the definition for specific process areas these standards also set the average number of alarms per day, and the maximum number of received alarms per 10 minute period by each operator workstation.

From the EEMUA 191 standard these alarm performance parameters for the 10 minute period of a real time process represent:

- Average alarm intensity
- Maximum alarm intensity
- Percentage of alarm intensity beyond reasonable target.

Having these parameters defined and standardized in a process industry it is possible to analyze data logs in several ways, for example looking at the problems occurring during implementing control systems into operation and during the FAT (Functional Acceptance Test), the acceptance testing conducted at the site to determine if the requirements of a specification or contract are met, which involve performance tests. By collecting data from the control system during this phase of a project, the commissioning engineers realize that the same data logs indicate and provide much more information about the real time operation.

After data acquisition from the technology system structured according to ISA95 [LANDRYOVÁ, L., OSADNÍK, P., 2008] we use created log files that contain items that hold information about each triggered alarm. The Figure 1 shows individual parameters of specific equipment, on which alarm settings are configured for process control and the analyzed information from the log files can be divided accordingly:

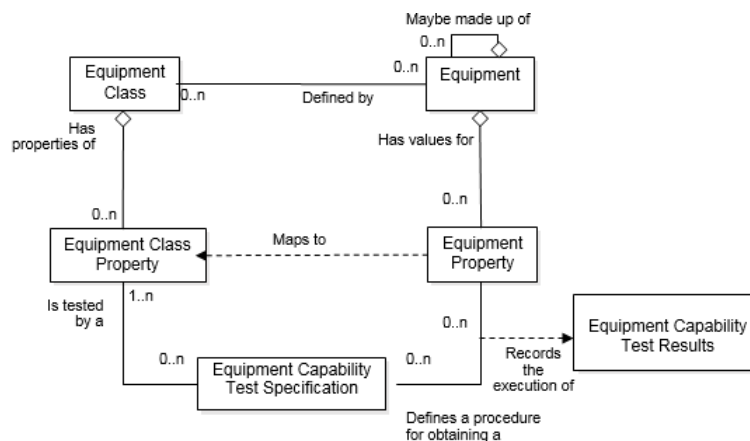


Figure 1 – Model equipment by ISA 95

- *Element information* – the main information is the name of the element that caused the alarm with additional information about the technology it is connected to and its description entered by the operator (it may not always be given in proper English language, sometimes the description can even be in operators slang). [MESA, 2013]
- *Alarm information* – is the source of data reading information about the alarm for each element. Data includes combinations comprising a description of an event, conditions for display, reason of alarm. [MESA, 2013]
- *Display information* – there are options for which control systems save such information for each technology. One option is by implementing a counter showing the number of displays for each alarm labeled by the last counter reset date, other option is to show the date of an event display. [MESA, 2013]

3 Design and development of the algorithm

For the performance analysis of alarm systems data logs structured in exported files are restructured according to the time periods defined by EEMUA 191, which will include the names of alarm conditions along with the number of displays in the time periods.

The data logs analyzed in this work consist of 500 entries, which vary in time for the first and last alarm. From δ_t time difference the equivalent of 1595[min] is used for the specification of the number of time slots – 160 - needed for 10 minute time intervals. The manual restructuring of daily entries of data logs can be quite time consuming and a boring activity leading to human errors.

$$\delta_t = t_{\text{Alarm}(n)} - t_{\text{Alarm}(1)} = \{1 \text{ day}, 2 \text{ hour}, 35 \text{ minute}\} \quad (1)$$

For this reason a tool is proposed and designed to automate the analyses structured into time intervals. The tool is built on the .Net framework with a working cycle for one analysis shown in Figure 3.

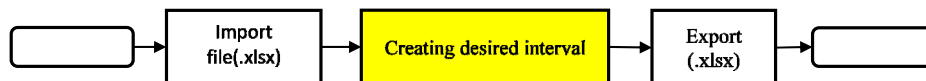


Figure 2 One working cycle for time period creation

The data log is stored in a worksheet with *file_name.xlsx* for further upload/ export. The data structure in the form of a matrix, is downloaded from a worksheet, where the size of a row vector indicates the number of parameters for the element, and the size of a column vector indicates the number of entries in a data log. We have the data structure in a universal format, in which the line parameters are defined as text strings, and for the following steps they will be mapped into a list of line objects consisting of these parameters:

```

„public class ObjectModel
{
    public string ObjectName { get; set; }      /*element name*/
    public string Condition { get; set; }     /*condition triggering the event*/
    public string Message { get; set; }      /*message to an operator*/
    public DateTime Time { get; set; }      /*event display time*/
}“
  
```

From the structure list of *object models* the not duplicated list of conditions causing events is created. The list will be further used for counting the different displays of given conditions triggering the events. Producing time periods at the beginning of its algorithm takes the condition from the not duplicated list, for which the time period is calculated. An algorithm continues by reading *sTime* for the first displayed event followed by comparing the time difference *dTime* between the times for displaying each object from the list and the first object. If the result of the time difference *dTime* is bigger than 10 minutes, then *sTime* decreases by 10 minutes.

By decreasing *dTime* under 10 minutes the algorithm browses other events. An algorithm adds individual events in intervals and when *dTime* is over, it calculates a number for the given initial condition and adds the results into the list. This is repeated for all initial conditions.

4 Testing the speed of data processing

For the speed testing of one working cycle, shown in Figure 2, the *Stopwatch* .Net Framework tool was used, which provides a set of methods and properties to measure elapsed time accurately. The measurement was done on the hardware specified in Table 1, [Notebook ThinkPad T530, 2013], [ACER ICONIA W700-6465 REVIEW,2013]

The measurement was repeated for number of alarm logs processed by the tool, and different power supply schemes of the systems. The results are shown in Figures 3 and 4.

Table 1. Hardware parameters of test systems

	Lenovo T530	Acer Iconia W701
Processor	Intel Core i7 3720QM, 2.6Ghz	Intel Core i5 3427U, 2.8 GHz
Ram	16GB, 1600Mhz	4GB, 1333Mhz
HDD(R-W)	256 GB, 555 MB/s - 500MB/s	128GB, 500 MB/s – 250 MB/s



Figure 3 Power supply scheme 1 for both systems

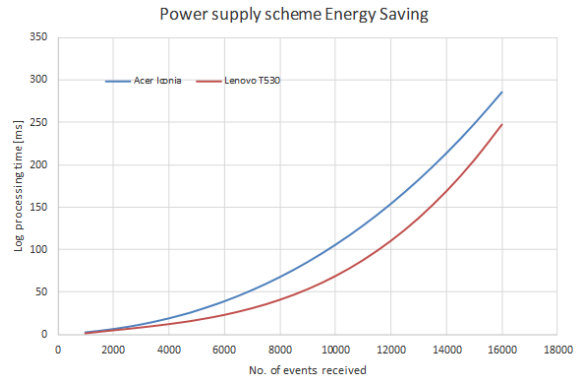


Figure 4 Power supply scheme 2 for both systems

5 Conclusions

This contribution deals with development of control system operator tools used for the processing of large amounts of alarms and events according to ISA 18.2 and EEMUA 191 standards. Underestimating the development phase in alarm management of a control system can lead to events such as the 1994 explosion at Texaco's Milford Haven refinery, where the operators had to deal with the recognition, acknowledgement and responses to 275 alarms during 11 minutes.

Alarm logs acquired in real time operation shown issues about effectiveness and speed of data processing in alarm management modules of control systems. To increase the effectiveness a tool was developed for analyzing logs and their intervals defined by EEMUA 191 standard. The methods and tools of .NET Framework were used to test the developed tool and its accuracy for the elapsed time.

The results show that the algorithm can be further developed and optimized for other hardware configurations of testing systems.

6 Acknowledgment

This paper was prepared within the project No: SP 2016/84 - "Autonomous Systems Control and Modern Methods of Diagnostic of the Machines" funded by the Ministry of Education, Youth and Sports.

7 References

ACER ICONIA W700-6465 REVIEW [online]. 2013 [cit. 2016-03-20]. Available from: <http://www.maximumpc.com/acer-iconia-w700-6465-review/>

Alarm Management Standards – Are You Taking Them Seriously? [online]. 2011 [cit. 2015-12-30]. Available from: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/whitepapers/honeywell-alarm-manager-alarm-management-standards-taken-seriously-wp817.pdf>

ANSI/ISA–18.2–2009 Management of Alarm Systems for the Process Industries . Triangle Park, North Carolina 27709: ISA. ISBN 8-1-936007-19-6.

EEMUA. Publication 191 Alarm systems - a guide to design, management and procurement. [online]. [cit. 2014-12-01]. Available from: <http://http://www.eemua.org/Products/Publications/Print/EEMUA-Publication-191.aspx>.

ISA 18.2 – Řízení alarmů. <http://www.mescentrum.cz/kontakty/79-mes/clanky/standardy/112-isa-18-2-rizeni-alarmu> [online]. 2013 [cit. 2015-12-30].

LANDRYOVÁ, L., OSADNÍK, P. Object-Oriented Approach to Development of MES Applications. In XXXIII. Seminary ASR '2008 "Instruments and Control". Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 25. 4. 2008, s. 159 –162. ISBN 978-80-248-1727-9.

MESA, International. Business To Manufacturing Markup Language [online]. 2013 [cit. 2015-12-30]. J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-73.

Notebook ThinkPad T530 [online]. 2013 [cit. 2016-03-20]. Available from: <http://shop.lenovo.com/cz/cs/laptops/thinkpad/t-series/t530/>

RODNEY, A. Martin. Optimal Prediction, Alarm, and Control in Buildings Using Thermal Sensation Complaints. PhD thesis, University of California, Berkeley, September 2004.

URBAN, P. a L. LANDRYOVA. Alarm Processing Analyses Using SPC Tools Based on Real-time Data Acquired from a Control System. In: 16th Carpathian Control Conference (ICCC), 2015b. s. 3. ISBN 978-1-4799-7369-9.

URBAN, P. a L. LANDRYOVA. Process Knowledge Building an Optimized Alarm System. In: 16th Carpathian Control Conference (ICCC), 2015c. s. 4. ISBN 978-1-4799-7369-9.

Application Monte Carlo Method in the Evaluation of Telescopic Rod Tricept

VAJSÁBEL, Michal¹, JAVORSKÁ, Alexandra², KUREKOVÁ, Eva³

¹ Ing., ✉ STU in Bratislava, Faculty of Mechanical Engineering, Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava SR, 💻 michal.vajsabel@stuba.sk, 🌐 URL address homepage www.sjf.stuba.sk

² Ing., ✉ STU in Bratislava, Faculty of Mechanical Engineering, Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava SR, 💻 e-mail alexandra.javorska@stuba.sk, 🌐 URL address homepage www.sjf.stuba.sk

³ doc. Ing. PhD. ✉ STU in Bratislava, Faculty of Mechanical Engineering, Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava SR, 💻 e-mail eva.kurekova@stuba.sk, 🌐 URL address homepage www.sjf.stuba.sk

Abstract: *The article deals with evaluation procedure in the extension of telescopic rod Tricept. This procedure consists of generating pseudo - random numbers and their evaluation, determination of probability distribution, calculating of deviation function coefficients, measurement uncertainty estimation and determination of confidence interval for 95% coverage probability.*

Keywords: *Tricept, Monte Carlo method, deviation function, measurement uncertainty*

1 Introduction

In examining evaluated processes that are subject to random influences, there is an option for examination, and that is processes and systems simulation. In these simulations, the possibility of Monte Carlo method application, which generates pseudo-random numbers with known probability distribution of input value so that the density of probability distribution is determined for an output value. Once probability distribution function reaches our chosen output value, is also known its mean value, which is applied as standard uncertainty estimate for 95% confidence interval.

There are many domains for Monte Carlo method application. One of them is mathematics, physics, computer graphics, metrology (an expression of measurement uncertainties) and next. MCM algorithm evaluation method was applied to PKS type Tricept.

Procedure for calibration evaluation by means of the spread of the distribution by Monte Carlo method is elaborated in the paper in accordance with Annex 1 and GUM.

Advantages of MCM method:

- software implementation that provides information on measurement mathematical model,
- probability distribution of output variables estimation,
- use for strong non-linear models too,
- no need to do math operations model (partial derivatives, calculating of degrees of freedom number),
- output value may to be symmetrical,
- creation of measurement vector for n input values.

Disadvantages of MCM method:

- failure of the requirements for pseudo-values generators (statistical tests, simulation repeatability and repeatability a. o.),
- long simulation computational time,
- sensitivity coefficients cannot be calculated automatically.

2 PKS type Tricept

Tricept on STU (Fig. 1) belongs to a groups of parallel kinematics structures where positioning is provided of parallel kinematics, which has three degrees of freedom. At the other end there is end effectors having a kinematics in series. Tricept consists of fixed platform on which are mounted with the help of primary joints three telescopic rods and one central rod. On the other hand there is a mobile platform, on which telescopic rods are mounted with using of secondary joints. Central rod passes through the centre of fixed and mobile platform, it is fixed hard to the mobile platform and articulated to the fixed platform. Tricept telescopic rods are actuators, that are driven by own servomotor autonomous. Tricept has three telescopic rods, the arms with variable length. The transfer of ball screw is allowed by disengagement of individual telescopic rods. Joints allow telescopic rods winding against fixed platform and thus the change of mobile platform. The servomotors are controlled by frequency convertor and they are built-up with the help of a motor, whose part is also integrated pressure brake. [1, 2, 3, 4, 5]

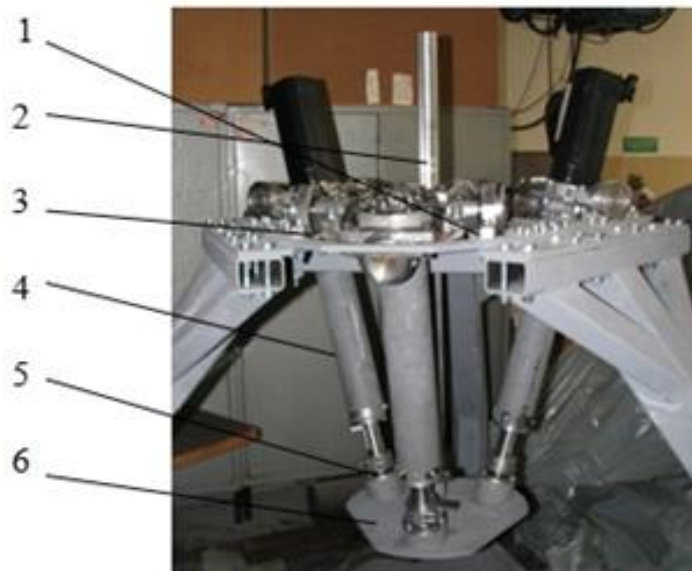


Figure 1 – Real model PKS - Tricept: 1 - fixed platform, 2 - central rod, 3 - universal (primary) joint, 4 - telescopic rod, 5 - spherical (secondary) joint, 6 - mobile platform [4]

3 Distribution spread generally

Applied evaluation method of Monte Carlo method provides general approach how to evaluate an approximation to selected function of probability distribution g_Y , for the value of output value which is signed as $Y = f(X)$. The aim is to make the repetitive choice of function values of probability distribution density for input values X_i . These input values are down in form of the vector $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)^T$. In our case, normal probability distribution was selected. [6]

Distribution function for selected output value is calculated from equation:

$$G_Y = \int_{-\infty}^{+\infty} g_Y(Y) dz \quad (1)$$

and probability distribution density is in form:

$$G_Y = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} g_X \delta(\mu - f(X)) d_{x_1} \dots d_{x_n} \quad (2)$$

where: g – Dirac function,
 g_{X_i} – the values of probability distribution functions for input values $i = (1, \dots, n)$,
 μ – mean value of random value.

Measured value estimation which is indicated as Y is written in form $Y = f(X)$.

Proposed model for the case PKS type Tricept has 11 measured quantities and that are x_1, \dots, x_{11} .

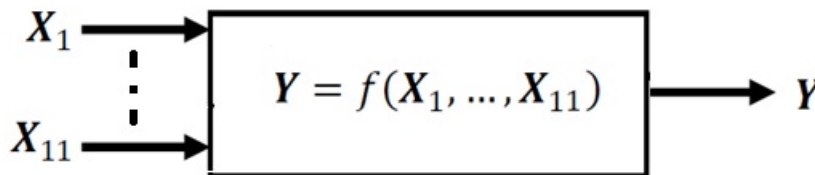


Figure 2 – The representation of Monte Carlo method for one output value

On said (Fig. 2) measurement model is shown. Suggested input values are considered to be uncorrelated and one output value which is designated as Y . Measured (simulated) input values, that will be signed in the form of measurement vector enter to proposed model. In our case the simulations for each measured value are evaluated by each model separately. The effects determined by B method for each input quantity equal are also considered [7, 8, 9 and 10].

4 Monte Carlo method for one output value

In Monte Carlo method stochastic evaluation methods are used. This method works with the best estimations of input values mean and pertaining to them standard deviation to express the estimate output value (length).

GUM Annex no. 1 proposes numerical evaluation which is needed to determine measurement uncertainty. This procedure can apply equally to our proposed model, which has one output value and any specific value of probability distribution is assigned to it. This procedure is based on probability distribution determination in such a way to determine probability distribution function of one output value. In the evaluation can be problems with the evaluation of the data that are: [10]

- partial sources of uncertainties are not of approximately equal size,
- complicated calculation of partial derivatives of model proposed (or approximation of partial derivatives),
- asymmetric probability distribution,
- estimate output and standard uncertainty are almost identical,
- asymmetric probability distribution.

5 Election of points on telescopic rod type Tricept

The figure (Fig. 3) shows the choosing of measurement points of telescopic rod Tricept. These points are uniformly distributed along total length of eject, except of the end points in regard to the construction and safe operation of Tricept. In this paper, the data were generated and could have been approached as far as to end point. For our case were selected points that are shown in picture.

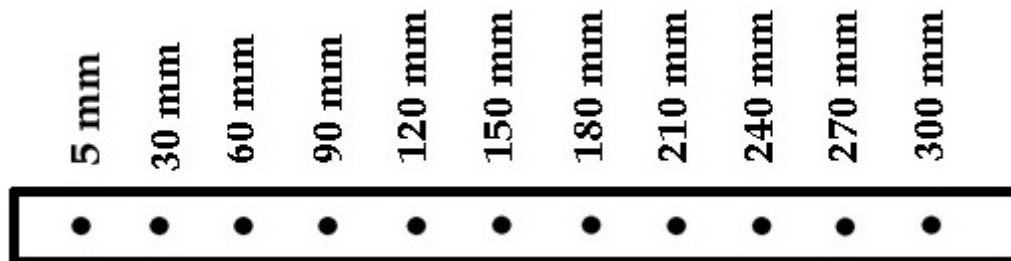


Figure 3 – Layout measurement (simulated) points to telescopic rod

6 Evaluation and implementation of Monte Carlo Method

Evaluation of proposed method consists of following steps:

- y estimate of output quantity Y ,
- standard uncertainty $u(y)$ and estimate of y ,
- reference probability determination of 95%,
- determination of end points for 95 % confidence interval.

Evaluation of Monte Carlo simulation is based on the fact that each input quantity entering to the model has the same weight. As a result is a set of points, which has a justification for probability value of output quantity Y . [12]

Implementation of Monte Carlo method is schematically shown in (Fig. 4). Detailed procedure is:

- number of repetitions (simulations) determination of Monte Carlo experiments,
- required number of samples generation with the same probability distribution needed to realize input values X_i ,
- evaluation of proposed model for each measured quantity,
- system of simulated samples into non-decreasing sequence, and then utilize these values to calculate distribution function of output quantity,
- y estimation identification of output quantity and assigning of standard uncertainty from distribution function,
- determination of the narrowest 95 % confidence interval for output value of distribution function.

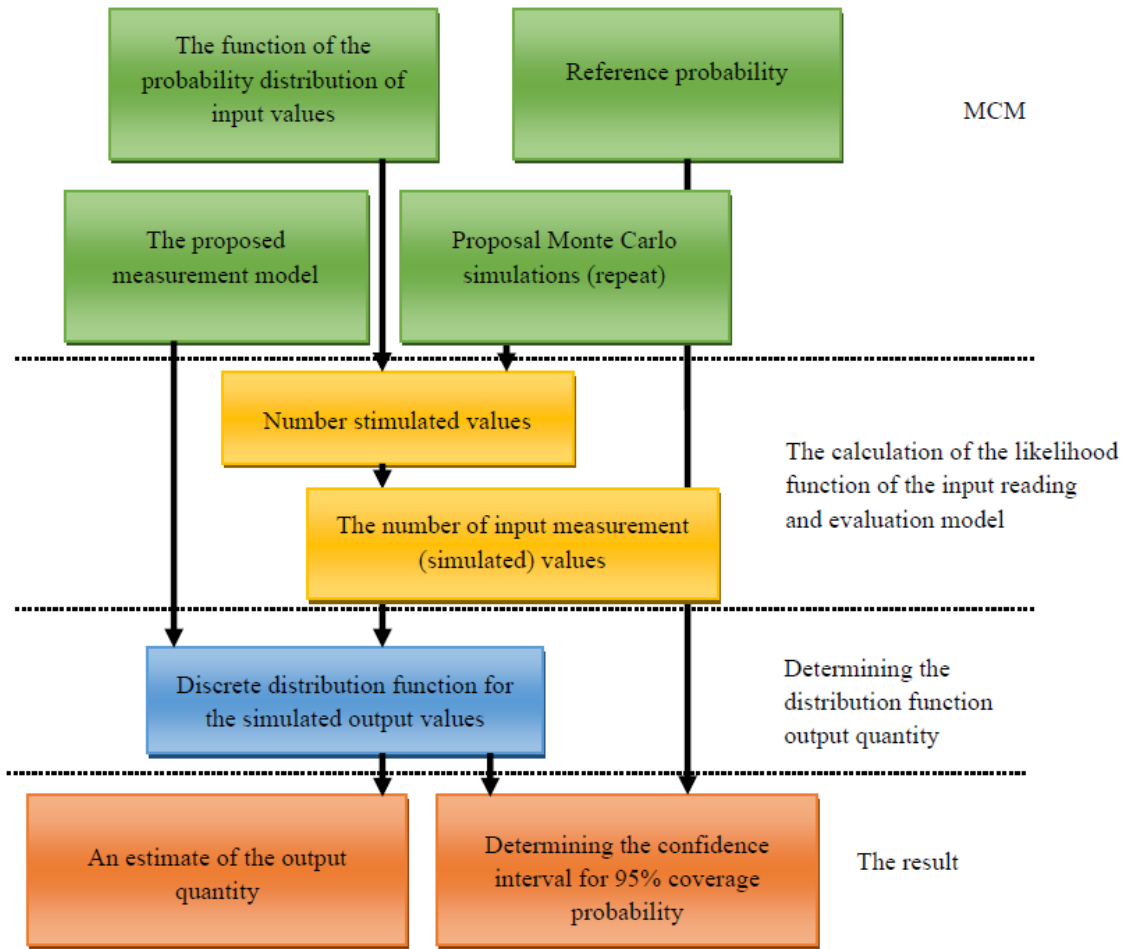


Figure 4 – Representation of Monte Carlo method for one output value

\bar{y} estimation of output quantity Y :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

and standard deviation is calculated as standard uncertainty:

$$u_{(y)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

In analysing the data, it is necessary to analyse scattering of parameters (statistical value), it is necessary to increase the value of n and then calculating of other values, $i_{(i=1, \dots, n)}$. For each measuring point is required to calculate the values for lower and upper interval for 95% probability. [13]

After each simulation is needed to calculated estimate parameters:

$$\hat{y} = y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (5)$$

$$s_{(\bar{y})} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (6)$$

Lower confidence interval is calculated:

$$\hat{y}_{\text{low}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\text{low}}, \quad (7)$$

$$s_{(y)} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_{\text{low}} - \bar{y}_{\text{low}})^2} \quad (8)$$

Upper limit confidence interval is calculated:

$$\hat{y}_{\text{hig}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\text{hig}} \quad (9)$$

$$s_{(y)} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_{\text{hig}} - \bar{y}_{\text{hig}})^2} \quad (10)$$

For simulation of Monte Carlo method evaluation was used Matlab software, which have been implemented pseudo-distance values of measurement distances of telescopic rod Tricept eject.

Table uncertainties values are calculated for each simulated quantity. These mentioned uncertainties came out very small what was caused by simulation in applied software. The uncertainty determined by the method B was the same at each point.

Table 1 - Calculated values of uncertainties for Monte Carlo method

Position measurement	u_A	u_B	u_C
5	0,078507	0,045126	0,14363378
30	0,073105		0,11823192
60	0,086461		0,13158722
90	0,076461		0,12158742
120	0,063753		0,10887922
150	0,079101		0,12422638
180	0,071380		0,11650643
210	0,064668		0,10979497
240	0,070883		0,11600987
270	0,062046		0,10717273
300	0,064218		0,10934518

On the figure (Fig. 5) histogram is shown for one output value and it was simulated length of 90 mm. Drawn vertical lines represent 95% confidence interval. Likewise, it was treated to others measuring lengths.

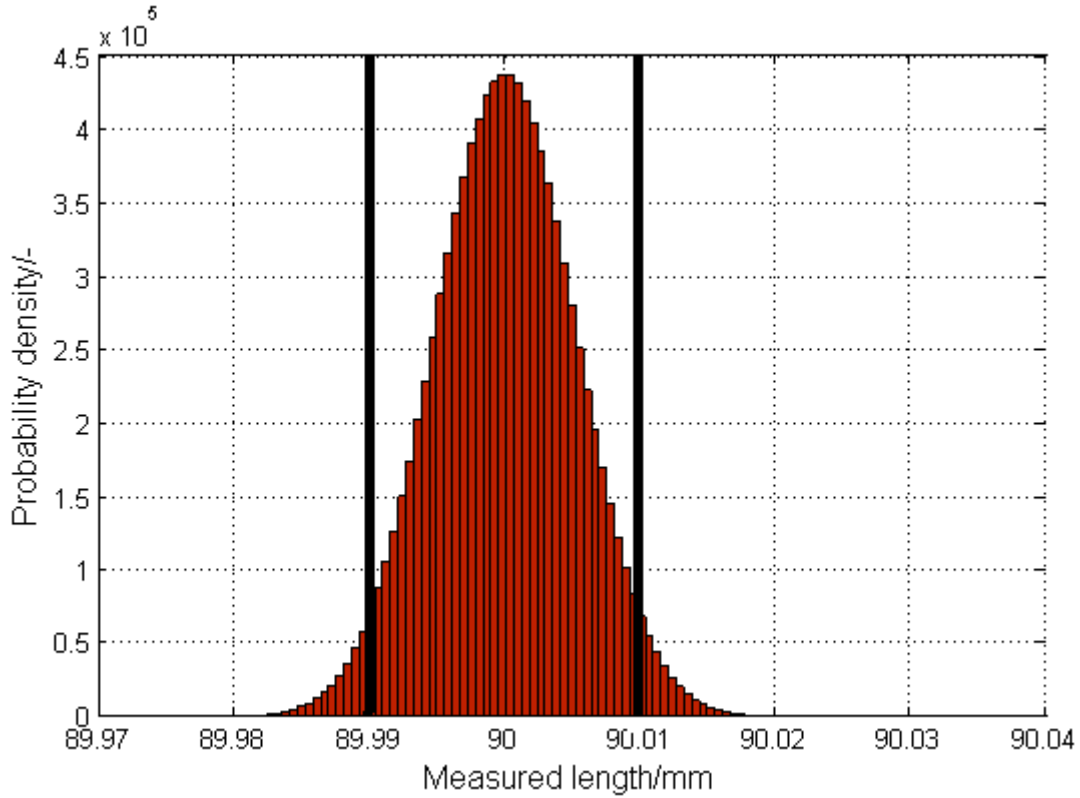


Figure 5 – Histogram for one output value

7 Application of mathematical model by Monte Carlo method

Proposed mathematical model is based on the least squares method. On the base of Akaike information criterion was calculated deviation function of 6th degree. Akaike criterion estimates the degree of regression polynomial all that time when its values are as the least as possible.

The form of polynomial regression in the polynomial form is:

$$P_1 = b_0 + b_1 \cdot P_1^2 + b_2 \cdot P_2^3 + \dots + b_n \cdot P_n^n + e, \quad (11)$$

where: P_1, \dots, n – polynomial regression,

b_i – parameters for the polynomial $i = (1, \dots, n)$,

e – random error. [8]

This is the case of measurement with redundancy and therefore equation (11) goes to the system of equations where our generated variations will be positioned in simulated points:

$$\begin{aligned} P_1 &= b_0 + b_1 \cdot P_1^2 + b_2 \cdot P_2^3 + \dots + b_n \cdot P_n^n + e, \\ &\vdots \\ P_m &= b_0 + b_1 \cdot P_1^2 + b_2 \cdot P_2^3 + \dots + b_n \cdot P_n^n + e, \end{aligned} \quad (12)$$

In matrix notation the model will consist of correction vector, from matrix plan of experiment P and from the vector of output quantities b, and it is in form:

$$\mathbf{A} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{b} \quad (13)$$

Experimental plan matrix is calculated as partial derivative of the model according to different input values: [8]

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & P_1^2 & \dots & P_n^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & P_n^m & \dots & P_n^m \end{pmatrix} \quad (14)$$

Parameter estimation of regression model can be expressed if there is an inverse to the experimental plan matrix \mathbf{P} : [8, 9]

$$\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{A} \quad (15)$$

Designed vector of corrections that are specified by a method B consists of matrix pitch correction, incremental encoders, laser comparator Leica, cosine error, temperature error and next. The corrections have been implemented in proposed model:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \delta_{\text{STM}} \\ \delta_{\text{IRE}} \\ \delta_{\text{LEICA}} \\ \delta_{\text{COS}} \\ \delta_{\text{PRESADENIE}} \\ \delta_{t_{\text{stroj}}} \end{pmatrix} \quad (16)$$

Covariance matrix of parameters estimation for regression model has the squares of uncertainties determined by method B on the main diagonal, other elements of the matrix are the covariance between the elements: [8, 14]

$$\mathbf{U}_{\hat{\mathbf{b}}} = \begin{pmatrix} u_{(b_1)}^2 & u_{(b_1, b_2)} & \dots & u_{(b_1, b_m)} \\ u_{(b_2, b_1)} & u_{(b_2)}^2 & \dots & u_{(b_2, b_m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{(b_m, b_1)} & u_{(b_m, b_2)} & \dots & u_{(b_m)}^2 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Deviation function is written in form of vector of type 6x1: [8]

$$\hat{\mathbf{y}} = (\mathbf{P}^T \cdot \mathbf{U}_{\hat{\mathbf{b}}} \cdot \mathbf{P})^{-1} \cdot \mathbf{P}^T \cdot \mathbf{U}_{\hat{\mathbf{b}}}^{-1} \cdot \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 2,7662 \\ 4,3264 \\ -5,7634 \\ 4,3200 \\ -1,7481 \\ 2,9148 \end{pmatrix} \quad (18)$$

8 Conclusions

Evaluation of Monte Carlo method is implemented in the paper. This method was applied to KPS type Tricept, which is situated at the Faculty of Mechanical Engineering of Slovak University of Technology in Bratislava. Monte Carlo method provides a lot of different applications, how to evaluate the data, in our case was considered with only one input and output value. Further search will also accede to the application which provides more input and output values, thus identifying global uncertainty for entire length of telescopic rod Tricept ejection.

Thanks

The authors thanks the Institute of Automation, Measurement and Applied Informatics, Faculty of Mechanical Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Grant Agency project VEGA no. And No. 1/0604/15 and the Agency KEGA project no. 014STU-4/2015 for their support in writing this article.

9 References

- [1] KOLLÁTH, Ľudovít - HALAJ, Martin - KUREKOVÁ, Eva: Positioning accuracy of non-conventional production machines. In: IMEKO 2009. 19th World Congress. Fundamental and Applied Metrology : Proceedings. Lisbon, Portugal, 6.-11.9. 2009. -: IMEKO, 2009. - ISBN 978-963-88410-0-1. - p. 2099-21.
- [2] ONDEROVÁ, Iveta – KUREKOVÁ, Eva - KOLLÁTH Ľudovít - PLOSKUŇÁKOVÁ, Lucia: Experimentálna verifikácia technologických parametrov rezacích strojov s nekonvenčnou kinematikou. In: Instruments and Control 2013 : 37. seminar ASR. Ostrava, ČR, 26.4. 2013. - Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. - ISBN 978-80-248-2967-8. - S. 53-61.
- [3] TOLNAY, Marián: Priemyselné roboty a manipulátory. In: 2 vyd. Bratislava, Edičné stredisko STU, 1992, ISBN 80-227-0468-7.
- [4] KOLLÁTH, Ľudovít - HALAJ, Martin - KUREKOVÁ, Eva: Positioning accuracy of non-conventional production machines. In: IMEKO 2009. 19th World Congress. Fundamental and Applied Metrology : Proceedings. Lisbon, Portugal, 6.-11.9. 2009. -: IMEKO, 2009. - ISBN 978-963-88410-0-1. - p. 2099-21.
- [5] CHREN, ONDREJ - HARMAN, BLAHOŠLAV - KOLLÁTH, ĽUDOVÍT. OPTIROB 2008. Optimization of the robots and manipulators : Proceedings. The third edition of the international conference - Predeal/Romania/, May 30th-June 1st, 2008. -- Bucurest : BREN, 2008. -- ISBN 978-973-648-784-2. -- s.113-120.
- [6] CHUDÝ, V. – PALENČÁR, R. – KUREKOVÁ, E. – HALAJ, M. 1999. Meranie technických veličín. 1 vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 688 s. 1999. ISBN 80-227-1275-2.
- [7] BUŠA, J. – PIRČ, V. - SCHROTTER, Š. 2006. Numerické metódy, pravdepodobnosť a matematická štatistika. 1 vyd. Košice. 567 s. 2006. ISBN 80-8073-633-2.
- [8] WIMMER, G. – PALENČÁR, R. – WITKOVSKÝ, V. 2001. Stochastické modely merania. 1. vyd. Bratislava: Grafické štúdio Ing. Peter Juriga, 2001. 113 s. ISBN 80-968449-2-X.
- [9] PALENČÁR, R. 1987. Štatistické metódy v metrológii a v skúšobníctve. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1987. 152 s.

- [10] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, (BIPM)
- [11] The MathWorks. Matlab User's Manual. Math Works Inc., Natick, Mass., USA, 1992
- [12] Anděl, J.: Statistické metody. MATFYZPRESS, Praha, 1993
- [13] Brdečka, R.: Kalibrácia lineárnej stupnice (dizertačná práca). Sjf STU, Bratislava, 2001
- [14] Cox, M. G., and B. R. L. Siebert. The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty. National Physical Laboratory, Teddington, UK, Metrologia 43 (2006).

Návrh robustního řízení nelineárních systémů Design of Robust Control of Nonlinear Systems

VÍTEČKOVÁ, Miluše & VÍTEČEK, Antonín

Prof. Ing., CSc. & Prof. Ing., CSc., Dr.h.c.

✉ 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 návrhu robustního řízení nelineárních dynamických systémů standardního typu s neurčitostmi. Přístup je založen na modifikaci metody agregace stavových proměnných. Je jednoduchý a může být použit i bez přesné znalosti matematického modelu řízeného systému. Popisovaný přístup umožňuje navrhnout řízení, které zajistí dostatečnou kvalitu řízení i při neznámých omezených neurčitostech a neměřitelných poruchách.*

***Klíčová slova:** nelineární systémy, neurčitosti, robustní řízení, agregace*

1 Úvod

Řízení nelineárních dynamických systémů s neurčitostmi patří mezi náročné, ale současně důležité a aktuální problémy aplikované teorie řízení, kterým je věnována velká pozornost [Cedro 2014; Kelly, Santibanez, Loria 2005; Lewis, Dawson, Abdallah 2006]. Je to dáno náročnou identifikací jejich dynamických vlastností, nesnadným získáváním informací o okamžitých hodnotách stavových veličin využívaných při řízení a velmi často neměřitelností poruch. Příspěvek je věnován robustním algoritmům řízení, které dovedou zajistit dostatečnou kvalitu řízení i při neurčitostech v chování nelineárních dynamických systémů a při neměřitelných poruchách [Zítek 1999; Víteček, Vítečková 2015].

2 Modely nelineárních dynamických systémů ve standardním tvaru

Je uvažován nelineární t -invariantní dynamický systém s neurčitostmi s matematickým modelem ve standardním tvaru [Zítek, Víteček 1999; Víteček, Vítečková 2015]

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \Delta\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) + [\mathbf{G}(\mathbf{x}) + \Delta\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{v})] \mathbf{u}, \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \quad (1)$$

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \quad \dim \mathbf{x} = n, \quad \mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T, \quad \dim \mathbf{u} = m,$$

$$\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_p]^T, \quad \dim \mathbf{v} = p,$$

$$\mathbf{f} = [x_2, \dots, f_{r_1}, x_{r_1+2}, \dots, f_{r_2}, x_{r_2+2}, \dots, f_n]^T, \quad \dim \mathbf{f} = n,$$

$$\Delta\mathbf{f} = [0, \dots, \Delta f_{r_1}, 0, \dots, \Delta f_{r_2}, 0, \dots, \Delta f_n]^T, \quad \dim \Delta\mathbf{f} = n,$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{r_1 1} & g_{r_1 2} & \dots & g_{r_1 m} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{r_2 1} & g_{r_2 2} & \dots & g_{r_2 m} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{n1} & g_{n2} & \dots & g_{nm} \end{bmatrix}, \quad \dim \mathbf{G} = (n, m),$$

$$\Delta \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta g_{r_1 1} & \Delta g_{r_1 2} & \dots & \Delta g_{r_1 m} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta g_{r_2 1} & \Delta g_{r_2 2} & \dots & \Delta g_{r_2 m} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta g_{n1} & \Delta g_{n2} & \dots & \Delta g_{nm} \end{bmatrix}, \quad \dim \Delta \mathbf{G} = (n, m)$$

Nominální nelineární dynamický systém (tj. pro $\Delta \mathbf{f} = \mathbf{0}$ a $\Delta \mathbf{G} = \mathbf{0}$) ve složkovém vyjádření má tvar

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, & x_1(0) &= x_{10}, \\ \dot{x}_2 &= x_3, & x_2(0) &= x_{20}, \\ & \vdots & & \vdots \\ \dot{x}_{r_1} &= f_{r_1}(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m g_{r_1 j}(\mathbf{x}) u_j, & x_{r_1}(0) &= x_{r_1 0}, \\ \dot{x}_{r_1+1} &= x_{r_1+2}, & x_{r_1+1}(0) &= x_{r_1+1,0}, \\ \dot{x}_{r_1+2} &= x_{r_1+3}, & x_{r_1+2}(0) &= x_{r_1+2,0}, \\ & \vdots & & \vdots \\ \dot{x}_{r_2} &= f_{r_2}(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m g_{r_2 j}(\mathbf{x}) u_j, & x_{r_2}(0) &= x_{r_2 0}, \\ \dot{x}_{r_2+1} &= x_{r_2+2}, & x_{r_2+1}(0) &= x_{r_2+1,0}, \\ \dot{x}_{r_2+2} &= x_{r_2+3}, & x_{r_2+2}(0) &= x_{r_2+2,0}, \\ & \vdots & & \vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m g_{nj}(\mathbf{x}) u_j, & x_n(0) &= x_{n0}, \\ r_j &= r_{j-1} + n_j, \quad r_0 = 0, \quad n = \sum_{j=1}^m n_j, \quad j = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

kde \mathbf{x} je vektor stavových proměnných (stav), \mathbf{u} – vektor řídicích proměnných (řízení), \mathbf{v} – vektor poruchových proměnných (poruchy), \mathbf{f} a $\Delta \mathbf{f}$ – spojité vektorové funkce, \mathbf{G} a $\Delta \mathbf{G}$ –

matice spojité funkce g_{ij} a Δg_{ij} , n – počet stavových proměnných (řád nelineárního dynamického systému), n_j – dílčí řád, m – počet řídicích proměnných, p – počet poruchových proměnných, T – symbol transpozice, \dim – dimenze vektoru nebo typu matice.

V dalším textu se rovněž předpokládá $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$ a striktně se nerozlišuje mezi pojmy systém a model.

Výrazy Δf a ΔG mohou např. vyjadřovat neurčitost v chování nelineárního podsystemu, nepřesnost identifikace a vliv neměřitelných poruch. Mají nulové složky, resp. řádky, které odpovídají nulovým řádkům v matici G .

Nelineární dynamický systém má standardní tvar, pokud jeho nominální složkový matematický model má tvar (2). V analogii s lineárními dynamickými systémy se tento tvar také nazývá nelineární kanonický tvar řízení [Zítek, Víteček 1999]. Pokud je splněna podmínka

$$\text{rank } G(\mathbf{x}) = m, \quad (3)$$

kde rank je hodnota matice, pak daný nelineární dynamický systém s modelem ve standardním tvaru je říditelný. Lze to snadno dokázat. Dynamický systém (2) může být vyjádřen v agregovaném tvaru

$$\dot{\mathbf{x}}_a = \mathbf{f}_a(\mathbf{x}) + \mathbf{G}_a(\mathbf{x})\mathbf{u}, \quad (4a)$$

resp.

$$\begin{bmatrix} x_1^{(n_1)} \\ x_{r_1+1}^{(n_2)} \\ \vdots \\ x_{r_{m-1}+1}^{(n_m)} \end{bmatrix} = \mathbf{f}_a(\mathbf{x}) + \mathbf{G}_a(\mathbf{x})\mathbf{u}, \quad (4b)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_a = \mathbf{D}_a \dot{\mathbf{x}} = [\dot{x}_{r_1}, \dot{x}_{r_2}, \dots, \dot{x}_n]^T = [x_1^{(n_1)}, x_{r_1+1}^{(n_2)}, \dots, x_{r_{m-1}+1}^{(n_m)}]^T,$$

$$\mathbf{f}_a = \mathbf{D}_a \mathbf{f} = [f_{r_1}, f_{r_2}, \dots, f_n]^T, \quad \dim \mathbf{f}_a = m;$$

$$\mathbf{G}_a = \mathbf{D}_a \mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{r_1 1} & g_{r_1 2} & \dots & g_{r_1 m} \\ g_{r_2 1} & g_{r_2 2} & \dots & g_{r_2 m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{n 1} & g_{n 2} & \dots & g_{n m} \end{bmatrix}, \quad \dim \mathbf{G}_a = (m, m),$$

kde \mathbf{x}_a je agregovaný stavový vektor \mathbf{x} , \mathbf{f}_a – agregovaná vektorová funkce \mathbf{f} , \mathbf{G}_a – agregovaná matice \mathbf{G} , \mathbf{D}_a – základní agregační matice typu (m, n) , jejíž nezáporné prvky jsou dány vztahy

$$d_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{pro } i = r_j \\ 0 & \text{pro } i \neq r_j \end{cases}. \quad (5)$$

Agregovaná vektorová funkce \mathbf{f}_a a agregovaná matice \mathbf{G}_a mohou být získány přímo vynecháním řádků, které odpovídají nulovým řádkům v matici \mathbf{G} .

Je zřejmé, že při splnění podmínky říditelnosti (3) platí

$$\text{rank } G(\mathbf{x}) = \text{rank } G_a(\mathbf{x}) = m \Rightarrow \det G_a(\mathbf{x}) \neq 0, \quad (6)$$

kde \det je determinant.

To, že splnění podmínky (6) zaručuje říditelnost daného systému, lze snadno ukázat. Pomocí řízení

$$\mathbf{u} = \mathbf{G}_a^{-1}(\mathbf{x})[\mathbf{u}^0 - \mathbf{f}_a(\mathbf{x})]$$

$$\mathbf{u}^0 = [u_1^0, u_2^0, \dots, u_m^0]^T, \quad \dim \mathbf{u}^0 = m$$

se ze vztahu (4) obdrží

$$\begin{bmatrix} x_1^{(n_1)} \\ x_{r_1+1}^{(n_2)} \\ \vdots \\ x_{r_{m-1}+1}^{(n_m)} \end{bmatrix} = \mathbf{u}^0, \text{ tj. } \dot{\mathbf{x}}_a = \mathbf{u}^0. \quad (7)$$

Dynamický systém (7) je lineární a vždy říditelný, protože se skládá z m autonomních dílčích systémů sestávajících z n_j sériově zapojených integrátorů. Každý z m dílčích autonomních systémů je říditelný, protože platí

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{r_{j-1}+1} \\ \dot{x}_{r_{j-1}+2} \\ \vdots \\ \dot{x}_{r_j} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_j} \cdot \begin{bmatrix} x_{r_{j-1}+1} \\ x_{r_{j-1}+2} \\ \vdots \\ x_{r_j} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{b}_j} u_j^0,$$

tj. je v kanonickém tvaru řízení a jeho matice říditelnosti je

$$\mathbf{Q}_{co}^j(\mathbf{A}_j, \mathbf{b}_j) = [\mathbf{b}_j, \mathbf{A}_j \mathbf{b}_j, \dots, \mathbf{A}_j^{n_j-1} \mathbf{b}_j] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow |\det \mathbf{Q}_{co}^j(\mathbf{A}_j, \mathbf{b}_j)| = 1.$$

3 Formulace úlohy návrhu řízení

Úlohou syntézy řízení je navrhnout takové řízení

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^w, t), \quad (8)$$

které zajistí, aby standardní nelineární dynamický systém (1) sledoval předem zadanou požadovanou stavovou trajektorii $\{\mathbf{x}^w(t)\}$ takovým způsobem, aby uzavřený systém řízení byl popsán matematickým modelem [Zítek, Víteček 1999]

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{f}^w(\mathbf{e}), \quad \mathbf{e}(0) = \mathbf{e}_0, \quad (9)$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{x}^w - \mathbf{x}, \quad \dim \mathbf{e} = n, \quad \mathbf{f}^w = [e_2, \dots, f_{r_1}^w, e_{r_1+2}, \dots, f_{r_2}^w, e_{r_2+2}, \dots, f_n^w]^T, \quad \dim \mathbf{f}^w = n, \quad (10)$$

kde \mathbf{e} je vektor odchylek, \mathbf{f}^w – zadaná spojitá vektorová funkce se stejnou strukturou jako funkce \mathbf{f} . Předpokládá se, že požadovaný uzavřený systém řízení (9) má jediný globálně asymptoticky stabilní rovnovážný stav

$$\mathbf{e} = \mathbf{0}. \quad (11)$$

To, že funkce \mathbf{f}^w má stejnou strukturu jako funkce \mathbf{f} , znamená, že funkce $f_{r_j}^w$ vystupuje pouze v těch rovnicích, které odpovídají nenulovým řádkům v matici \mathbf{G} .

4 Nerobustní řízení

Je uvažován nominální nelineární dynamický systém (2) v kompaktním vyjádření

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \mathbf{u}. \quad (12)$$

Po dosazení (12) do (9) a vynásobení agregační maticí \mathbf{D}_a [viz (5)] zleva se dostane po úpravě nerobustní řízení

$$\underbrace{\mathbf{D}_a \dot{\mathbf{x}}^w - \mathbf{f}(\mathbf{x}) - \mathbf{G}(\mathbf{x}) \mathbf{u}}_{\dot{\mathbf{e}}_a} = \underbrace{\mathbf{D}_a \mathbf{f}^w(\mathbf{e})}_{\mathbf{f}_a^w(\mathbf{e})} \Rightarrow \quad (13)$$

$$\mathbf{u}^n = \mathbf{G}_a^{-1}(\mathbf{x})[\dot{\mathbf{x}}_a^w - \mathbf{f}_a(\mathbf{x}) - \mathbf{f}_a^w(\mathbf{e})], \quad (14)$$

kde

$$\dot{\mathbf{x}}_a^w = \mathbf{D}_a \dot{\mathbf{x}}^w, \quad \mathbf{f}_a = \mathbf{D}_a \mathbf{f}, \quad \mathbf{f}_a^w = \mathbf{D}_a \mathbf{f}^w, \quad \mathbf{G}_a = \mathbf{D}_a \mathbf{G}.$$

Protože se předpokládá, že systém (12) je říditelný, matice \mathbf{G}_a^{-1} existuje, viz (6).

Snadno se lze přesvědčit, že nerobustní řízení (14) skutečně realizuje agregovaný požadovaný model (13), ze kterého po doplnění rovnicemi

$$\dot{e}_i = e_{i+1} \quad \text{pro } i \neq r_j \quad (15)$$

se získá model uzavřeného systému řízení (9). Řízení (14) je nerobustní, protože vychází z přesného nominálního modelu nelineárního dynamického systému bez neurčitostí a předpokládá nepůsobení poruch. Bohužel v reálných podmínkách přesný matematický model nebývá k dispozici a poruchy jsou často neměřitelné a nepředvídatelné. Proto vzniká problém, jak určit řízení při nepřesné znalosti matematického modelu a neměřitelných poruchách.

5 Robustní řízení

Požadovaný matematický model uzavřeného systému řízení (9) může být zapsán ve tvaru [viz také (13)]

$$\mathbf{m}^w(\mathbf{u}) = \mathbf{0}, \quad (16a)$$

kde

$$\mathbf{m}^w(\mathbf{u}) = \dot{\mathbf{e}}_a(\mathbf{u}) - \mathbf{f}_a^w(\mathbf{e}). \quad (16b)$$

Řízení \mathbf{u}^n lze určit např. iterační metodou pevného bodu [Zítek, Víteček 1999; Víteček, Vítečková 2015]. K oběma stranám rovnice (16a) se přičte výraz $\mathbf{K}^{-1}\mathbf{u}$ a po úpravě se dostane

$$\begin{aligned} \mathbf{K}^{-1}\mathbf{u} + \mathbf{m}^w(\mathbf{u}) = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{u} &\Rightarrow \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{K}\mathbf{m}^w(\mathbf{u}) \Rightarrow \\ \mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{u}_k - \mathbf{K}\mathbf{m}^w(\mathbf{u}_k), \quad \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0, \quad k = 0,1,2,\dots \end{aligned} \quad (17)$$

kde \mathbf{K} je vhodně zvolená nesingulární čtvercová matice typu (m, m) .

Je zřejmé, že pro

$$\mathbf{K} = \left[\frac{\partial \mathbf{m}^w(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right]^{-1} = -\mathbf{G}_a^{-1}(\mathbf{x}) \quad (18)$$

a nominální matematický model (12) se obdrží Newtonova-Raphsonova iterační metoda. V tomto případě se získá řešení v jednom kroku, tj. $\mathbf{u}^n = \mathbf{u}_1$. Je to dáno tím, že matematický model (12) je afinní vzhledem k řízení \mathbf{u} .

Obecně při nepřesné matici (18) a neurčitostech ve vlastnostech nelineárního dynamického systému a neměřitelných poruchách, platí

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{u}_k = \mathbf{u}^r, \quad k = 0,1,2,\dots \quad (19)$$

Iterační výpočet musí být dostatečně rychlý, aby se negativně neprojevovaly časové změny proměnných.

Vztah pro iterační výpočet (17) je vhodně zastoupit diferenciální rovnicí

$$\frac{\partial \mathbf{u}(\tau)}{\partial \tau} = \Theta \mathbf{m}^w[\mathbf{u}(\tau)], \quad \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0, \quad (20a)$$

$$\Theta = -\lambda \mathbf{K}, \quad \lambda \rightarrow \infty, \quad (20b)$$

kde pro vhodně zvolenou nesingulární čtvercovou matici \mathbf{K} platí

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \mathbf{u}(\tau) = \mathbf{u}^r.$$

Vzhledem k tomu, že řešení diferenciální rovnice (20) musí probíhat značně rychleji, než jsou časové změny proměnných, je vhodné zavést dva časy. Skutečný čas t a „rychlý“ čas

$$\tau = \beta t, \quad \beta \gg 1.$$

Průběh času τ je dán parametrem β , jehož velikost je úměrná velikosti λ ve vztahu (20b), tj. absolutní velikosti prvků v matici Θ . Pak rovnice (20) po uvažování (16b), dosazení rovnice (1) ve tvaru

$$\dot{\mathbf{x}}_a(t) = \mathbf{f}_a[\mathbf{x}(t)] + \mathbf{G}_a[\mathbf{x}(t)]\mathbf{u}(t) + \mathbf{z}_a[\mathbf{x}(t), t], \quad (21a)$$

$$\mathbf{z}_a[\mathbf{x}(t), t] = \mathbf{D}_a \{ \Delta \mathbf{f}[\mathbf{x}(t)] + \Delta \mathbf{G}[\mathbf{x}(t)]\mathbf{u}(t) \} \quad (21b)$$

bude

$$\frac{d\mathbf{u}(\tau)}{d\tau} = -\Theta \mathbf{G}_a \mathbf{u}(\tau) + \Theta (\dot{\mathbf{x}}_a - \mathbf{f}_a - \mathbf{f}_a^w - \mathbf{z}_a). \quad (22)$$

Protože čas τ probíhá podstatně rychleji než skutečný čas t , lze výrazy závislé na skutečném čase t v (21) při výpočtu považovat za přibližně konstantní [viz (22)]. O stabilitě řešení lineární rovnice (22) rozhoduje její charakteristický mnohočlen

$$N(s) = \det(s\mathbf{I} + \Theta \mathbf{G}_a). \quad (23)$$

Pokud matice \mathbf{K} [viz (20b)] bude velmi blízká k matici (18), pak na základě vztahů (20b) a (23) lze předpokládat, že kořeny charakteristického mnohočlenu (23) budou záporné a reálné blízké k hodnotě $-\lambda$ a bude platit

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \mathbf{u}(\tau) = \mathbf{u}^r. \quad (24)$$

Pro účely řízení je vhodné diferenciální rovnici (20) zastoupit integrální rovnicí

$$\mathbf{u}^r(t) = \Theta \int_0^t \mathbf{m}^w[\mathbf{u}(\tau)] d\tau + \mathbf{u}_0, \quad (25)$$

resp.

$$\mathbf{u}^r(t) = \Theta \mathbf{s}(t) + \mathbf{u}_0, \quad (26a)$$

kde

$$\mathbf{s}(t) = \int_0^t \mathbf{m}^w[\mathbf{u}(\tau)] d\tau = \int_0^t \{ \dot{\mathbf{e}}_a(\tau) - \mathbf{f}_a^w[\mathbf{e}(\tau)] \} d\tau. \quad (26b)$$

Při vhodně zvolené matici \mathbf{K} řízení (25), resp. (26) bude pro nominální matematický model tím bližší řízení $\mathbf{u}^n(t)$, čím vyšší hodnotu bude mít parametr λ , viz (20b). Protože v těchto vztazích nevystupuje explicitně matematický model řízeného nelineárního dynamického systému (1), proto jde o robustní řízení s vysokým zesílením.

Počáteční řízení \mathbf{u}_0 zajišťuje počáteční rovnováhu a lze ho určit experimentálně nebo odhadnout na základě vztahu (4a) [$\dot{\mathbf{x}}_a = \mathbf{0}$]

$$\mathbf{u}_0 = -\mathbf{G}_a^{-1}(\mathbf{x}_0) \mathbf{f}_a(\mathbf{x}_0). \quad (27)$$

Prakticky velikost prvků v matici Θ je omezena ztrátou stability uzavřeného systému řízení způsobenou nemodelovanou dynamikou a v praxi vždy přítomným reálným omezením řídicích proměnných (jsou uvažovány pouze symetrická omezení)

$$|u_j| \leq u_j^m > 0. \quad (28)$$

Tento problém lze řešit uvažováním nekonečně vysokých hodnot diagonálních prvků matice Θ a omezením (28). Pak řízení (26) může být vyjádřeno vztahem

$$\mathbf{u}^r(t) = \mathbf{G}_a^{-1}(\mathbf{x}) \mathbf{U} \text{sign}[\mathbf{s}(t)] + \mathbf{u}_0, \quad (29a)$$

$$\mathbf{U} = \text{diag}[u_1^m, u_2^m, \dots, u_m^m], \quad (29b)$$

$$\text{sign}(\mathbf{s}) = [\text{sign}(s_1), \text{sign}(s_2), \dots, \text{sign}(s_m)]^T, \quad (29c)$$

$$\text{sign}(s_j) = \begin{cases} 1 & \text{pro } s_j > 0 \\ 0 & \text{pro } s_j = 0 \\ -1 & \text{pro } s_j < 0 \end{cases} \quad (29d)$$

Robustní řízení (29) je silně nelineární a pracuje v klouzavém režimu [Slotine 1991; Utkin 1992; Utkin, Guldner, Shi 199]. Vztah

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{0} \quad (30)$$

popisuje klouzavou plochu (varietu) [Utkin 1992]. Toto řízení je vysoce robustní, ale také vysoce aktivní, co se projevuje neustálým přepínáním mezi hodnotami u_j^m a $-u_j^m$.

Aktivitu řízení (29) lze podstatně snížit zastoupením nespojitě funkce (29d) spojitou nehladkou funkcí nasycení [Zitek, Víteček 1999; Víteček, Vítečková 2015]

$$\text{sat}\left(\frac{s_j}{\varepsilon_j}\right) = \begin{cases} \frac{s_j}{\varepsilon_j} & \text{pro } \frac{|s_j|}{\varepsilon_j} \leq 1 \\ \text{sign}\left(\frac{s_j}{\varepsilon_j}\right) & \text{pro } \frac{|s_j|}{\varepsilon_j} > 1 \end{cases} \quad (31)$$

nebo spojitou hladkou funkcí

$$\text{asign}(s_j) = \frac{s_j}{\varepsilon_j + |s_j|}, \quad (32)$$

kde ε_j je vhodně zvolené malé kladné číslo.

Je zřejmé, že pro $\varepsilon_j \rightarrow 0$ obě funkce (31) a (32) konvergují k funkci (29d).

Minimální hodnoty omezení u_j^m zajišťující stabilitu uzavřeného systému řízení lze určit analyticky pomocí Ljapunovovy funkce. Počáteční řízení \mathbf{u}_0 nemusíme uvažovat.

Předpokládá se, že matematický model řízeného nelineárního dynamického systému má tvar (21). Model uzavřeného systému řízení (16) pak je

$$\mathbf{m}^w = \mathbf{0} \quad (33a)$$

$$\mathbf{m}^w = \dot{\mathbf{x}}_a - \mathbf{h}_a(\mathbf{x}, \mathbf{e}, t) - \mathbf{G}_a(\mathbf{x})\mathbf{u}, \quad (33b)$$

kde funkce

$$\mathbf{h}_a(\mathbf{x}, \mathbf{e}, t) = \mathbf{f}_a(\mathbf{x}) + \mathbf{f}_a^w(\mathbf{e}) + \mathbf{z}_a(\mathbf{x}, t) \quad (33c)$$

vyhovuje omezení

$$\|\dot{\mathbf{x}}^w - \mathbf{h}_a\|_\infty < \kappa < 0 \quad (34)$$

ve smyslu normy

$$\|\mathbf{h}\|_\infty = \max\{|h_1|, |h_2|, \dots, |h_m|\}. \quad (35)$$

Pro Ljapunovovu funkci

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{s}, \quad \dot{\mathbf{s}} = \int_0^t \mathbf{m}^w d\tau \quad (36a)$$

lze po uvažování (34) a (29) psát

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} = \mathbf{s}^T [\dot{\mathbf{x}}_a^w - \mathbf{h}_a - \mathbf{U} \text{sign}(\mathbf{s})] = \sum_{j=1}^m \dot{V}_j. \quad (36b)$$

Aby uzavřený systém řízení byl asymptoticky stabilní, postačující podmínkou je zápornost každé složky \dot{V}_j , tj.

$$s_j [\kappa - u_j^m \text{sign}(s_j)] < 0.$$

Protože platí

$$\text{sign}(s_j) = \frac{s_j}{|s_j|} = \frac{|s_j|}{s_j},$$

lze psát

$$|s_j| (\kappa - u_j^m) < 0 \Rightarrow u_j^m > \kappa. \quad (37)$$

Z této nerovnosti vyplývá, že pro dostatečně vysoké hodnoty u_j^m robustní klouzavé řízení (29) zajistí stabilitu uzavřeného systému řízení.

Dalšího zkvalitnění řízení a snížení hodnot u_j^m lze dosáhnout kombinací nerobustního a robustního řízení ve tvaru

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}^n(t) + \mathbf{u}^r(t), \quad (38a)$$

kde

$$\mathbf{u}^n = \mathbf{G}_a^{-1}(\mathbf{x})[\dot{\mathbf{x}}_a^w - \mathbf{f}_a(\mathbf{x}) - \mathbf{f}_a^w(\mathbf{e})], \quad (38b)$$

$$\mathbf{u}^r(t) = \mathbf{G}_a^{-1}(\mathbf{x})\mathbf{U}\text{sign}(\mathbf{s}). \quad (38c)$$

Ve vztahu (38c) mohou být použity místo nespojitě funkce (29d) její spojité aproximace (31) nebo (32).

Podobně jako v předchozím případě pro řízený nelineární dynamický systém (21) matematický model uzavřeného systému (16)

$$\mathbf{m}^w = \mathbf{0}$$

kde

$$\mathbf{m}^w = \dot{\mathbf{x}}_a^w - \mathbf{z}_a(\mathbf{x}, t) - \mathbf{f}_a(\mathbf{x}) - \mathbf{G}_a(\mathbf{x})\mathbf{u}, \quad (39)$$

kde funkce \mathbf{z}_a vyhovuje nerovnosti

$$\|\dot{\mathbf{x}}_a^w - \mathbf{z}_a\|_\infty < \kappa_1 > 0. \quad (40)$$

Pro Ljapunovovu funkci ve tvaru (36a) se pak dostane

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} = \mathbf{s}^T [\dot{\mathbf{x}}_a^w - \mathbf{z}_a - \mathbf{U}\text{sign}(\mathbf{s})] = \sum_{j=1}^m \dot{V}_j,$$

tj.

$$\dot{V}_j = s_j [\kappa_1 - u_j^m \text{sign}(s_j)] < 0 \Rightarrow u_j^m > \kappa_1 < \kappa. \quad (41)$$

6 Závěr

V příspěvku jsou pro nelineární dynamické systémy s neurčitostmi a neměřitelnými poruchami odvozeny algoritmy robustního řízení, které ke své činnosti nevyžaduje přesnou znalost jejich matematického modelu ani působících poruch. Navržené algoritmy řízení umožňují zajistit sledování zadané trajektorie s požadovanými vlastnostmi uzavřeného systému řízení.

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu SP2016/84.

7 Literatura

CEDRO, L. Application of differentiating filters to the identification and control of non-linear systems. Habilitation thesis, VŠB – TU Ostrava, 2016.

CHOI, Y., CHUNG, W. K. PID Trajectory Tracking Control for Mechanical Systems. Berlin: Springer-Verlag, 2004.

HORN, R. A., JOHNSON, CH. R. Matrix Analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.

KELLY, R., SANTIBANEZ, V., LORIA, A. Control of Robot Manipulators in Joint Space. 2nd ed., London: Springer-Verlag, 2005.

LEWIS, F. L., DAWSON, D. M., ABDALLAH, CH. T. Robot Manipulator Control. Theory and Practice. 2nd ed., New York: Marcel Dekker, 2006.

SLOTINE, J., LI, W. Applied Nonlinear Control. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.

UTKIN, V. Sliding Modes in Control and Optimization. Berlin: Springer-Verlag, 1992.

UTKIN, V., GULDNER, J., SHI, J. Sliding mode Control in Electromechanical Systems. London: Taylor & Francis, 1999.




VÍTEČEK, A., VÍTEČKOVÁ, M. Robust control of mechanical systems. In Proceedings of 16th International Carpathian Control Conference ICC^C 2015. May 27-30, 2015, Szilvásvárad, Hungary, pp. 575-579. ISBN 978-1-4799-7369-9

ZÍTEK, P., VÍTEČEK, A. Návrh řízení podsystémů se zpožděními a nelinearitami. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999.

Analýza nástrojů, prostředků a technik pro tvorbu WIS a jejich reálná aplikace

Analysis of Tools, Resources and Design Patterns for Design of WIS

VOJTEK, Tomáš¹ & DANEL, Roman²

¹ Ing.,  17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, VŠB-TUO FS 
tomas.vojtek@vsb.cz,  www.vsb.cz

² Ing., Ph.D.,  roman.danel@vsb.cz

Abstrakt: problematika tvorby webových informačních systémů je velmi rozsáhlá a pro tvorbu těchto systémů se užívá celá řada nástrojů, prostředků a technik. Ve svém příspěvku se pokusím tyto nástroje, prostředky a techniky popsat a vystihnout jejich poznané výhody a nevýhody. V příspěvku je uvedeno kompletní řešení ukázkového příkladu realizace webového informačního systému za použití rychlé tvorby prototypu. Tento systém bude sloužit pro sdílení zdrojů mezi univerzitami. Důležitou součástí příspěvku budou také doporučení, vycházející z mých nabytých zkušeností a vědomostí.

Klíčová slova: WIS, best practices, Nette, PHP, databáze, framework, MySQL

Úvod

Přestože je problematika tvorby webových informačních systémů velmi rozsáhlá, rozhodl jsem se na základě svých praktických zkušeností a teoretických vědomostí zabývat zejména šesti okruhy, souvisejícími s tvorbou WIS. Webové informační systémy a jejich specifika, analýza požadavků WIS, analýza nástrojů, služeb a softwarových postupů použitelných pro tvorbu WIS, přehled a zhodnocení metod tvorby WIS, ukázkový příklad realizace WIS a návrh "best practices" pro tvorbu WIS.

K tvorbě každého webového informačního systému je nutné zvolit vhodné nástroje, usnadňující vývoj systému a také podporující budoucí udržitelnost systému podle charakteru WIS.

1 Webové informační systémy a jejich specifika

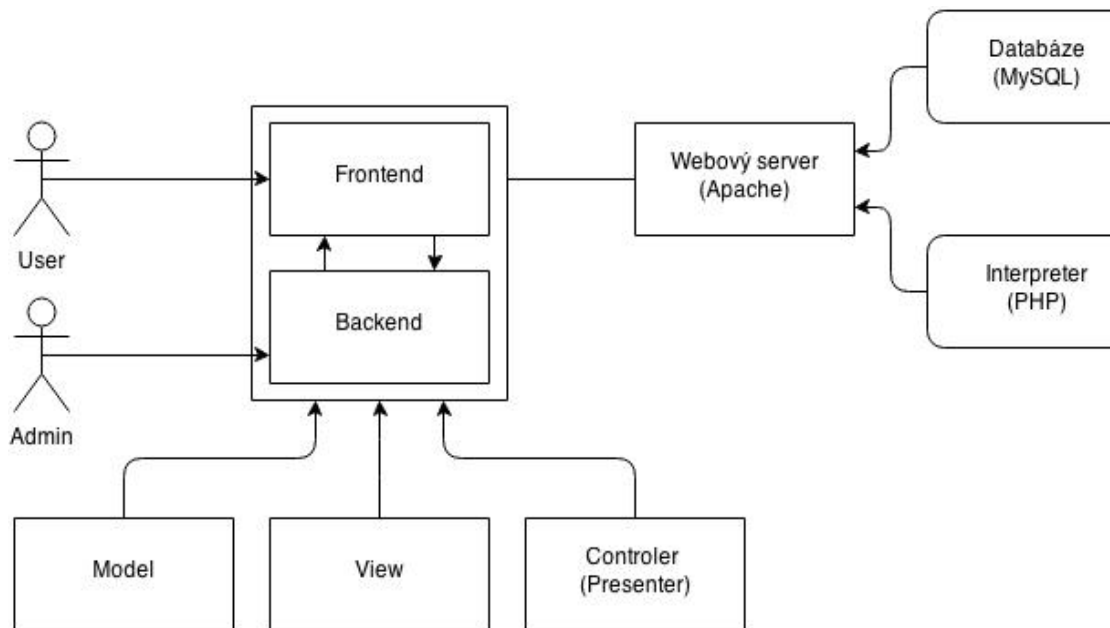
Webové informační systémy se od klasických informačních systémů liší především použitými technologiemi a způsobem prezentace dat a přístupností. Zatímco klasické pojetí informačních systémů odpovídá prezentaci informací pro určitou uzavřenou skupinu jedinců s přístupem do systému lokálního charakteru, jsou WIS dostupné prakticky odkudkoliv skrze webové rozhraní prohlížečů. Je nutné si uvědomit, že webové informační systémy mohou existovat samostatně nebo ve formě nástavby jiného informačního systému.

WIS se běžně skládá z těchto částí:

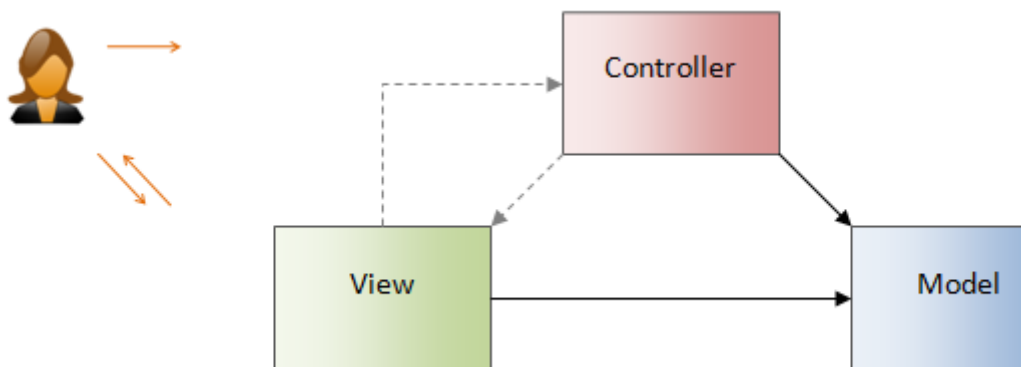
- Dissatisfier (nutnost) - samozřejmost
- Satisfier (požadované funkce) - spokojenost
- Exciter (funkce navíc) – nadšení

1.1 Struktura webového informačního systému

Struktura webového informačního systému se liší dle jeho realizátora. Doporučenou a nejčastěji používanou strukturou podporující znovupoužitelnost komponent a snadnou orientaci ve zdrojových kódech aplikace je architektura MVC (respektive MVP), což je zkratka pro strukturu Model-View-Controller (potažmo presenter). Na obrázku níže můžeme vidět běžnou strukturu webového informačního systému s použitím MVC (viz Obr. 1). Architektura MVC (MVP) rozděluje aplikaci na 3 logické části, aby bylo možné každou část upravit samostatně a byly minimalizovány dopady na ostatní části



Obrázek 1 – struktura webového informačního systému



Obrázek 2 – architektura MVC (www.zdrojak.cz)

1.2 Možná bezpečnostní rizika

Skvělá přístupnost webových informačních systémů má své výhody, ale také nevýhody, které není možné přehlížet. Tyto systémy musí mnohem více řešit stránku zabezpečení, autentizace a autorizace.

Autentizace: uživatel prokáže svou totožnost prostřednictvím hesla, otisku prstu apod.

Autorizace: každý uživatel je oprávněn k určitým úkonům odpovídajícím přiřazené roli, kterou zastává. U WIS rozeznáváme zdroje, akce, oprávnění a role.

SQL Injekce

Jde o jednu z nejčastějších zranitelností webových aplikací, která umožňuje útočnickovi získat přístup do databáze a tím získat některé specifické informace. Často je cílem tohoto útoku získat uživatelská jména, hesla a emaily nebo aplikaci uvést do nepoužitelného stavu (smazání obsahu databáze, podstrčení jiných dat). Pod tímto pojmem se skrývá podvržení vstupních dat z formulářů nebo jiných vstupů s cílem změnit výsledek SQL dotazu. Tato chyba se nachází v mnoha webových aplikacích, a proto jsou ohroženy.

Cross-Site Request Forgery

Tento typ útoku na aplikaci je známý pod zkratkou CSRF. Podstata útoku spočívá v tom, že uživatele nalákáme na stránku aplikace napadené škodlivým kódem, která provádí v pozadí nějakou akci, aniž by to uživatel věděl. Útok tak bývá nejčastěji veden proti aplikacím, kde se útočník může sám přihlásit a zjistit tak strukturu aplikace, nebo proti aplikacím, jejichž zdrojový kód je veřejně přístupný (například redakční systémy CMS atpod.). Ani ostatní aplikace však nemusí být dostatečně chráněny. Někdy je možné názvy operací uhodnout a poté není nic snazšího, než je přidat do odkazu.

2 Nástroje pro tvorbu WIS

V rámci usnadnění práce a lepšího pochopení vztahů ve složitých systémech, převyšujících mentální schopnosti člověka, se při tvorbě WIS využívá řada nástrojů a podpůrného software. V této části jsou popsány nejčastěji používané nástroje a nastíněny jejich výhody a nevýhody.

Webový server

Důležitým nástrojem pro tvorbu webového informačního systému nebo také prostředkem je software webového serveru. Bez tohoto softwarového prostředku by tvorba nebyla možná. Díky předkonfigurovaným balíčkům webových serverů můžeme lokálně vyvíjet celou aplikaci a poté ji umístit do cílové destinace. Při vývoji systému je aplikace přístupná pouze z adresy: „http://localhost/“ a následně je přesunuta do produkčního prostředí. Nejsme však vázáni využívat pouze předkonfigurované balíčky, můžeme si webový server nakonfigurovat a rozšířit sami.

Mezi tyto prostředky patří:

- Apache
- IIS
- Nginx
- GWS
- Ostatní

Editor zdrojového kódu

Pro zápis zdrojového kódu (PHP, HTML, JS, CSS) je využíván preferovaný textový editor. Zdrojový kód je možné psát i v obyčejném poznámkovém bloku, ale ztrácíme tak přehlednost a hůře se nachází chybný úsek kódu.

Mezi nejčastější základní funkce editorů patří:

- Změna odsazení bloku
- Barevné zvýraznění syntaxe

- Skrytí vybraných úseků kódu
- Pokročilé vyhledávání a nahrazování
- Popis metod daného programovacího jazyka
- Zvýraznění chybných výrazů
- Změna kódování dokumentu
- Hlídaní neuzavřených tagů

Mezi nejpoužívanější patří např.:

- PSPad
- Notepad++
- NetBeans
- Notepad

FTP klient

Pro přístup k souborům uloženým jinde než na lokálním webovém serveru se přistupuje skrz FTP (anglicky File Transfer Protocol) klient nebo přes webový FTP klient. Těchto klientů existuje velké množství, níže uvádím některé z nejpoužívanějších.

Mezi nejpoužívanější patří např.:

- FileZilla
- Total Comander
- CuteFTP
- LeechFTP
- FireFTP

Case nástroje

Název těchto nástrojů vychází z anglického spojení Computer Aided Systems Engineering, což v překladu znamená počítačem podporované softwarové (systémové) inženýrství nebo vývoj software s využitím počítačové podpory.

Pro analýzu a následnou realizaci jsou tyto nástroje často používány pro ujasnění požadavků a pochopení souvislostí.

Spadají zde:

- MySQL Workbench (modelování relační databáze)
- Navicat Premium (správa databází)
- Visual Paradigm (nástroje pro modelování IS)
- Online generátory (různé pomůcky pro tvorbu kaskádových stylů, Sociální pluginy, Sdílení, Online mapy, Google API – Jsapi, API generátoru QR kodů a mnohé další)

3 Softwarové postupy

V tomto bodě se zaměřím především na postupy při realizaci WIS z úhlu pohledu realizátora, který má podklady z analýzy požadavků.

UI

UI neboli česky uživatelské rozhraní, tvoří strukturu, přes kterou uživatel komunikuje se systémem. Tato struktura by měla být co nejvíce uživatelsky přívětivá

a jednoduchá na ovládání. Pokud bude rozhraní příliš složité, bude znepríjemňovat až znemožňovat práci se systémem.

Framework

Naprogramovaná struktura nebo také „kostra“ systému postavená na konkrétním programovacím jazyce. Jde o nastavbu nad daným programovacím jazykem, která ulehčuje realizátorům práci a zároveň podporuje budoucí udržitelnost systému (viz Obr. 9). Použitím frameworku je možné využívat již existující komponenty a integrovat je do aplikace namísto jejich tvorby, což příznivě ovlivňuje rychlost tvorby systému.

3.1 Využití již existujících komponent

Ať už se jedná o grafickou nebo funkční stránku WIS, může realizátor využít existující úseky kódů. Téměř každý problém již někdo řešil, a proto je na internetu možné nalézt nespočet komponent plnící námi řešený problém. V případě funkční stránky systému jde

o různé třídy, kde stačí znát a využívat poskytované metody. Po grafické stránce je například možné zdarma sehnat zpracované CSS menu, které si přizpůsobíme dle vlastních potřeb. Pokud se rozhodneme využít pro stavbu WIS framework, můžeme využít existujících modulů řešících konkrétní problematiku. Každý framework poskytuje svá vlastní rozšíření.

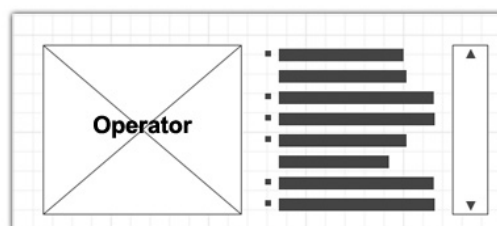
V případě celých funkčních komponent je zde riziko spojené s využíváním skriptů třetích stran (nikdo nám nezaručí kvalitu a bezchybnost daných komponent).

V mnoha případech se nevyplatí vyrábět danou komponentu od základu a lze se poohlédnout po existujícím vhodném řešení.

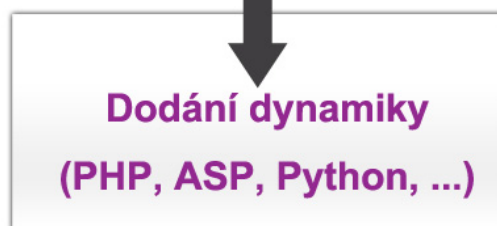
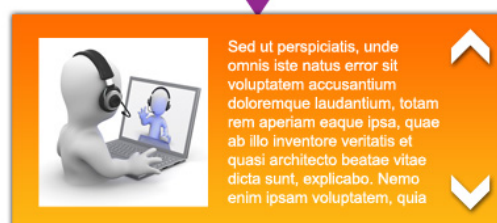
3.2 Tvorba uživatelského rozhraní (UI)

Během analýzy jsou většinou vytvořeny takzvané drátěné modely (wireframe), které slouží jako podklad pro tvorbu uživatelského rozhraní. Tyto modely jsou doprovázeny taktéž představami zadavatele na jejich funkci. Tvorba uživatelského rozhraní se skládá z grafického návrhu jednotlivých obrazovek, vycházející z wireframe, následně je návrh převeden do HTML + CSS. V případě nutnosti se dodá interaktivita prostředím prostřednictvím Javascriptu (dále jen JS) a dodá se potřebná dynamika systému serverovými programovacími jazyky (viz Obr. 3).

Wireframe + preference



Grafický návrh



Obrázek 3 – Role Frameworku

3.3 Tvorba databázové struktury

ERD

Při analýze je vytvořen entitně-relační diagram, který udává podobu databázové struktury. Tento diagram je postupně rozšiřován o další entity a jejich atributy. Je základem pro tvorbu RDM.

RDM

Relační datový model vychází z ERD. Oproti ERD jsou zde již konkrétní datové typy jednotlivých atributů. Celé schéma již neobsahuje diakritiku a vztahy mezi entitami M:N jsou rozděleny pomocnou entitou. RDM je vytvářen již v konkrétním software. Pro SRBD MySQL je zdarma k dispozici software MySQL Workbench, ze kterého lze po dokončení návrhu diagram rovnou převést do databáze, která je součástí software webového serveru. Po dobu realizace systému se RDM mění a je potřeba udržovat aktuální verzi uložené databázové struktury. Je nutné dávat pozor na správnost provedení synchronizace modelu s databází z důvodu výskytu chybných přenosů. Relační datový model popisuje databázovou strukturu a její vlastnosti i manipulaci s daty pomocí matematických pojmů především z teorie množin a matematické logik

3.4 Tvorba řídicích skriptů systému (Backend a Frontend)

Po návržení podoby uživatelského prostředí a návržení databázové struktury je potřebné vytvořit řídicí strukturu, která bude zprostředkovávat uživatelské podněty, vracet příslušná data a poskytovat žádané funkce. Skripty WIS je možné psát buď čistě ve zvoleném programovacím jazyce (např. PHP, ASP, Python aj.) nebo je možné využít některý z existujících frameworků, který tvoří určitou nastavbu nad zvoleným programovacím jazykem. Využití frameworku nabízí mnoho již zmíněných výhod. Jednotlivé části struktury jsou vytvářeny ve zvoleném editoru zdrojových kódů. Na obrázku níže můžeme vidět pozici frameworku v popsané struktuře (viz Obr. 4).



Obrázek 4 – pochopení role frameworku

4 Přehled a zhodnocení metod tvorby WIS

Metod tvorby WIS potažmo všech IS je mnoho, rozhodl jsem se popsat především nejpoužívanější metody, a metody, s nimiž jsem se v praxi setkal. U WIS je velmi častá nutnost co nejrychlejšího nasazení systému, proto je největší důraz kladen na funkce s vysokou prioritou, které utváří jádro systému. Je nutné zdůraznit, že WIS z většiny případů nebývají tak rozsáhlé jako klasické IS, a tudíž jsou pro ně příliš komplexní metodiky nevhodné. Webové informační systémy se liší od komplexních podnikových IS rozsahem, objemem dat a účelem.

4.1 Napiš – oprav

Tato programátorská metoda se dá charakterizovat výrazem „napiš a oprav“, kdy je nejprve co nejrychleji naprogramována dynamická část systému (řídicí skripty), a následně se vyhledávají chyby, které jsou opraveny. Tato metoda má jednu velkou nevýhodu, která vychází z tvrzení: „při opravení jedné chyby vzniknout alespoň dvě další“. Často se ukazuje toto tvrzení jako pravdivé. Dodávka systému bývá formou tzv. „velkého třesku“, kdy i za funkčního nasazení systému jsou stále nacházeny chyby ve funkčnosti.

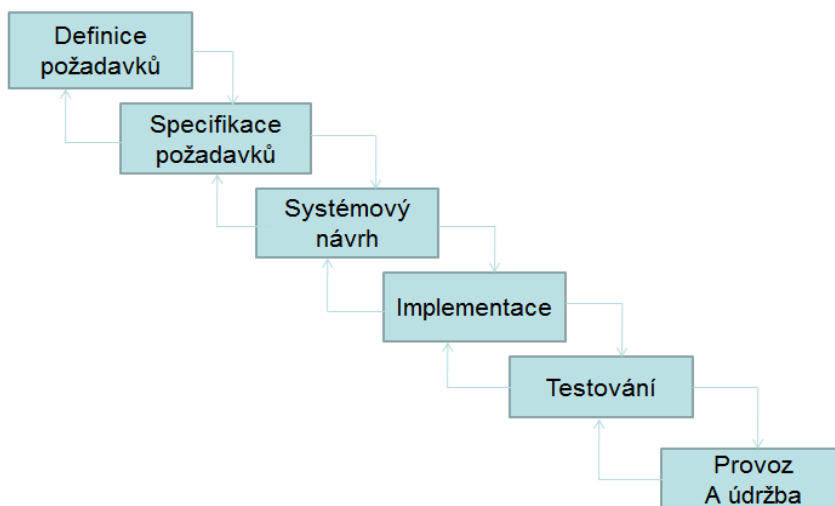
Příklad:

Zjistíme, že máme v názvu proměnné `$userNme` s mnoha výskyty (které si neuvědomíme) chybu, a opravíme název na `$userName` pouze v určitém úseku. Následně zjistíme, že v ostatních úsecích počítá skript se starým názvem proměnné, a tato změna nám ve výsledku způsobí několik dalších chyb.

V průběhu přibývání nových funkcí systému je nutné testovat vždy funkce nové i stávající.

4.2 Vodopádový model (waterfall)

Každá etapa má stanovený přesný cíl a také má nadefinováno, jaké dokumenty musí v průběhu tvorby vzniknout. Při ukončení dané etapy je vytvořeno vyhodnocení a následně dojde k přepracování nebo opravám. Nyní je zde možnost vrátit se zpět do předchozí etapy. Dále se pokračuje pouze v případě, kdy je daná etapa zcela dokončena a schválena. Pokud již je daná etapa jednou schválena, není již možné se vracet. Výhodami jsou jednoduchost modelu „vodopád“, ideální využití pro řízení a vnášení disciplíny do vývoje.



Obrázek 4 – vodopádový model (Roman Danel)

4.3 Striktní posloupnost fází (Stagewise model)

Jak již název napovídá, je tato metodika založena na striktní posloupnosti fází. Nejprve je definován problém a je udělána analýza. V dalším kroku jsou specifikovány požadavky. Následuje návrh, zvolení architektury, implementace systému, testování a následný provoz. Tato metodika má absenci zpětné vazby, neprovádí se revize žádné fáze, nerevidují se požadavky ani se nehledají rizika. Výhody této metodiky vidím především v jednoduchosti při použití u účelových systémů bez změny požadavků v průběhu tvorby.

4.4 Rychlá tvorba prototypu

Jedná se o jednu z běžných metod tvorby, kdy je po počáteční analýze požadavků vyrobena částečně funkční kostra systému, která je předvedena zadavateli a po konzultaci upravena dle dalších požadavků. Po předvedení částečně funkčního prototypu zadavatel získá mnohem lepší představu o výsledném systému a je schopen lépe formulovat předchozí požadavky nebo také vyvstanou požadavky, které dosud nebyly známy nebo si je zadavatel neuvědomoval. Prototyp je postupně rozšiřován o nové funkce, graficky přizpůsoben až do doby, kdy již zahrnuje všechny stanovené požadavky. Výhodou je postupná dodávka systému,

kdy se zadavatel aktivně účastní tvorby systému dle jeho představ a představ koncových uživatelů.

Tato metoda se vyhýbá dodávkám ve stylu tzv. „velkého třesku“. Jediným způsobem, jak prověřit správnost navrhovaného systému, je co nejdříve jej vyvinout, předložit zákazníkovi a na základě zpětné vazby upravovat. Oproti implementačním scénářům před desítkami let, kdy na projekt bylo dostatek času a finančních prostředků, je dnes tlak na krátkou dobu vývoje a co nejnižší investici.

4.5 Extrémní programování

Jedná se o agilní metodiku vývoje software, která předepisuje specifické činnosti všem účastníkům zapojeným do vývojového procesu tvorby software. Tradiční činnosti jsou zde dovedeny do extrému. Díky tomu je extrémní programování schopné přizpůsobit se změnám požadavků zadavatele v průběhu tvorby systému. Výhodou je zde specifická vlastnost metodiky, a to sice dodávání software vyšší kvality. Je zde kladem důraz na čtyři hodnoty: komunikace, jednoduchost, zpětná vazba, odvaha. Hlavní myšlenkou je používání osvědčeného v maximální možné míře.

4.6 Vývoj řízený užitnými vlastnostmi (Feature Driven Development)

Vývoj zde řídí samotné vlastnosti produktu a mají zde hlavní roli. Vlastnost neboli „feature“ je malá konkrétní funkčnost užitečná z pohledu zadavatele. Vždy je brána v potaz měřitelnost, srozumitelnost a realizovatelnost těchto funkčností. Tato metodika je vhodná zejména pro menší projekty.

Zhodnocení

Pro tvorbu WIS se mi osvědčil jako nejlepší přístup rychlé tvorby prototypu pro malé až střední rozsahy systémů. V praxi se však můžeme setkat i s častým využitím metodiky „Najdi – oprav“, což odporuje základnímu předpokladu dlouhodobější udržitelnosti realizovaného systému. Využití ostatních metod a metodik se odvíjí od rozsahu a účelu každého navrhovaného systému. Ke každému systému je nutné přistupovat individuálně.

5 Ukázkový příklad realizace WIS

Pro ukázkový příklad realizace WIS, jsem si vybral systém pro sdílení zdrojů mezi univerzitami EARN. Tento WIS byl vyvinut, testován a je nyní reálně nasazen. Mou úlohou v tomto projektu bylo analyzovat požadavky, vytvořit UI včetně grafického zpracování a realizovat dynamiku systému včetně databázové struktury. Pro realizaci tohoto WIS byla využita metoda tvorby „rychlé vytvoření prototypu“, která spočívala v co nejdříve vývoji první podoby systému a následně byly postupně upřesněny požadavky a vize.

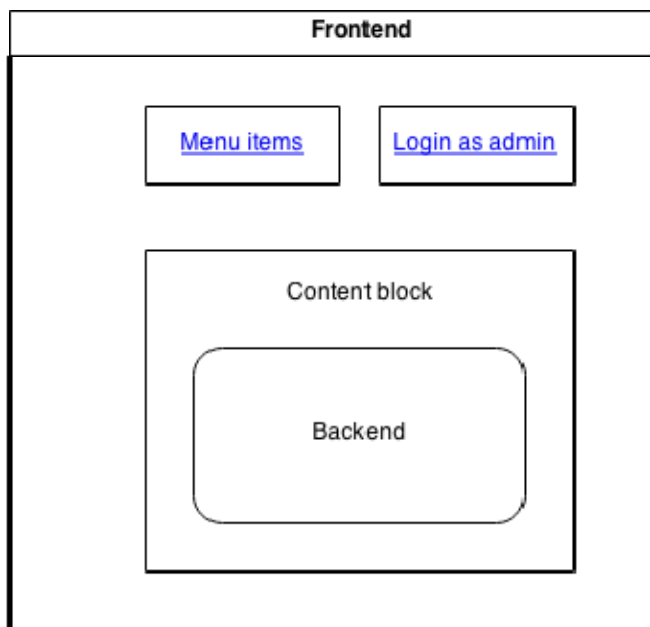
5.1 Analýza požadavků a zhodnocení stávajícího stavu a posouzení realizovatelnosti

Sepsáním seznamu požadavků na zamýšlený systém a stanovením priorit těchto požadavků, dostaneme přibližnou představu o budoucím systému. Požadavky se v průběhu tvorby mění, upravují nebo odstraňují, nejsou tedy všechny známy najednou. Teprve až po vývoji prototypu vyvstalo mnoho nových požadavků a změn. Celkem bylo

Po posouzení realizovatelnosti všech požadavků, kdy jsou brány v potaz dostupné technologie, časová náročnost a uvážení přínosu pro koncové uživatele, jsou nejprve realizovány požadavky s nejvyšší prioritou, tvořící jádro systému. Poté je částečně funkční jádro systému předvedeno zadavateli a společně s analytikem konzultován další vývoj systému.

5.2 Volba struktury systému

Za normálních okolností by byla struktura systému striktně rozdělena na oddělený frontend a backend, zde však s přihlédnutím na rozsah administrace a požadavek na multijazyčnost systému, byl backend zakomponován do frontendu. Tento krok přinesl výhody, jako jsou: nutnost pouze jedné šablony, jednodušší orientace ve struktuře a neustálou přítomnost uživatele ve frontendu.



Obrázek 5 – backend umístěný ve frontendu

5.2 Posouzení dodaných podkladů

K požadavkům na systém byl dodán již vytvořený grafický návrh převedený do HTML. Po prvotním zhodnocení jsem se rozhodl požádat o původní grafický návrh, který jsem následně uvedl do nové podoby. K tomuto rozhodnutí vedlo několik dílčích zhodnocení dodané šablony systému:

- 1) Nekonzistentní struktura – důraz byl kladen na špatné prvky a vzhled působil poněkud chaoticky.
- 2) Některé texty byly součástí obrázků, což znemožňovalo manipulaci s texty v případě překladů a rovněž to nebylo optimální pro internetové vyhledávače.
- 3) Struktura nepodporovala větší rozlišení.
- 4) Pro zamýšlené použití frameworku a jeho šablonovacího systému bylo jednodušší vytvořit návrh znovu, než upravovat stávající.
- 5) Každý programátor má trochu jiné představy a návyky, jak by měla struktura a grafický vzhled WIS vypadat.

K požadavkům byl rovněž dodán koncept databázové struktury. Koncept byl konzultován, a byly z něj převzaty názvy atributů a entit. Poté byly mezi entitami vytvořeny vztahy a byl vytvořen nový relační datový model založený na zjištěných entitách a jejich attributech.

Při vytváření nového RDM došlo k špatně odhalitelné chybě, která vznikne, pokud název některého atributu nese nebo obsahuje název stejný jako tzv. „rezervovaná klíčová slova“ jazyka SQL.

Příklad:

Pokud nazveme atribut **whenDate**, bude si SŘBD myslet, že je použito klíčové slovo WHEN, které je (stejně jako klíčová slova: WHERE, FOR, IF atpod.) rezervováno pro funkce daného programovacího jazyka.

V dodaném konceptu výsledné databáze byly pro atributy správně použity prefixy (například: event_whenDate), které zabraňují výše popsaným konfliktům. Při přepisu schématu se však vytratily.

5.3 Tvorba databázové struktury

Tvorba databázové struktury se skládala z analyzování dodaných podkladů, a následném zahrnování potřebných entit a jejich atributů s přihlédnutím na zamýšlenou strukturu systému (jak bude systém nakládat s daty). V dalším kroku byly mezi sebou entity provázány příslušnými vztahy, určeny datové typy atributů a byly vytvořeny data, která budou některé entity statického charakteru obsahovat (uživatelské role, názvy zemí, typy služeb). V průběhu tvorby systému se databáze edituje a rozšiřuje.

Příklad předpřipravených dat pro některé entity:

```
//role
```

```
INSERT INTO `earn`.`roles` (`role_id`, `name`) VALUES (1, 'user');
INSERT INTO `earn`.`roles` (`role_id`, `name`) VALUES (2, 'student');
INSERT INTO `earn`.`roles` (`role_id`, `name`) VALUES (3, 'company');
INSERT INTO `earn`.`roles` (`role_id`, `name`) VALUES (4, 'partner');
INSERT INTO `earn`.`roles` (`role_id`, `name`) VALUES (5, 'admin');
```

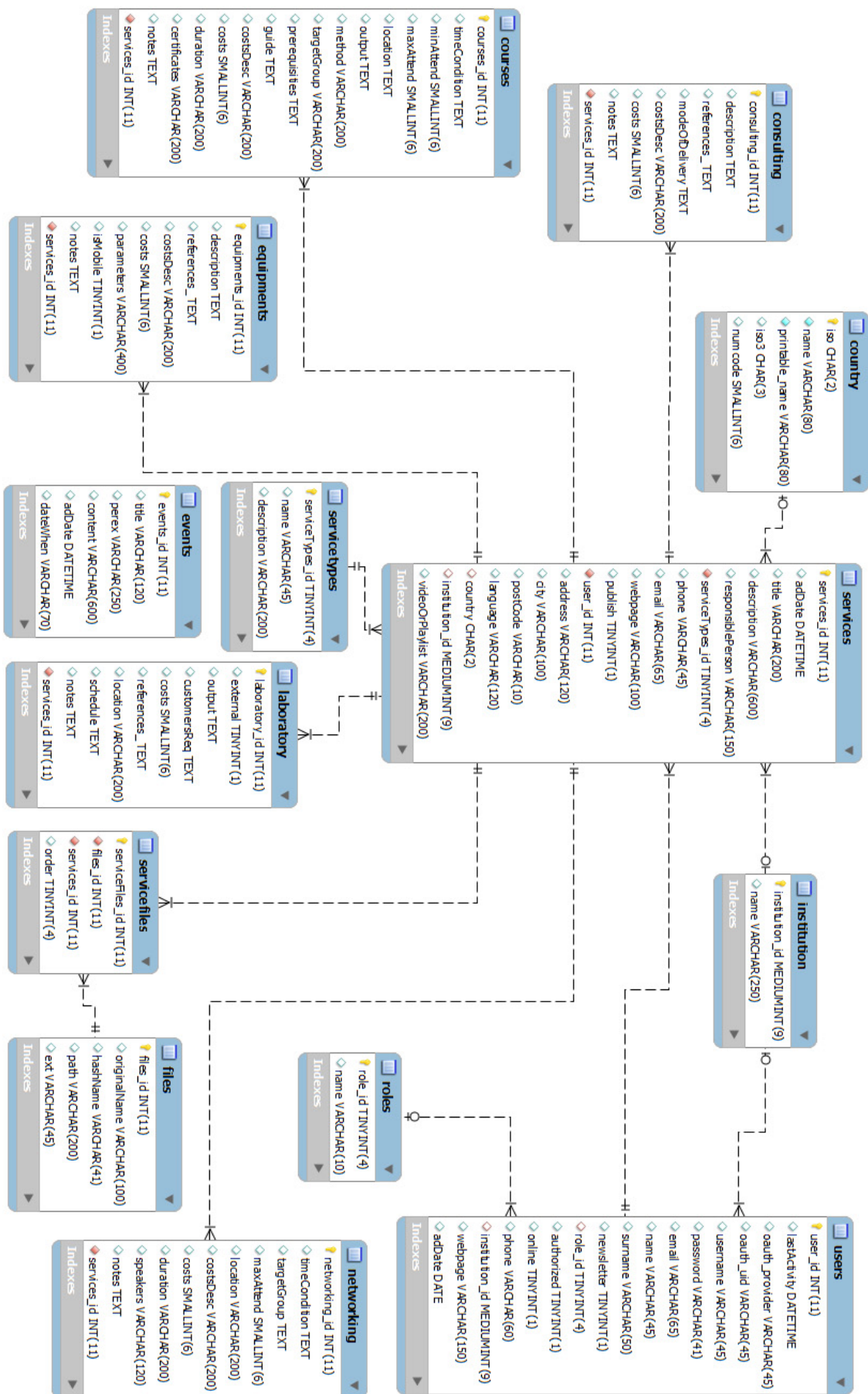
```
//typy služeb
```

```
INSERT INTO `earn`.`serviceTypes` (`serviceTypes_id`, `name`, `description`)
VALUES (1, 'Courses', 'Course, training');
INSERT INTO `earn`.`serviceTypes` (`serviceTypes_id`, `name`, `description`)
VALUES (2, 'Consulting', 'Consulting, how-know ');
INSERT INTO `earn`.`serviceTypes` (`serviceTypes_id`, `name`, `description`)
VALUES (3, 'Laboratory', 'Laboratory, measurement, prototype, product');
INSERT INTO `earn`.`serviceTypes` (`serviceTypes_id`, `name`, `description`)
VALUES (4, 'Networking', 'Conference, workshop, panel discussion');
INSERT INTO `earn`.`serviceTypes` (`serviceTypes_id`, `name`, `description`)
VALUES (5, 'Equipments', 'Equipments, measurement, testing');
```

```
//institute
```

```
INSERT INTO `earn`.`institution` (`institution_id`, `name`) VALUES (1,
'JAMK University');
INSERT INTO `earn`.`institution` (`institution_id`, `name`) VALUES (2,
'Fachhochschule Vorarlberg');
INSERT INTO `earn`.`institution` (`institution_id`, `name`) VALUES (3,
'Hochschule Esslingen');
INSERT INTO `earn`.`institution` (`institution_id`, `name`) VALUES (4,
'VB-Technical University');
```

V prvním kroku jsou vytvořeny entity související s jádrem systému, všechny ostatní entity jsou od těchto základních entit odvozeny.

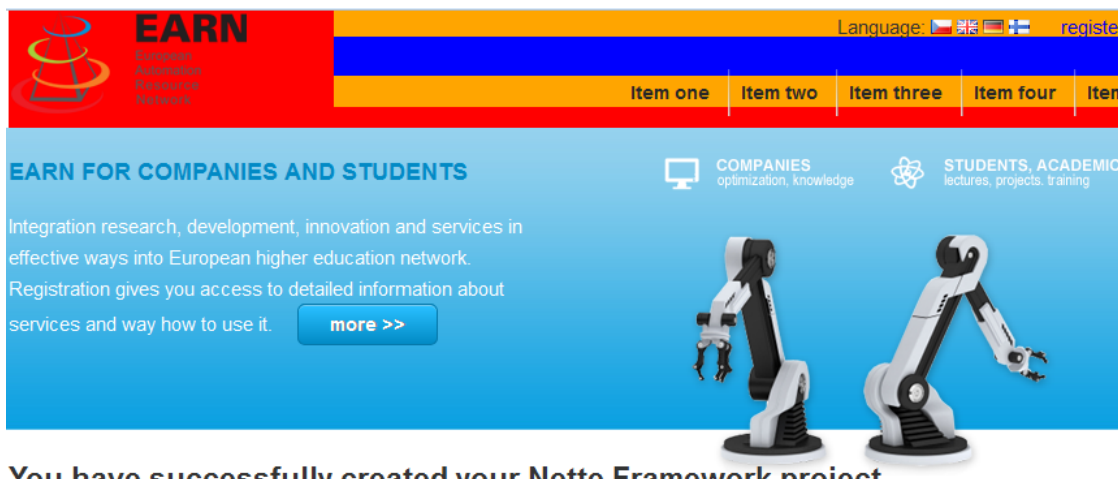


Obrázek 6: finální RDM

5.4 Realizace

Pro realizaci WIS Earn jsem se rozhodl využít PHP Framework Nette. Důvodem tohoto rozhodnutí byla existence potřebných rozšíření poskytovaných komunitou spojenou s frameworkem a také existencí mnou již vytvořených komponent a struktur. Framework podporuje architekturu MVC a jeho integrovanou součástí je i šablonovací systém s názvem Latte.

V prvním kroku realizace prototypu bylo nutné rozbalit a zprovoznit zamýšlený Framework na lokálním webovém serveru. Následně byla šablona utvářena přímo ve struktuře frameworku. Nejdříve byla vybudována stránka `@layout_en.latte`, která symbolizuje hlavní šablonu, do níž se budou následně includovat (vkládat) ostatní pohledy (viz Obr.níže).



You have successfully created your Nette Framework project.

5.5 Tvorba presenterů a modelů

Presentery, nebo také jinak řečeno controllery, představují jednu z nejdůležitějších složek WIS. Všechny požadavky uživatele jsou kladeny právě na příslušné presentery. Uživatel zašle požadavek a příslušná data, presenter čerpá data skrze model z databáze a následný výstup je uživateli poskytnut přes pohledy (jednotlivé šablony).

V této konkrétní aplikaci byla zvolena struktura složená z šesti řídicích presenterů:

- BasePresenter
- ErrorPresenter
- SignPresenter
- SecuredPresenter
- HomepagePresenter
- MyAccountPresenter

Modely slouží primárně pro získávání dat z libovolného uložště. Může se jednat o datové soubory nebo databázi, nejčastěji modely získávají data z databáze. Presentery prostřednictvím modelů obstarávají potřebná data.

V této struktuře bylo použito těchto modelů:

- BaseModel
- UserModel
- MyAccount

- Homepage

5.6 Oprava chyb a optimalizace

V průběhu tvorby systému vzniká řada chyb. Chyby mohou být logické nebo syntaktické. Zatímco syntaktické chyby jsme schopni testováním odhalit poměrně rychle, logické chyby nemusí být zprvu vůbec patrné. Je nutné myslet na to, že pokud opravíme nalezenou chybu, můžeme tím způsobit N dalších chyb, aniž bychom si to uvědomili.

Během tvorby a pravidelného testování funkčnosti bylo odstraněno pro WIS tohoto rozsahu běžné množství syntaktických a malé množství logických chyb (logické chyby se zde vyskytly řádově v jednotkách výskytů).

Pokud bude, nebo by v budoucnu mohl být kladen požadavek na multijazyčnost WIS, je nutné s tímto aspektem dopředu počítat a navrhnout adekvátně strukturu systému. Pozdější doplnění multijazyčnosti prezentace je samozřejmě možné, nýbrž mnohem komplikovanější. Při znalosti tohoto požadavku je nutné přizpůsobit zejména strukturu šablon, dle označení příslušných jazyků jsou doplněny prefixy názvu souborů hlavních šablon atpod. Ve mnou realizovaném WIS, byl požadován jako hlavní jazyk angličtina, pro systémové prvky jakou jsou například formuláře a popisy datagridů. Pro ostatní jazyky byly vyrobeny konkrétní šablony s přeloženým obsahem. V tomto konkrétním případě vznikl požadavek na překlady obsahu do angličtiny, němčiny, finštiny a češtiny.

Optimalizace

Každá jazyková mutace má jiný počet znaků ve slovech, to způsobuje „rozhození“ dizajnu UI. Po doplnění překladových šablon (pohledů) je důležité vše zkontrolovat a upravit vždy pro konkrétní jazykovou mutaci. Na ukázce níže můžeme vidět úpravu hlavní šablony pro finský jazyk. V lokacích, kde text vystupoval ze svého rodičovského prvku, musela být modifikována velikost textu.

6 Best practices

Dobu, po kterou vytvářím webové informační systémy, jsem si osvojil celou řadu způsobů jak aplikaci navrhovat a vytvářet efektivněji. Již mám za sebou asi desítku realizací konkrétních webových informačních systémů a vždy se mi oplátilo dodržování těchto zásad a postupů.

6.1 Znovupoužitelný kód

Je důležité zdrojové kódy vhodně komentovat a vytvářet tak, jako bychom je chtěli znovu použít v jiném projektu. Webové informační systémy mají vždy společné rysy, pro které je vhodné využít již existující naprogramovaný kód. Tento znovu používaný kód má mimo jiné výhodu v tom, že již prošel funkčními obdobími a prošel zcela jistě mnoha zdokonaleními. Ne vždy je toto tvrzení pravdivé, v některých případech můžeme zavést do systému například zapomenutou chybu.

6.2 Návrhový vzor KISS

Přístup KISS vychází z anglického spojení *Keep It Simple, Stupid!* (tj. „Zachovej to jednoduché, hlupáku!“). Tímto přístupem je řečeno, že čím více jsou systémy vytvořeny složitě, tím hůře se udržují a tím více jsou poruchové. Je zde snaha vytvořit každý modul, každou jednotlivou funkci vytvořit nejjednodušším, nejvíce transparentním způsobem.

Mnohdy jsem napřed vymyslel velmi složitě fungující modul, který počtem řádků zdrojového kódu připomínal Bibli. Když jsem se na problematiku podíval z jiného úhlu pohledu, přišel jsem na řešení, které je mnohem jednodušší a bezproblémové.

6.3 Využití vhodných softwarových prostředků

Pro úspěšnou a kvalitní realizaci je využití vhodných softwarových prostředků rozhodující. Nestačí mít pouze dobrý přehled o zamýšleném systému a znalosti k jeho tvorbě. Aktivní podpora tvorby systému vhodným software urychlí dobu realizace, pomáhá vytváření kvalitnější struktury a zjednodušuje práci realizátorům i analytikům.

6.4 Využití existujících komponent a API

Téměř vše již někdo před vámi řešil, je zde tedy předpoklad, že se můžete jeho řešením inspirovat, případně, pokud autor poskytuje hotové řešení například v podobě třídy s metodami nebo rozšiřujícího modulu, můžete zvážit jeho využití.

Využití „polotovarů“ UI

Tvorbou uživatelského rozhraní se zabývá obrovské množství designérů z celého světa a poskytují zdarma „polotovary“ různých CSS menu, šablon, formulářů, tabulek atpod., které je možné jednoduše přizpůsobit potřebám zadavatele a není nutné je vytvářet celé znovu. U tvorby UI jde o velmi často se opakující úkony, tvorba menu patří mezi velmi frekventované činnosti.

Využití API

Ať už se jedná o aktuální měnové kurzy, tvorbu javascriptového UI, počasí, mapy nebo generování QR kódu, můžeme v dnešní době využívat zmíněné software třetích stran skrze API (zkratka pro Application Programming Interface) označující v informatice rozhraní pro programování aplikací. Prostřednictvím API tedy získáváme požadovaná data.

6.5 Předvídání požadavků

Zkušenosti z předchozích realizací jsou velmi přínosné a pomáhají analytikovi i realizátorovi předvídání některých budoucích požadavků. Tento nadhled zabraňuje nenaplněným očekáváním zadavatele a upevňuje důvěru zadavatele v dodavatelskou společnost.

6.5 Modularita systému a tvorba šablon

Pro podporu kontinuálního vývoje a rozšiřování systému o nové funkční celky je velmi výhodné koncipovat systém jako modulární. Modulární systém také podporuje znovupoužitelnost komponent. Téměř všechny CMS a frameworky aktivně podporují modularitu aplikace. Pro zadavatele i realizátora je výhodnější napsat aplikaci, která bude rozšiřitelná v budoucnu, než monolitický systém, který bude obsahovat všechny možné funkce.

Pro tvorbu šablon se mi osvědčilo používání šablonovacích systémů, které zpřehledňují výsledný zdrojový kód a zároveň oddělují logiku aplikace od jejího dizajnu. Šablonovací systémy můžeme používat jak samostatně, tak jako součást námi preferovaného frameworku. Šablonovací systémy používají pro nahrazování aplikační logiky specifické symboly pro otevření a uzavření tagu.

6.6 Změnové řízení během vývoje

Aby nedošlo k nenaplněným očekáváním a byly eliminovány logické a syntaktické chyby v aplikaci, je důležité po přidání nových funkčních bloků jak nově vzniklé funkce tak ty stávající. Je zde totiž možnost, že nově přidaný funkční blok naruší funkce jiného funkčního bloku. Dalším důležitým krokem je vyhradit si dostatečně dlouhý záložní interval na testování celé aplikace zadavatelem a budoucími uživateli po odevzdání aplikace. Nikdy není aplikace

po dokončení stoprocentní. Některé logické chyby odhalí zadavatel až po delším prozkoušení aplikace.

Zadavatel

Zná problematiku své společnosti a umí popsat průběh a stavy výrobního či jiného procesu, jež se v ní vyskytují. Nerozumí technologiím a prostředkům používaným při tvorbě WIS.

Realizátor, analytik

Znají dostupné prostředky i technologie, neznají však know-how zadavatele.

Závěr

Pro ukázkovou tvorbu WIS bylo využito metody „rychlá tvorba prototypu“ za pomoci softwaru pro tvorbu RDM MySQL Workbench, Nette frameworku, Notepadu++ a ostatních pomocných softwarových nástrojů. Tvorba WIS je velmi rozsáhlou a komplikovanou disciplínou a nelze ji shrnout pouze několika větami.

Použitá literatura

BURIAN, P. Webové a agentové technologie. Praha: Grada Publishing, 2012. 376s. ISBN: 978-80-247-4376-9

BOREK, B. Úvod do architektury MVC. [online]. 7. 5. 2009 Dostupné z: <http://www.zdrojak.cz/clanky/uvod-do-architektury-mvc/>

BECK, K. Extreme Programming Explained: Embrace Change, 2004, 190s, ISBN 0201616416, 9780201616415

DANEL, R. Vývoje IS a úvod do metodik vývoje SW. [online]. 1. 3. 2012 Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~dan11/is2011/4%20Informacni%20systemy%20-%20SW%20inzenyrstvi.ppt>

DANEL, R. Pořízení a implementace informačního systému. [online]. 4. 5. 2011 Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dan11/is_skripta/IS%202011%20-%20Porizeni%20a%20implementace%20IS.pdf

DANEL, R. Bezpečnost informačních systémů. [online]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dan11/rd_bis.htm

DANEL, R. Vývoj a implementace IS. [online]. 1. 3. 2012 Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~dan11/is2011/2%20Informacni%20systemy%20-%20vyvoj%20a%20implementace%20IS.ppt>

FREEMAN, J. Webové stránky - Pět set rad, tipů a technik. Slovart 2008. ISBN: 978-80-739-1091-4

JANOVSKÝ, D. Editory HTML stránek podrobně. [online]. 3. 4. 2014 Dostupné z: <http://www.jakpsatweb.cz/editory-detaily.html>

KAJZAR, D. Tvorba informačních systémů II. Slezská univerzita v Opavě, FPF, 2005

MERUNKA, V. Metody tvorby informačních systémů. [online]. 2014 Dostupné z: http://etext.czu.cz/img/skripta/64/pef_226-1.pdf

NAKHIMOVSKY, A. - MYERS, T.: Google, Amazon and Beyond: Creating and Consuming Web Services. Apress 2004. ISBN: 9781590591314

NOVÁK, D. Úvod do databázových systémů. *pb154-cesky-02.pdf* [online]. 21. 9. 2005, 26. 9. 2005 Dostupné z: <http://www.fi.muni.cz/~xnovak8/teaching/PB154/>

Motion States of Nonlinear Unstable System Simulation, Connections between SolidWorks-Matlab/Simulink- SimMechanics-3D Animation

ZÁTOPEK, Jiří

Ing., ✉ Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Nad Stráněmi
4511, 760 05 Zlín, 🖨️ zatopek@fai.utb.cz, 🌐 <http://www.utb.cz/fai>

Abstract: *This text discusses the using and integration of various support software tools for the purpose of design the motion control law of mechanical structures with strongly nonlinear behavior. Detailed mathematical model is derived using Lagrange equations of the second type. The physical model is designed by using a 3D CAD software SolidWorks and library SimMechanics, extends Simulink by tools of modeling and simulation of mechanical "Multi-domain" physical systems. Visualization of Simulink outputs is done using the 3D Animation toolbox. Control law, designed on the basis of the mathematical model, is tested for the both models (mathematical and physical) and regulatory processes results are compared to each other.*

Keywords: *Motion control, simulation, Matlab/Simulink, SimMechanics, 3D Animation*

1 Introduction

Nowadays, a large amount of support software tools is available. These tools facilitate our work in analyzing, modeling, simulation and design control law of complex mechanical structures. By connecting these funds can be achieved eg. a considerable simplification of synthesis, clarity using visualization in 3D space directly in regulation process, or create a physical model in Simulink directly from CAD software (SolidWorks), without the need to derive the equations of motion.

A system which is object of our interest is called "Ball and Beam" and the description of the dynamic behavior is derived as most general as possible for use in control of real model. Ball and beam are mass objects, are thus placed in the 3D space, only the movement is limited to planar. The system is located in the Earth's gravitational field and has two degrees of freedom. Mass of the ball is chosen to have a significant impact on movement changes of the beam, the beam may be unbalanced. Ball position is measured from the axis of rotation of the beam (the axis of the shaft of the driving motor). To determine ball position in selected global coordinate system is used Denavit-Hartenberg notation/method of placement coordinate systems (DH).

The whole system is first sketched for the purpose of compilation a transformation matrix to determine the position of the ball in the global coordinate system. Using this transformation are derived equations of motion of the system, where are included the moments of inertia, centrifugal/centripetal and Coriolis generalized forces or linear friction. After that, 3D model was constructed in CAD design software SolidWorks, including all kinematic constraints and the mass distribution of the whole assembly. This model is also useful to detect masses or matrices/moments of inertia of complex objects, which already cannot be determined analytically. Subsequent export of the CAD model to the format for SimMechanics in Matlab/Simulink is received a physical model, including kinematic link and distribution of

mass of the whole assembly. In this model also takes place subsequent testing of a proposed control algorithm and comparing the outputs with a mathematical model.

2 „Ball and beam” – Mathematical description

2.1 Transformation of coordinate systems

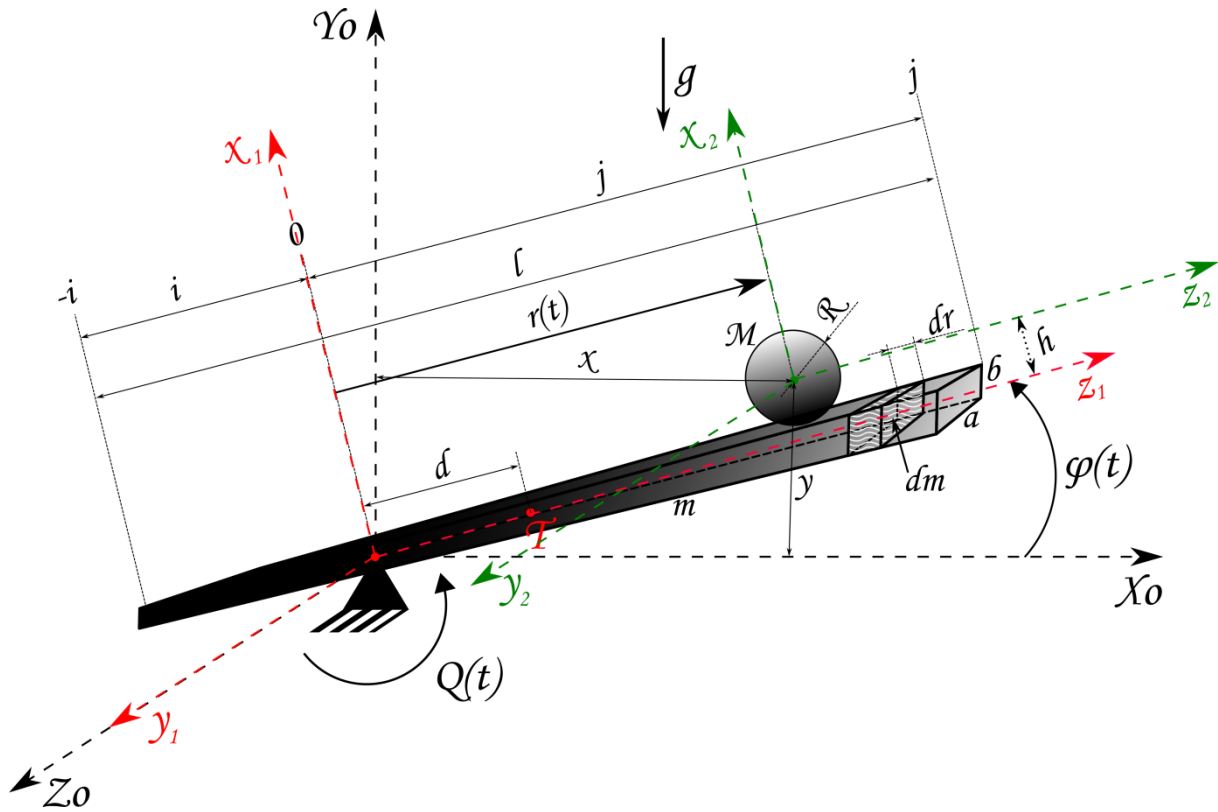


Fig. 1) Ball and beam with the selected coordinate system placement

Fig. 1 shows the system drawn for the purpose of determine the transformation matrix from the local coordinate system (x_2, y_2, z_2) to the global system (X_0, Y_0, Z_0) . Rotation of beam is possible only around the global axis Z_0 , rolling of the ball is ideal and only in direction of local axis z_1 . A place of connection of beam with the frame is shown only schematically, in this place acting torque providing controlled tilt of beam (first degree of freedom). Second degree of freedom is movement of the ball on the beam.

The homogeneous transformation matrices between the coordinate systems are:

$$\begin{aligned}
 {}^0\mathbf{T}_1 &= \begin{bmatrix} \overbrace{\cos[\varphi(t)+90^\circ]}^{-\sin\varphi(t)} & 0 & \cos\varphi(t) & 0 \\ \cos\varphi(t) & 0 & \sin\varphi(t) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^1\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & h \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\Downarrow \\
 {}^0\mathbf{T}_2 &= \begin{bmatrix} -\sin\varphi(t) & 0 & \cos\varphi(t) & -h\cdot\sin\varphi(t)+r(t)\cdot\cos\varphi(t) \\ \cos\varphi(t) & 0 & \sin\varphi(t) & h\cdot\cos\varphi(t)+r(t)\cdot\sin\varphi(t) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}
 \end{aligned}$$

For homogeneous coordinate ball position relative to the origin of the global coordinate system is:

$${}^G \vec{r} = {}^G T_B \cdot {}^B \vec{r} \Rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0 T_2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(R + \frac{b}{2}\right) \cdot \sin \varphi(t) + r(t) \cdot \cos \varphi(t) \\ \left(R + \frac{b}{2}\right) \cdot \cos \varphi(t) + r(t) \cdot \sin \varphi(t) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Square size of absolute speed vector (in the global coordinate system) is:

$$\begin{aligned} |\vec{v}|^2 &= (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) = \left[-\left(R + \frac{b}{2}\right) \cdot \cos \varphi \cdot \dot{\varphi} + \dot{r} \cdot \cos \varphi + r \cdot \sin \varphi \cdot \dot{\varphi} \right]^2 + \\ &+ \left[-\left(R + \frac{b}{2}\right) \cdot \sin \varphi \cdot \dot{\varphi} + \dot{r} \cdot \sin \varphi + r \cdot \cos \varphi \cdot \dot{\varphi} \right]^2 \\ |\vec{v}|^2 &= \underline{\underline{\left(\frac{2R+b}{2}\right)^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + r^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + \dot{r}^2 - (2R+b) \cdot \dot{r} \cdot \dot{\varphi}}} \end{aligned} \quad (3)$$

Ball and beam is only planar in this model (processes takes place in 2D).

2.2 Motion equations

For use Lagrange equations of the second kind is therefore necessary to determine the kinetic and potential energy of the whole system.

The kinetic energy of the balls is comprised of its translational and rotational motion:

$$E_{k_{kul}} = \frac{1}{2} M v^2 + \frac{1}{2} \underbrace{\frac{2MR^2}{5}}_{\frac{1}{5} M \cdot r^2} \underbrace{\omega_{kul}^2}_{\frac{r^2}{R^2}} = \frac{1}{2} M \cdot \underline{\underline{\left(\frac{2R+b}{2}\right)^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + r^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + \frac{7}{5} \dot{r}^2 - (2R+b) \cdot \dot{r} \cdot \dot{\varphi}}} \quad (4)$$

Potential energy of ball is:

$$E_{p_{kul}} = M \cdot g \cdot y = M \cdot g \cdot \underline{\underline{\left(\frac{2R+b}{2}\right) \cdot \cos \varphi + r \cdot \sin \varphi}} \quad (5)$$

Beam is in the cuboid shape with optionally stored rotation axis as shown in Fig. 1. Its inertia matrix has 3x3 moments of inertia, and is defined as:

$$J = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} & J_{xz} \\ J_{yx} & J_{yy} & J_{yz} \\ J_{zx} & J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix} = \iiint_B \rho(x, y, z) \cdot \begin{bmatrix} y^2 + z^2 & -xy & -zx \\ -xy & x^2 + z^2 & -yz \\ -zx & -yz & x^2 + y^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

in which $\rho(x, y, z)$ is the density of the material body. If a new coordinate system will be selected such that all the deviance moments will be zero, torques will be, to the individual axes of the system, equal to the polar moments of inertia matrix with respect to these axes. Already an established system meets this assumption, it is not necessary to introduce a new coordinate system and the moment of inertia relative to the axis of rotation (axis Z_0) will be equal to the polar moment J_{zz} .

$$J_{zz} = \iiint_B \rho(x, y, z) \cdot (x^2 + y^2) = \frac{m}{l \cdot b \cdot a} \cdot \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \left\{ \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \left[\int_{-i}^j (x^2 + y^2) dx \right] dy \right\} dz \quad (7)$$

$$J_{houp} = J_{zz} = \frac{1}{12} \cdot m \cdot [b^2 + 4 \cdot (i^2 - i \cdot j + j^2)]$$

Kinetic energy of beam is:

$$E_{k_{houp}} = \frac{1}{2} \dot{\varphi}^2 \cdot J_{houp} = \frac{1}{24} \cdot m \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot [b^2 + 4 \cdot (i^2 - i \cdot j + j^2)] \quad (8)$$

The relationship between the mass element and the length element can be expressed as:

$$dm = \rho \cdot a \cdot b \cdot dr = \frac{m}{a \cdot b \cdot l} \cdot a \cdot b \cdot dr = \frac{m}{l} \cdot dr \quad (9)$$

Potential energy of the beam element is:

$$dE_{p_{houp}} = dm \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot r = \frac{m}{l} \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot r \cdot dr = \frac{m \cdot g \cdot \sin \varphi}{i + j} \cdot r \cdot dr \quad (10)$$

Potential energy of the whole beam is:

$$E_{p_{houp}} = \int_{-i}^j dE_{p_{houp}} = \frac{m \cdot g \cdot \sin \varphi}{i + j} \cdot \int_{-i}^j r \cdot dr = \frac{m \cdot g \cdot \sin \varphi}{i + j} \cdot \left(\frac{j^2 - i^2}{2} \right) = \frac{1}{2} m \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot (j - i) \quad (11)$$

The total kinetic and potential energy of the system is the sum of their partial energies:

$$E_{k_{celk}} = \frac{1}{2} M \cdot \left[\left(\frac{2R + b}{2} \right)^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + r^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + \frac{7}{5} \dot{r}^2 - (2R + b) \cdot \dot{r} \cdot \dot{\varphi} \right] + \frac{1}{24} \cdot m \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot [b^2 + 4 \cdot (i^2 - i \cdot j + j^2)] \quad (12)$$

$$E_{p_{celk}} = M \cdot g \cdot \left[\left(\frac{2R + b}{2} \right) \cdot \cos \varphi + r \cdot \sin \varphi \right] + \frac{1}{2} m \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot (j - i) \quad (13)$$

Calculation of the Lagrangian:

$$L = E_k - E_p = \frac{1}{2} M \cdot \left[\left(\frac{2R + b}{2} \right)^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + r^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + \frac{7}{5} \dot{r}^2 - (2R + b) \cdot \dot{r} \cdot \dot{\varphi} \right] + \frac{1}{24} \cdot m \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot [b^2 + 4 \cdot (i^2 - i \cdot j + j^2)] - M \cdot g \cdot \left[\left(\frac{2R + b}{2} \right) \cdot \cos \varphi + r \cdot \sin \varphi \right] + \frac{1}{2} m \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot (j - i) \quad (14)$$

Into the system will be even added linear friction dependent on the generalized speed (sliding friction with a friction factor k_1 and rolling resistance with a friction factor k_2). Equations of motion are therefore:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad \Rightarrow \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{r}} \right) - \frac{\partial L}{\partial r} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{2} M \cdot \left[\frac{14}{5} \dot{r} - (2R+b) \cdot \dot{\varphi} \right] \right\} - M \cdot r \cdot \dot{\varphi}^2 + M \cdot g \cdot \sin \varphi = 0 \\ \underline{\underline{\frac{7}{5} M \cdot \ddot{r} - \frac{2R+b}{2} M \cdot \ddot{\varphi} - M \cdot r \cdot \dot{\varphi}^2 + k_1 \cdot \dot{r} + M \cdot g \cdot \sin \varphi = 0}} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad \Rightarrow \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = Q \\ \frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{2} M \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{2R+b}{2} \right)^2 \cdot \dot{\varphi} + 2r^2 \cdot \dot{\varphi} - (2R+b) \cdot \dot{r} \right] + \frac{1}{12} \cdot m \cdot \dot{\varphi} \cdot [b^2 + 4 \cdot (i^2 - i \cdot j + j^2)] \right\} + \\ + M \cdot g \cdot \left[r \cdot \cos \varphi - \left(\frac{2R+b}{2} \right) \cdot \sin \varphi \right] + \frac{1}{2} m \cdot g \cdot \cos \varphi \cdot (j-i) = Q \\ \underline{\underline{M \cdot \left(\frac{2R+b}{2} \right)^2 \cdot \ddot{\varphi} + M \cdot r^2 \cdot \ddot{\varphi} + \frac{1}{12} \cdot m \cdot [b^2 + 4 \cdot (i^2 - i \cdot j + j^2)] \cdot \ddot{\varphi} - M \cdot \frac{2R+b}{2} \cdot \ddot{r} + 2M \cdot r \cdot \dot{r} \cdot \dot{\varphi} + \\ + k_2 \cdot \dot{\varphi} + M \cdot g \cdot r \cdot \cos \varphi - M \cdot g \cdot \left(\frac{2R+b}{2} \right) \cdot \sin \varphi + \frac{1}{2} m \cdot g \cdot (j-i) \cdot \cos \varphi = Q}} \end{aligned} \quad (16)$$

After modifying we can write:

$$\begin{aligned} \ddot{r} = \frac{60A \cdot \left[Q - k_2 \cdot \dot{\varphi} + A \cdot M \cdot g \cdot \sin \varphi - M \cdot g \cdot r \cdot \cos \varphi + \frac{1}{2} m \cdot g \cdot (i-j) \cdot \cos \varphi - 2M \cdot r \cdot \dot{r} \cdot \dot{\varphi} \right]}{24M \cdot A^2 + 84M \cdot r^2 + 7B \cdot m} \\ - \frac{5 \cdot \left[(12M \cdot A^2 + 12M \cdot r^2 + B \cdot m) \cdot (k_1 \cdot \dot{r} - M \cdot r \cdot \dot{\varphi}^2 + M \cdot g \cdot \sin \varphi) \right]}{24M^2 \cdot A^2 + 84M^2 \cdot r^2 + 7B \cdot M \cdot m} \\ \ddot{\varphi} = \frac{6 \cdot \left[14Q - 14k_2 \cdot \dot{\varphi} - 10A \cdot k_1 \cdot \dot{r} + 10A \cdot M \cdot r \cdot \dot{\varphi}^2 + 4A \cdot M \cdot g \cdot \sin \varphi - 14M \cdot g \cdot r \cdot \cos \varphi + \right. \\ \left. + 7m \cdot g \cdot (i-j) \cdot \cos \varphi - 28M \cdot r \cdot \dot{r} \cdot \dot{\varphi} \right]}{24M \cdot A^2 + 84M \cdot r^2 + 7B \cdot m} \end{aligned} \quad (17)$$

in which:

$$A = \left(\frac{2R+b}{2} \right) \quad B = [b^2 + 4 \cdot (i^2 - i \cdot j + j^2)] \quad (18)$$

For the state vector $[r \ v \ \varphi \ \omega]^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ and input signal $Q = u$ will state-space representation correspond to the shape of:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{60A \cdot \left[u - k_2 \cdot x_4 + A \cdot M \cdot g \cdot \sin x_3 - M \cdot g \cdot x_1 \cdot \cos x_3 + \frac{1}{2} m \cdot g \cdot (i-j) \cdot \cos x_3 - 2M \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \right]}{24M \cdot A^2 + 84M \cdot x_1^2 + 7B \cdot m} \\ \frac{5 \cdot \left[(12M \cdot A^2 + 12M \cdot x_1^2 + B \cdot m) \cdot (k_1 \cdot x_2 - M \cdot x_1 \cdot x_4^2 + M \cdot g \cdot \sin x_3) \right]}{24M^2 \cdot A^2 + 84M^2 \cdot x_1^2 + 7B \cdot M \cdot m} \\ x_4 \\ \frac{6 \cdot \left[14u - 14k_2 \cdot x_4 - 10A \cdot k_1 \cdot x_2 + 10A \cdot M \cdot x_1 \cdot x_4^2 + 4A \cdot M \cdot g \cdot \sin x_3 - 14M \cdot g \cdot x_1 \cdot \cos x_3 + \right. \\ \left. + 7m \cdot g \cdot (i-j) \cdot \cos x_3 - 28M \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \right]}{24M \cdot A^2 + 84M \cdot x_1^2 + 7B \cdot m} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

From these equations can be determined that the system has only one unstable singular point and steady-state is given by only the ball position on the lever/beam (x_I). All remaining state variables are zero in singular point.

Singular (stationary) point is:

$$\begin{bmatrix} x_1^0 & x_2^0 & x_3^0 & x_4^0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{m \cdot (i-j)}{2M} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

Steady state:

$$x_1^s = \frac{u^s}{M \cdot g} + \frac{m \cdot (i-j)}{2M} \quad (21)$$

$$u^s = M \cdot g \cdot x_1^s - \frac{1}{2} m \cdot g \cdot (i-j)$$

Linearization in working point x_I^s (steady state) can be obtained transmission of linear model:

$$G(s) = \frac{X_1(s)}{U(s)} = \frac{b_2 s^2 + b_0}{s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (22)$$

in which:

$$b_2 = \frac{60A}{24M \cdot A^2 + 336M \cdot x_1^{s^2} + 7B \cdot m}$$

$$b_0 = \frac{-60g}{24M \cdot A^2 + 336M \cdot x_1^{s^2} + 7B \cdot m}$$

$$a_3 = \frac{60M \cdot A^2 \cdot k_1 + 240M \cdot k_1 \cdot x_1^{s^2} + 84M \cdot k_2 + 5B \cdot k_1 \cdot m}{M \cdot (24M \cdot A^2 + 336M \cdot x_1^{s^2} + 7B \cdot m)^2} \quad (23)$$

$$a_2 = \frac{(12096A \cdot g \cdot M^3 + 20160M \cdot k_1 \cdot k_2) \cdot x_1^{s^2} - 10080A \cdot g \cdot m \cdot M^2 (i-j) \cdot x_1^s + 864A^3 \cdot M^3 \cdot g + 1440A^2 \cdot M \cdot k_1 \cdot k_2 + 420B \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot m + 252A \cdot B \cdot g \cdot m \cdot M^2}{M \cdot (24M \cdot A^2 + 336M \cdot x_1^{s^2} + 7B \cdot m)^2}$$

$$a_1 = \frac{-60A \cdot g \cdot k_1}{24M \cdot A^2 + 336M \cdot x_1^{s^2} + 7B \cdot m}$$

$$a_0 = \frac{-60M \cdot g^2 \cdot [24M \cdot A^2 + 336M \cdot x_1^{s^2} + 7B \cdot m - 168m(i-j) \cdot x_1^s]}{(24M \cdot A^2 + 336M \cdot x_1^{s^2} + 7B \cdot m)^2}$$

Linearization is derived in the general position of the working point, so it is possible to continuously recalculate it.

3 „Ball and beam” – Support software tools

3.1 SolidWorks

The considered system consists of a three basic parts: base, beam and ball. All these parts are material. Ideally rigid base is connected to the frame, so its physical properties are not relevant for the dynamic behavior of the system.

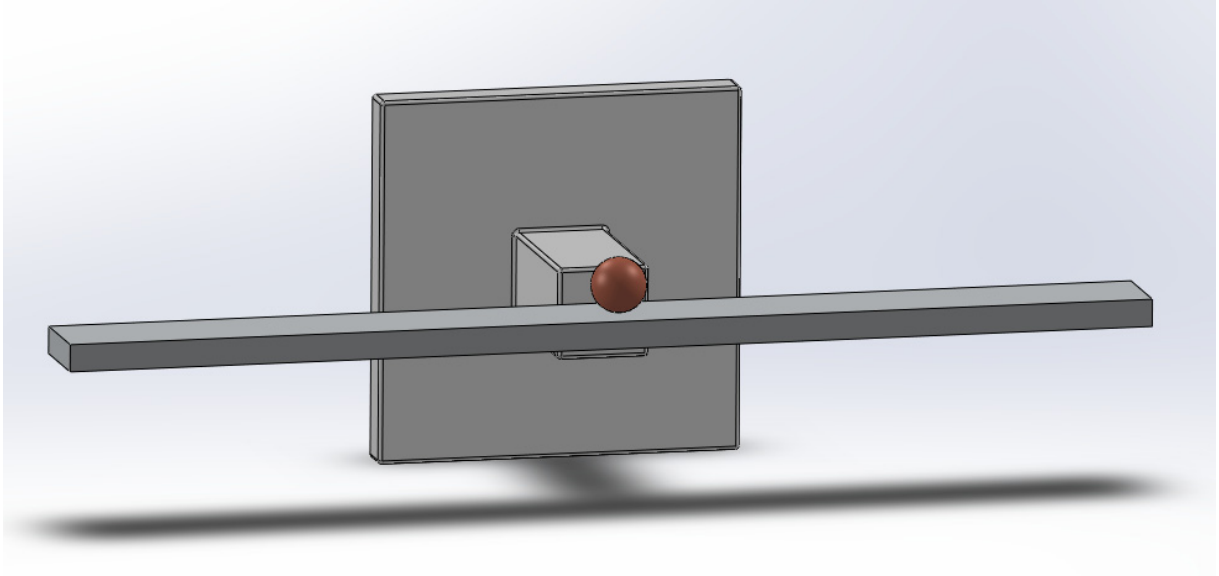


Fig. 2) Complete assembly in SolidWorks

3.2 Physical model – SimMechanics

SolidWorks 3D CAD model was exported as SimMechanics Second Generation *xml* format and then imported into MATLAB Simulink as a Simulink scheme. Linkages were revised because between SolidWorks and SimMechanics some are unknown or illicit.

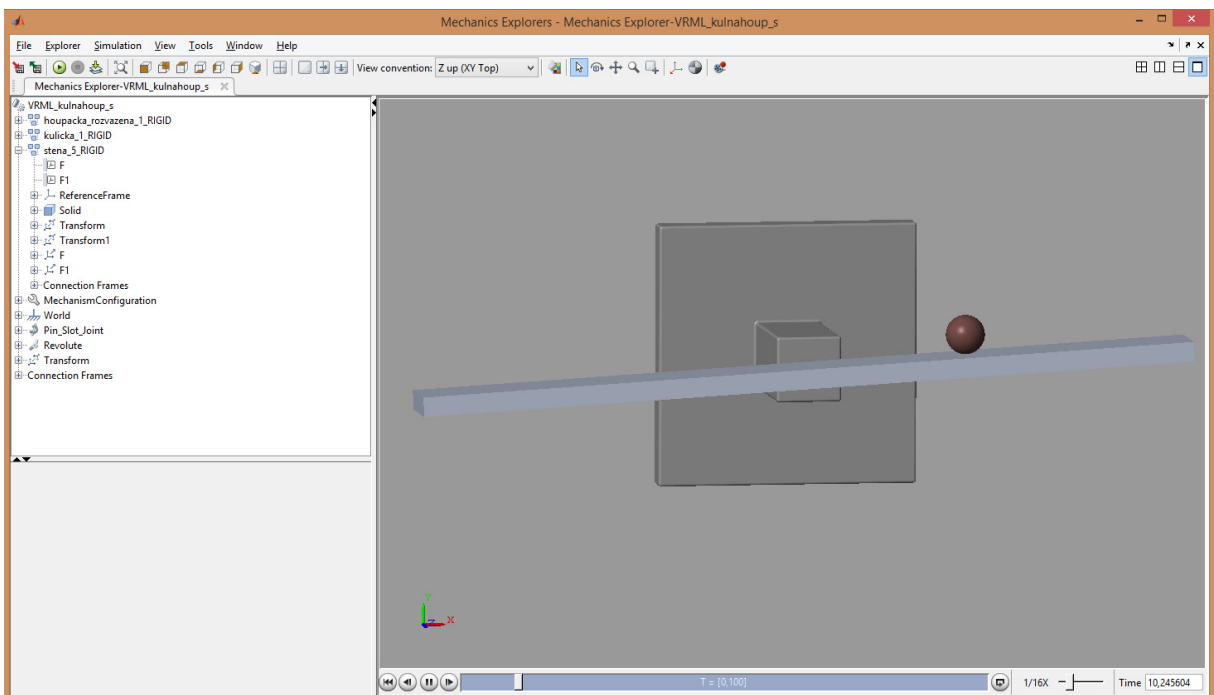


Fig. 3) Real time visualization using the SimMechanics Second Generation

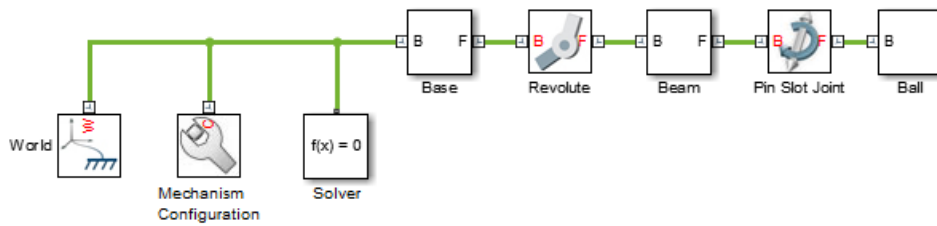


Fig. 4) Separate model in SimMechanics

3.3 3D Animation

This model is also exported from SolidWorks, but in a format *wrl*, which is through 3D Simulation toolbox loaded into a special block. As inputs to this block are used outputs from a mathematical model which are through the transformation matrix (HD notation) converted into translational and rotational motions of the individual parts of the assembly. Visualization has more options for visualizing, there is eg. used a Web browser.

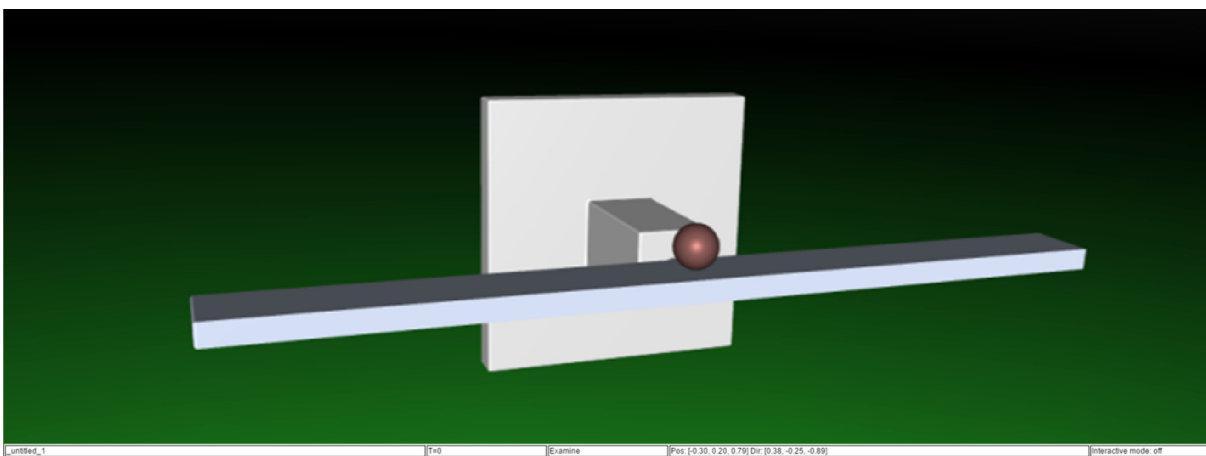


Fig. 5) Visualization using 3D Animation toolbox in web browser

4 „Ball and beam” – Control

Large quantities of contained trigonometric functions and multiples of rounded state variables generate cumulative numerical error. Thus, despite placing the ball into equilibrium, the system will set itself into motion, as apparent from Fig. 6.

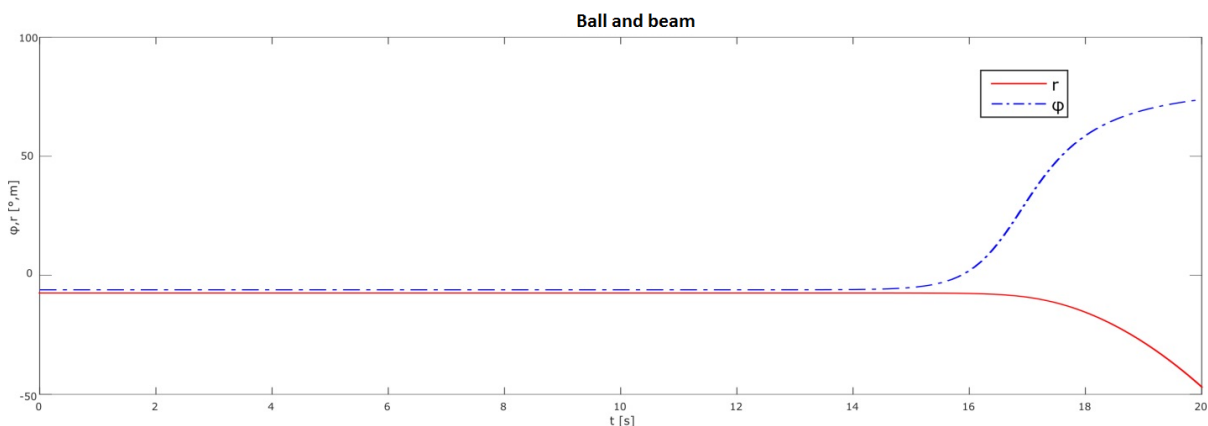


Fig. 6) Cumulative numerical error

The system is controlled by a linear regulator with 1DOF designed by the pole placement with a continuous linearization. The controller parameters, resulting from the transfer

function, are derived generally, so that they can be updating continuously. The final regulator then has the form:

$$Q(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{q(s)}{p(s)} = \frac{q_4 s^4 + q_3 s^3 + q_2 s^2 + q_1 s + q_0}{s \cdot (p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s + p_0)} \quad (24)$$

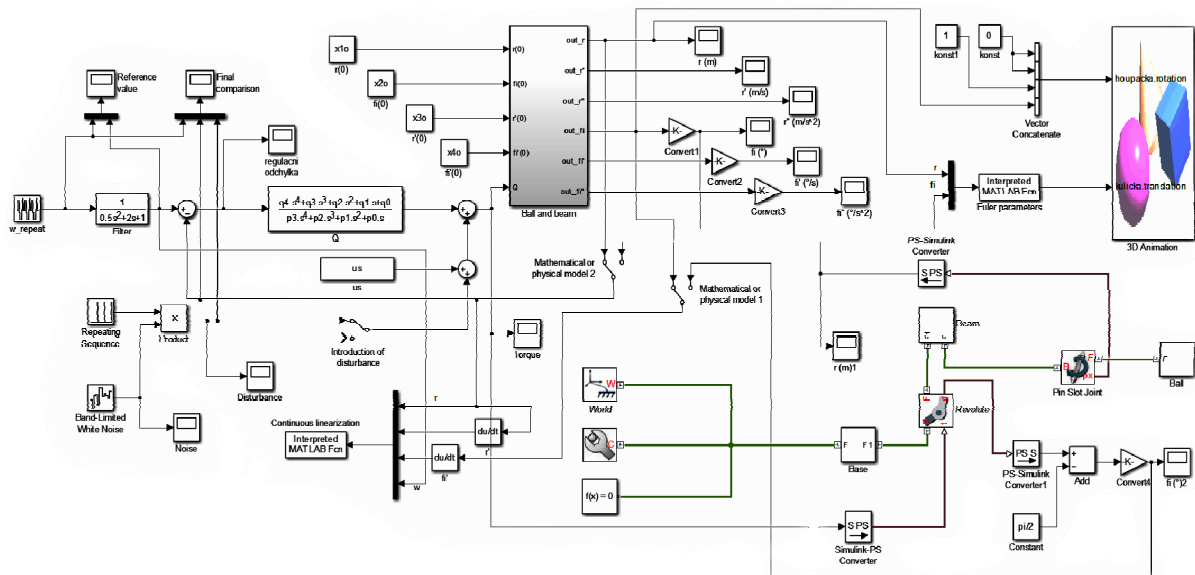


Fig. 7) Complete Simulink scheme with SimMechanics and 3D Animation

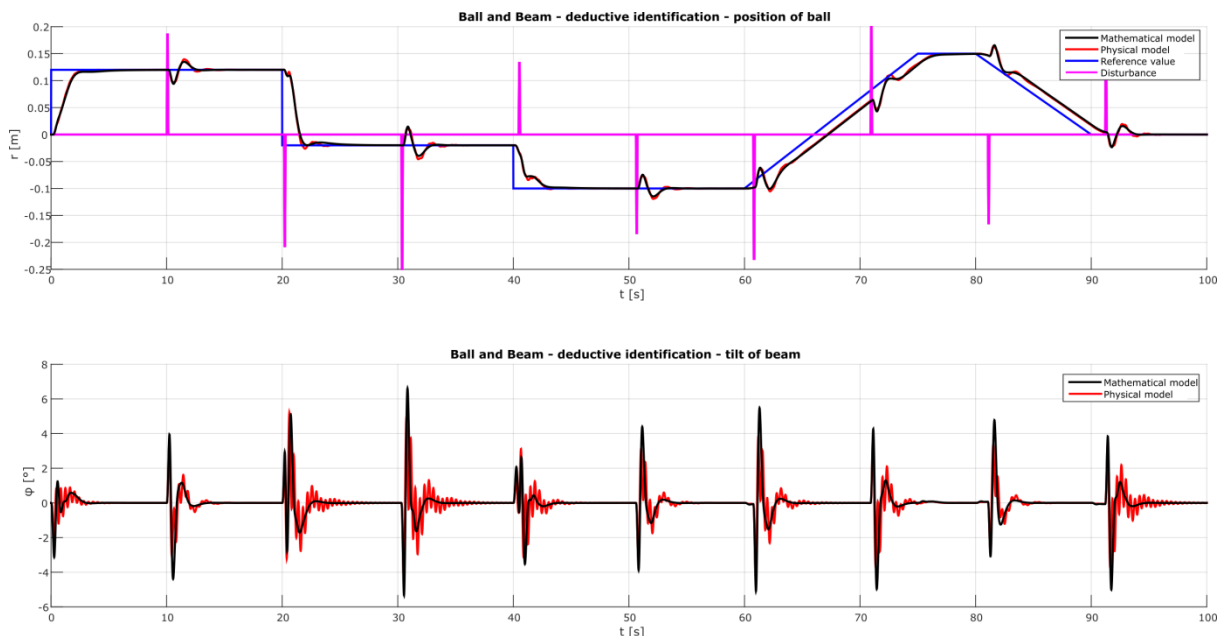


Fig. 8) Control process for mathematical and physical model

After step changes in reference value will be followed by a step changes in the control deviation, then a step changes in the torque - there would be a problem with physical realization - and thus to the rapidly changing the tilt of beam. In combination with centrifugal forces and inertia of the system will process oscillate, often will be put into unmanageable state. Therefore, in the system was introduced a filter that prevents against these step changes.

As shown in Fig. 8, the control processes of both models (mathematical and physical) are nearly identical. The controller is designed for compensation of disturbance and reference value in the shape of a step change, so will appear lag fault in the transition part of the process at the ramp-shaped reference value. Trend of reference value however replicates very well.

5 Conclusion

The article contains a complete control design solution of a system known as "Ball and beam". A substantial part is the derivation of systems motion equations from their energy balance. The model was, through to the definition of transmission, derived quite generally and corresponds to motion equations linearized at the operating point. Therefore, it is possible to carry out a continuous linearization efficiently and with low computational effort. This description, however, applies only in the surrounding area of working point. When this point changes, linearization is needed again.

Linking with 3D CAD software and Matlab/Simulink, with using toolboxes for physical modeling (SimMechanics) and 3D visualization outputs (3D Animation) is very visual and effective for control and presentation of results. In real time is possible to observe dynamic processes occurring in the system and eg. a slow down/pause them, for the purpose of detailed motion analysis or exploration of energy interactions between system components.

The designed control methods are tested on a unbalanced system with variable reference course and disorders. For achieving the desired quality of regulation is necessary to eliminate a step change in the control deviation and stabilize the course of the regulatory process.

6 References

- [1] CRANDALL, Stephen H. *Dynamics of mechanical and electromechanical systems*. Malabar, Fla.: R.E. Krieger Pub. Co., 1968, ix, 466 p. ISBN 0898745292.
- [2] D. C Karnopp, R. C. Rosenberg. *System dynamics*. A Unifies Approach. Wiley & Sons, 1975.
- [3] ROSENBERG, R. C. Multiport Models in Mechanics. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* [online]. 1972, [cit. 2016-02-18]. DOI: 10.1115/1.3426590. ISSN 00220434. Dostupné z: <http://DynamicSystems.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1401208>
- [4] ÚŘEDNÍČEK, Z. *Robotika*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012. ISBN 978-80-7454-223-7.
- [5] ÚŘEDNÍČEK, Z. *Elektromechanické akční členy*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. ISBN 978-807-3188-351.
- [6] Documentation: SimMechanics. *MathWorks* [online]. 2016 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/phymod/sm/index.html>
- [7] *Dassault Systems* [online]. © 1995-2015 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://help.solidworks.com/HelpProducts.aspx>

Author index

B		T	
BALONOVÁ, Katarína	5	TÓTHOVÁ, Mária	117
BARANOVÁ, Vladena	20	TŮMA, Jiří	97
C		U	
CZEBE, Jiří	30	URBAN, Patrik	123
D		V	
DANEL, Roman	147	VAJSÁBEL, Michal	128
DUBJÁK, Ján	39, 117	VÍTEČEK, Antonín	138
ĎURIŠ, Stanislav	5, 81	VÍTEČKOVÁ, Miluše	105, 138
F		VOJTEK, Tomáš	147
FARANA, Radim	47	W	
FOJTÍK, David	54	WAGNEROVÁ, Renata	68
G		WALEK, Bogdan	25
GEBAUER, Jan	54	Z	
GRÚBEROVÁ, Michaela	62	ZÁTOPEK, Jiří	163
H		ZBIHLEJ, Jozef	39
HLOCH, Sergej	88		
HÝL, Radim	68		
J			
JAVORSKÁ, Alexandra	128		
K			
KLVAČOVÁ, Simona	81		
KRŠÍKOVÁ, Jana	81		
KUREKOVÁ, Eva	128		
L			
LANDRYOVÁ, Lenka	20, 123		
M			
MOLITORIS, Matúš	88		
P			
PALENČÁR, Jakub	62		
PALENČÁR, Rudolf	62		
PAWLENKA, Miroslav	97		
PODEŠVA, Petr	54		
S			
SLADKÁ, Karla	105		
ŠKUTA, Jaromír	30		

Autor:	Kolektiv autorů	
Editor:	Ing. Pavel Smutný, PhD.	
Katedra, institut:	Katedra automatizační techniky a řízení	352
Název:	XLI. Seminar ASR '2016 "Instruments and Control"	
Místo, rok, vydání:	Ostrava, 2016, 1. vydání	
Počet stran:	113	
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 978-80-248-3910-3