

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA AUTOMATIZAČNÍ TECHNIKY A ŘÍZENÍ



XXXIX. Seminar ASR '2015 **“Instruments and Control”**

Ostrava, April 24, 2015

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/2015/asr2015/>

Proceedings Editors

P. SMUTNÝ

ISBN 978-80-248-3744-4

Table of Contents

| | |
|---|-----|
| Vývoj aplikací na platformě .NET Gadeteer | 5 |
| <i>BABIUCH, Marek</i> | |
| Modelovanie dynamickej sústavy raziaci stroj-hornina | 14 |
| <i>BARANOVÁ, Vladena, LANDRYOVÁ, Lenka & FUTÓ, Jozef</i> | |
| Robotic Platform for Gait Disorders Monitoring | 20 |
| <i>CRHA, Jan, MAREŠ, Jan & ŤUPA, Ondřej</i> | |
| Rozšíření možností Linguistic Fuzzy-Logic Control automatickou změnou kontextů | 25 |
| <i>FARANA, Radim, WALEK, Bogdan, JANOŠEK, Michal & ŽÁČEK, Jaroslav</i> | |
| Metodika ukládání a správy velkého množství dat v databázích běžících na SQL Server Express | 34 |
| <i>FOJTÍK, David & PODEŠVA, Petr</i> | |
| Návrh regulačního obvodu pro řízení teploty přehřáté páry | 38 |
| <i>HÝL, Radim & WAGNEROVÁ, Renata</i> | |
| SSL - Functional Prototype | 49 |
| <i>JANEČKA, Patrik & TŮMA, Jiří</i> | |
| Coordination of Periodic Multiple Source Transport Processes in Selected Nodes of Network | 55 |
| <i>LORENZ, Filip & TEICHMANN, Dušan</i> | |
| Control of Groundwater Remediation Process as Distributed Parameter System | 60 |
| <i>MENDEL, Mário, HULKÓ, Gabriel & MÉSZÁROS, Alajos</i> | |
| The Latest Trends in Industrial Robot End Effectors | 68 |
| <i>ŮHLSCHLÄGER Kamil & ŠEMINSKÝ Jaroslav</i> | |
| Použití Kalmanova filtru pro měření otáček | 76 |
| <i>PAWLENKA, Miroslav & TŮMA, Jiří</i> | |
| Simulácia fuzzy adaptívneho riadenia pneumatického aktuátora s umelými svalmi | 85 |
| <i>TÓTHOVÁ, Mária, VAGASKÁ, Alena, ŽIDEK, Kamil & MOUČKA, Michal</i> | |
| Analysing Alarm and Event Data From a Process and Control System | 91 |
| <i>URBAN, Patrik & LANDRYOVÁ, Lenka</i> | |
| Linear Control of the Inverted Pendulum Mechanism | 97 |
| <i>VASILEV, Andrey & WAGNEROVÁ, Renata</i> | |
| Návrh robustního řízení mechanických systémů | 104 |
| <i>VÍTEČKOVÁ, Miluše & VÍTEČEK, Antonín</i> | |

Preface

Annual „Seminář ASŘ“ (Seminary of Automatic Control Systems), organized by the Faculty of Mechanical Engineering, Department of Control Systems and Instrumentation in collaboration with the Committee of Applied Cybernetics and Informatics – KAKI Ostrava, achieved on this year 2015, was held thirty-eight times.

The seminars of ASR demonstrate as important Workshops every year their fixed position at the large offer of science-research actions with international range and with a reputable special even social level. The workshop „Seminary ASR“ was distinctly signed on this times as an effective platform for meeting teachers and Ph.D. students from the VŠB - Technical University of Ostrava with scientists and students from other universities of Czech Republic, Slovakia and Poland, even with experts from industrial companies and other institutions. In 2015 the Seminary of ASR is split into two parts. The first one is a student competition – STOČ 2015 as the 20th Student Science Workshop and the second part is a traditional XXXIVth Seminary of ASR “Instruments & Control” as a Ph.D. seminary and student competition.

The goal of Seminary of ASR'15 "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'2015 “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

Vývoj aplikací na platformě .NET Gadgeteer .NET Gadgeteer Application Development

BABIUCH, Marek

Ing., Ph.D., ✉ VŠB - Technická Univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení; 17. listopadu 15, Ostrava Poruba 70833, 🖥️ marek.babiuch@vsb.cz, 🌐 www.352.vsb.cz

Abstrakt: Tento článek se zabývá popisem technologie .NET Micro Framework, hardwarových modulů a softwarových nástrojů pro podporu tvorby měřicích aplikací s podporou jazyka C # ve Visual Studio .NET konkrétně pro projekty .NET Gadgeteer. Příspěvek popisuje dostupné hardwarové moduly, softwarovou podporu, princip rychlého prototypování a vývoj aplikací demonstruje na příkladu provádění měření a monitorování proměnných získaných ze snímačů v technologii .NET Microframework pomocí ethernetového připojení prostřednictvím webového prohlížeče. Příspěvek popisuje principy návrhu aplikace v technologii .NET Gadgeteer s důrazem na vlastnosti vývoje v prostředí Visual studia .NET.

Klíčová slova: .NET Micro Framework, aplikace, C#, Debug, Ethernet, Gadgeteer, Visual Studio .NET, SDK, událost, vývojová deska, zařízení

1 Úvod

.NET Gadgeteer je moderní a v současné době rychle se rozvíjející platforma pro rapid prototyping development. Je podporována firmou Microsoft převážně v oblasti vývojového prostředí a tvorbou knihoven programového kódu pro vývojové desky a senzorové kompatibilní moduly. Tato podpora v oblasti vývoje zdrojového kódu v jazycích .NET především tedy C# je realizovaná prostřednictvím platformy .NET MicroFramework. .NET Micro Framework je v podstatě open source .NET platforma pro vývojové desky embedded systémů, malých elektronických, měřicích a senzorových zařízení, které jsou vyráběny společnostmi pod označením podpory .NET Gadgeteer. Výhodami těchto platform je bezesporu široká podpora zdrojového kódu na úrovni jazyka C#, knihovny obsahují jednotlivé objekty s připravenými metodami, které charakterizují požadované vlastnosti a možnosti využití jednotlivých senzorů a elektronických zařízení. Další výhodou je kromě deklarované kompatibility cena jednotlivých senzorů a vývojových desek, které se pohybují pouze v desítkách nikoliv stovkách dolarů. Další výhody vyplývající z výše popsaného je široká komunita a fórum vývojářů, knihovny hotových projektů, oblast podpory, výhody vyplývající z vývojářské platformy jako možnost debugging, intellisence programming, událostně řízené programování, vývoj kódu na úrovni vysokého programovacího jazyka, kompatibilita v aplikacích směrem k desktopovým a webovým aplikacím, spolupráce s webovými službami a možnost využití na mobilních zařízeních.

2 Dostupný hardware a jeho softwarová podpora

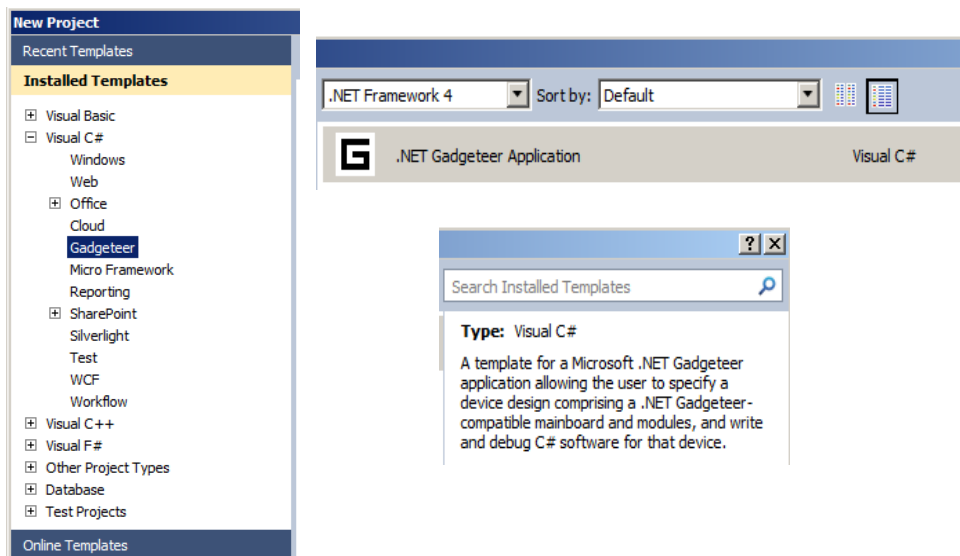
Tato kapitola v krátkosti popisuje, pro jaká zařízení můžeme měřicí aplikace vyvíjet a v jakém vývojářském prostředí. Bude v krátkosti shrnuto, co bude nezbytně nutné pro potřebu vývoje kódu pro gadgeteer vývojové desky a zařízení.

Hardwarové zařízení

Na celosvětovém trhu, na který dodávají svá gadgeteer zařízení výrobci jako GHI Electronic, Sytech designs, Device Solutions, Freescale a další najdeme celou řadu senzorů, komunikačních modulů jako Bluetooth, XBee, ZigBee, Wifi, Ethernet, USB host module, akcelerometry, mnoho elektronických gadgeteer modulů jak potenciometry, pulsní moduly, motor drivery a další. Gadgeteer platforma podporuje celou řadu displejů včetně dotykových, obsahuje také další moderní zařízení jako GPS moduly, kamery, SD card úložiště, kompas, gyroskopy, RFID modul, moduly pro grafiku, a další. Tato platforma se neustále rozšiřuje a protože je .NET Micro Framework open-source, je možný neustálý růst zařízení se softwarovou podporou. V podstatě mohou vývojářské firmy implementovat a portovat jádro běhového prostředí .NET Micro Frameworku do svých vlastních zařízení. Základem každé měřicí či automatizační úlohy, která je navržena je hlavní procesorová deska. Procesorových desek je opět dostatečné množství a liší se svou základní výbavou, převážně tím k čemu jsou primárně určeny, Čím je deska specifitější a vhodná k určitému typu využití, tím méně již má volných .Gadgeeter slotů pro přídavné moduly, avšak jiné moduly jsou již alokovány přímo na desce. Základem procesorové desky je 32 bitový ARM, Cortex procesor, uživatelsky dostupná Flash a RAM, FAT32 File system, Analogové vstupy, UART, SPI, I2C, USB, Real Time Clock, networking a další, Desky se mimo jiné také liší počtem volných slotů pro gadgeteer moduly.

Programová podpora zařízení

Z hlediska vývojových nástrojů je platforma Gadgeteer podporována v programovém prostředí Microsoft Visual Studio .NET, zatím ve verzích 2010 a výše. Podle vámi preferované verze prostředí musíme také stáhnout konkrétní verzi SDK Micro Frameworku. Pro verzi Visual Studio 2013 je to NETMF SDK 4.3, pro Visual Studio 2010 je to NETMF SDK 4.2. Zde musí dát rovněž pozor kterou verzi SDK Micro Frameworku použijeme, protože musíme mít aktuálně nakonfigurovaný firmware ve vývojové desce. To znamená, že si musíme ověřit, jestli nainstalované SDK na vývojářském počítači odpovídá pořízené vývojové gadgeteer desce. V případě nekompatibility použijeme firemní konfigurátor a firmware vývojové desky přizpůsobíme vývojářskému SDK. Firemní konfigurátor výrobce je dostupný, intuitivní a volbou wizardu nás nasměruje ke správné konfiguraci.



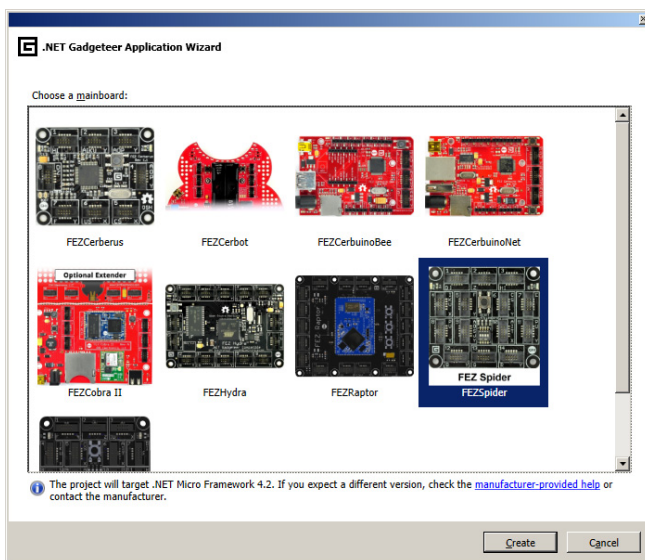
Obr. 1 Volba Gadgeteer šablony vývoje aplikace ve visual studiu .NET

Po úspěšné instalaci SDK ještě zbývá z produktového portálu nainstalovat knihovnu pro podporu Gadgeteer modulů, tak abychom všechny podporované zařízení mohli programovat. Je vhodné zmínit, že výše uvedené SDK frameworky a knihovny jsou plně kompatibilní s

verzem Visual Studio Express 2010 a 2013, které jsou pro vývoj dostačující a co je nejdůležitější, jsou zdarma.

Při vytváření projektů .NET Gadgeteer aplikací tak obdržíme podporu ve formátu vhodných šablon ve Visual Studiu .NET a můžeme k zařízením a jejich programovým metodám již přistupovat na vyšší programátorské úrovni v jazyce C#. Na obrázku 1 vidíme zvolenou Gadgeteer template v jazyce C# a můžeme se tak pustit do vývoje aplikace.

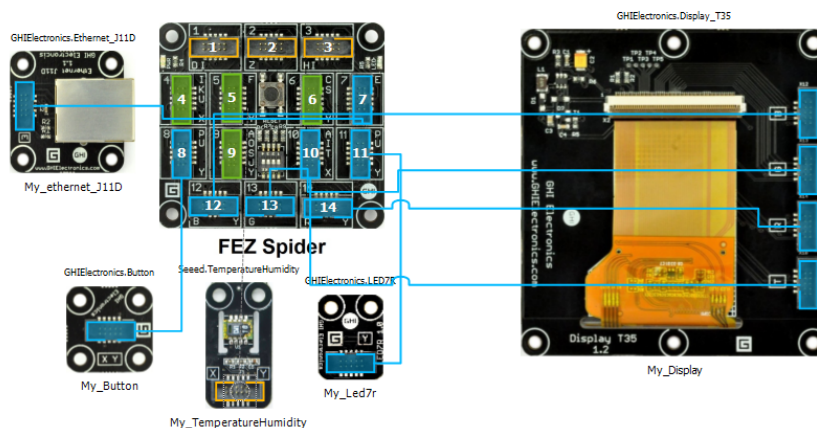
Před započetím návrhu a programování příslušné aplikace musíme zvolit vývojovou desku, pro kterou bude aplikace navržena viz obrázek 2.



Obr. 2 Volba vývojové desky aplikace .NET Gadgeteer

Poté můžeme na pracovní plochu umístit všechna zařízení, se kterými hodláme v aplikaci pracovat, a které budeme využívat.

Propojování zařízení je řešeno grafickou formou, jednotlivé zařízení se připojují do Gadgeteer slotů vývojové desky. Programové prostředí nám při návrhu pomáhá označením vhodných slotů. Pro některá zařízení můžeme použít pouze speciální Gadgeteer slot, jiná zařízení je možno připojit do různých slotů, prostředí Visual Studia nám tyto sloty zvýrazní zelenou barvou viz obrázek 3.



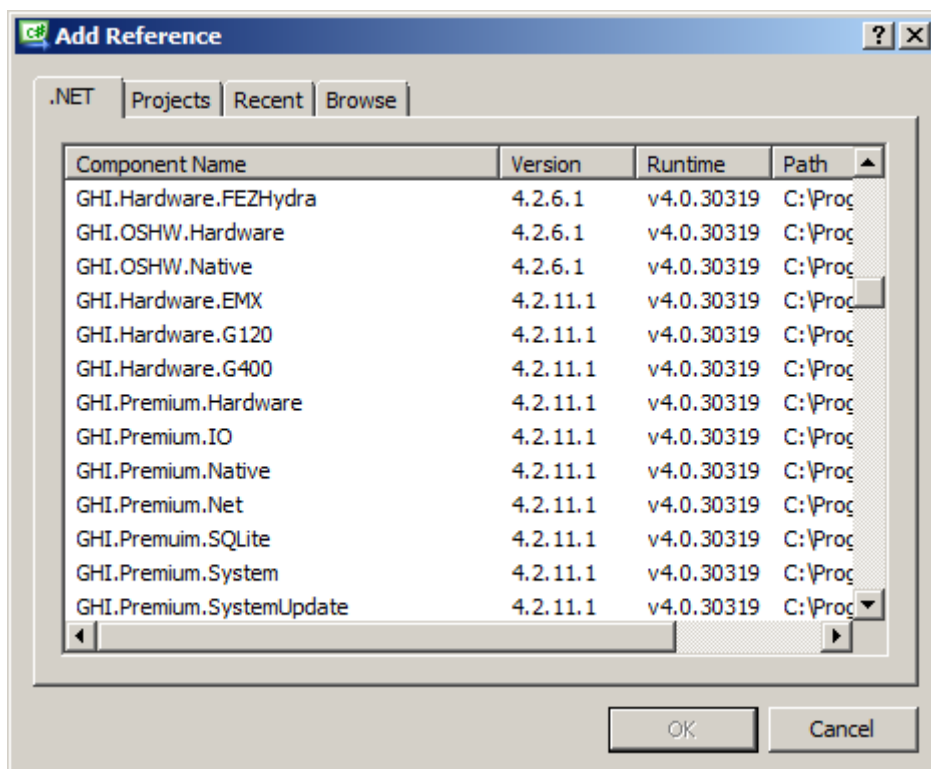
Obr.3 Propojování zařízení v developed módu vývojového studia

Vývoj kódu na úrovni programového jazyka C#

Než přistoupíme ke kapitole s návrhy konkrétních aplikací, shrneme hlavní výhody vývoje v jazyce C# pro Gadgeteer devices:

- Automatické generování všech potřebných jmenných prostorů pro tvorbu gadgeteer aplikací.

Jmenné prostory jednotlivých assembly (*namespaces*) zajišťují přístup k jednotlivým třídám .NET Microframeworku a knihovnám podporovaných metod. Zde připomeneme podporu knihoven tříd .NET Micro Frameworku z minulé kapitoly. Vývojáři výrobce hardwarových komponent samozřejmě ve svém SDK balíčku nabízejí pro vývojovou platformu implementované knihovny ve svých jmenných prostorech. Tyto knihovny opět můžeme přidat do výsledného projektu volbou přidání reference viz obrázek 4.



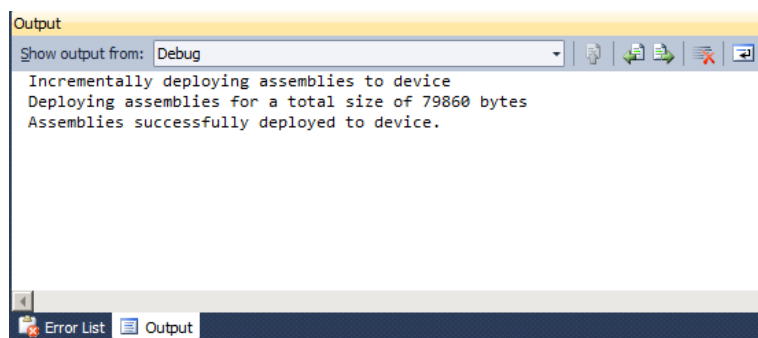
Obr. 4 Vložení reference pro knihovny tříd z SDK výrobce vývojové platformy

- Vytvoření souboru program.cs, s vygenerovanou třídou aplikace a kostrou programu s funkcí

`public partial class Program`, je hlavní třída aplikace, ve které je uložen veškerý vývojářský kód. Aplikace začíná metodou `void ProgramStarted()` ve které provádíme hlavní inicializaci a práci se zařízeními. Aplikace nám tedy přesně určí místo, kde vyvíjíme programovou kód pro cílovou aplikaci.

- Deploy aplikace

Po zkompileování aplikace klasickým způsobem technologie .NET příkazem *Build* je aplikace připravena ke spuštění. Při spuštění aplikace je zdrojový kód jednotlivých assembly nahrán do cílového zařízení. Ve Visual Studiu .NET jsme o tom samozřejmě informováni ve výstupním okně zobrazeném na obrázku 5. Výstup informuje o úspěšném zavedení aplikace do vývojové desky, popřípadě zobrazí chybové hlášení v případě neúspěchu. Při ladění aplikace využíváme ve výstupním okně *Output* také průběh ladícího *Debug* módu.



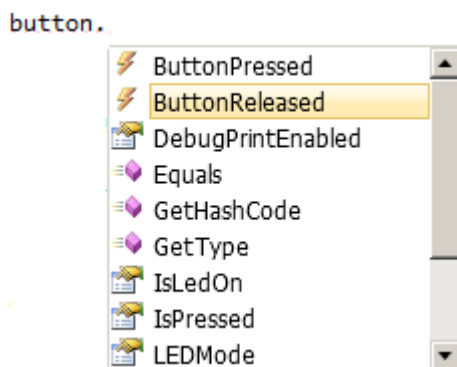
Obr. 5 Výstupní okno při Deploy aplikace do zařízení

- Debug mode

Mód ladění aplikace (*debug*) je výborný nástroj při tvorbě aplikací. Stejně jako u desktopových aplikací jsme schopni díky podpoře vývojového prostředí ladit program na cílovém zařízení. Ve zdrojovém kódu můžeme vytvářet zarážky (*breakpoints*), spouštět program k uvedeným zarážkám, krok po kroku procházet chování programu, sledovat obsahy proměnných a ladit tímto způsobem naprogramovaný zdrojový kód, odhalovat chyby či nežádoucí chování programu, přesto, že je již spuštěno na cílovém připojeném zařízení.

- Intellisense

Intellisense je vlastnost vývojového prostředí Visual Studio .NET a je přístupna pro vývoj na všech zmíněných podporovaných aplikacích. Při tvorbě kódu nám v objektově orientovaném prostředí je vždy po zadání proměnné objektu nabízen seznam metod a vlastností, které v dané situaci je možno použít. Na obrázku 6 vidíme nabízené podporované funkcionality po zadání objektu tlačítka (*button*).



Obr. 6 Intellisense nabízí vhodné metody a události pro daný objekt

- Obsluha událostí připojených modulů

Připojováním modulů na vývojové desky se vytváří prostor pro obsluhu jednotlivých reakcí na konkrétní událost spojená s funkčností připojeného modulu. Tuto situaci nazýváme obsluhou událostí (*event handler*) modulu a pro její vygenerování slouží postup vytvoření zdrojového kódu pomocí kombinace kláves. Ve vývojovém prostředí jsme o této funkcionalitě informováni prostřednictvím komentáře:

Many modules generate useful events. Type +=<tab><tab> to add a handler to an event, e.g.:`button.ButtonPressed +=<tab><tab>`

V praxi to znamená, že pomocí kláves tabulátoru vytvoříme kostru obsluhu události požadovaného modulu. Zdrojový kód události je samozřejmě již vývojářská záležitost, avšak uvedená funkcionalita prostředí vytváří tzv. štábní kulturu tvorby zdrojového kódu.

3 Vývoj a implementace měřicí aplikace s podporou ethernetu

Vytvoříme aplikaci, která bude zobrazovat informace ze senzoru teploty a tlaku prostřednictvím web serveru a ethernetového připojení do webového prohlížeče.

V úvodní části programu nadefinujeme proměnné webové události (*WebEvent*) pro odeslání informací o teplotě a tlaku ze serveru do webového prohlížeče klienta. Rovněž musíme zadefinovat obsluhu událostí modulu senzoru (*event Handler*) a spustit měření na senzorech.

```
{
    public partial class Program
    {
        GT.Networking.WebEvent sendTeplota;
        GT.Networking.WebEvent sendTlak;
        String TeplotaData, TlakData;
        // This method is run when the mainboard is powered up or reset.
        void ProgramStarted()
        {
            GT.Timer timer = new GT.Timer(2000);
            barometer.MeasurementComplete +=new
            Barometer.MeasurementCompleteEventHandler(barometer_MeasurementComplete);
            barometer.ContinuousMeasurementInterval = new TimeSpan(0, 0, 0, 0, 250);
            barometer.StartContinuousMeasurements();
        }
    }
}
```

Následující zdrojový kód nadefinuje obsluhu událostí změny ethernetového rozhraní *CableConnectivityChanged*, obsluhu událostí změny síťové adresy a obsluhu události sítě *NetworkUp*. Dále zpřístupníme ethernetové rozhraní, přidělíme statickou IP adresu (nebudeme přidělovat adresu dynamicky pomocí DHCP) a spustíme webový server.

```
ethernet.Interface.CableConnectivityChanged += new
GHI.Premium.Net.EthernetBuiltIn.CableConnectivityChangedEventHandler(Interface_CableCo
nnectivityChanged);
ethernet.Interface.NetworkAddressChanged += new
GHI.Premium.Net.NetworkInterfaceExtension.NetworkAddressChangedEventHandler(Interface_
NetworkAddressChanged);
ethernet.Interface.Open();
NetworkInterfaceExtension.AssignNetworkingStackTo(ethernet.Interface);
ethernet.Interface.NetworkInterface.EnableStaticIP("200.200.200.10", "255.255.255.0", ""
);
ethernet.NetworkUp +=new
GTM.Module.NetworkModule.NetworkEventHandler(ethernet_NetworkUp);
Debug.Print("Program Started");
string ipAddress = ethernet.NetworkSettings.IPAddress;
WebServer.StartLocalServer(ipAddress, 80);
```

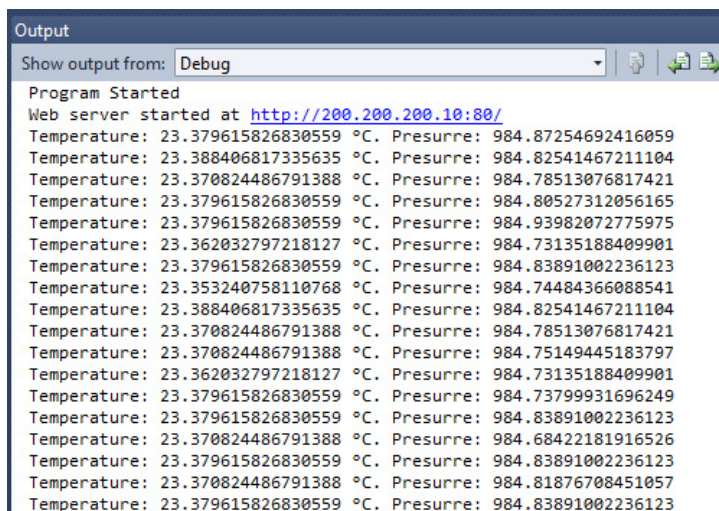
Dále je třeba nadefinovat ovladač obsluhy událostí pro zaslání informací ze sensorů o tlaku a teplotě a obsloužit událost ethernetového připojení *NetworkUp*:

```
sendTlak = WebServer.SetupWebEvent("pressure");
sendTlak.WebEventReceived +=new
WebEvent.ReceivedWebEventHandler(sendTlak_WebEventReceived);
sendTeplota = WebServer.SetupWebEvent("temperature");
sendTeplota.WebEventReceived +=new
WebEvent.ReceivedWebEventHandler(sendTeplota_WebEventReceived);
}

void ethernet_NetworkUp(GTM.Module.NetworkModule sender,
GTM.Module.NetworkModule.NetworkState state)
{
    string ipAddress = ethernet.NetworkSettings.IPAddress;
    WebServer.StartLocalServer(ipAddress, 80);
}
```

V události snímání měřených hodnot tyto metody zobrazíme v režimu ladění do výstupního okna vývojového prostředí.

```
void barometer_MeasurementComplete(Barometer sender,
Barometer.SensorData sensorData)
{
    Debug.Print("Temperature: " + sensorData.Temperature + " °C.
    Presurre: " + sensorData.Presurre);
    TeplotaData = "Actual temperature at room A753 is " +
    sensorData.Temperature.ToString() + " degrees of Celsius";
}
```



```
Output
Show output from: Debug
Program Started
Web server started at http://200.200.200.10:80/
Temperature: 23.379615826830559 °C. Presurre: 984.87254692416059
Temperature: 23.388406817335635 °C. Presurre: 984.82541467211104
Temperature: 23.370824486791388 °C. Presurre: 984.78513076817421
Temperature: 23.379615826830559 °C. Presurre: 984.80527312056165
Temperature: 23.379615826830559 °C. Presurre: 984.93982072775975
Temperature: 23.362032797218127 °C. Presurre: 984.73135188409901
Temperature: 23.379615826830559 °C. Presurre: 984.83891002236123
Temperature: 23.353240758110768 °C. Presurre: 984.74484366088541
Temperature: 23.388406817335635 °C. Presurre: 984.82541467211104
Temperature: 23.370824486791388 °C. Presurre: 984.78513076817421
Temperature: 23.370824486791388 °C. Presurre: 984.75149445183797
Temperature: 23.362032797218127 °C. Presurre: 984.73135188409901
Temperature: 23.379615826830559 °C. Presurre: 984.73799931696249
Temperature: 23.379615826830559 °C. Presurre: 984.83891002236123
Temperature: 23.370824486791388 °C. Presurre: 984.68422181916526
Temperature: 23.379615826830559 °C. Presurre: 984.83891002236123
Temperature: 23.370824486791388 °C. Presurre: 984.81876708451057
Temperature: 23.379615826830559 °C. Presurre: 984.83891002236123
```

Obr. 7 Debug režim vývojového prostředí s výpisem získaných hodnot ze sensorů

Na obrázku 7 vidíme výstup v ladícím okně vývojového prostředí se zobrazením aktuálních informací ze sensorů tlaku a teploty v periodickém občerstvení časovače. Zbývající zdrojový kód aplikace zobrazuje metody předání parametrů webových událostí a obsluhu zobrazení o stavu ethernetového připojení v ladícím okně vývojového prostředí.

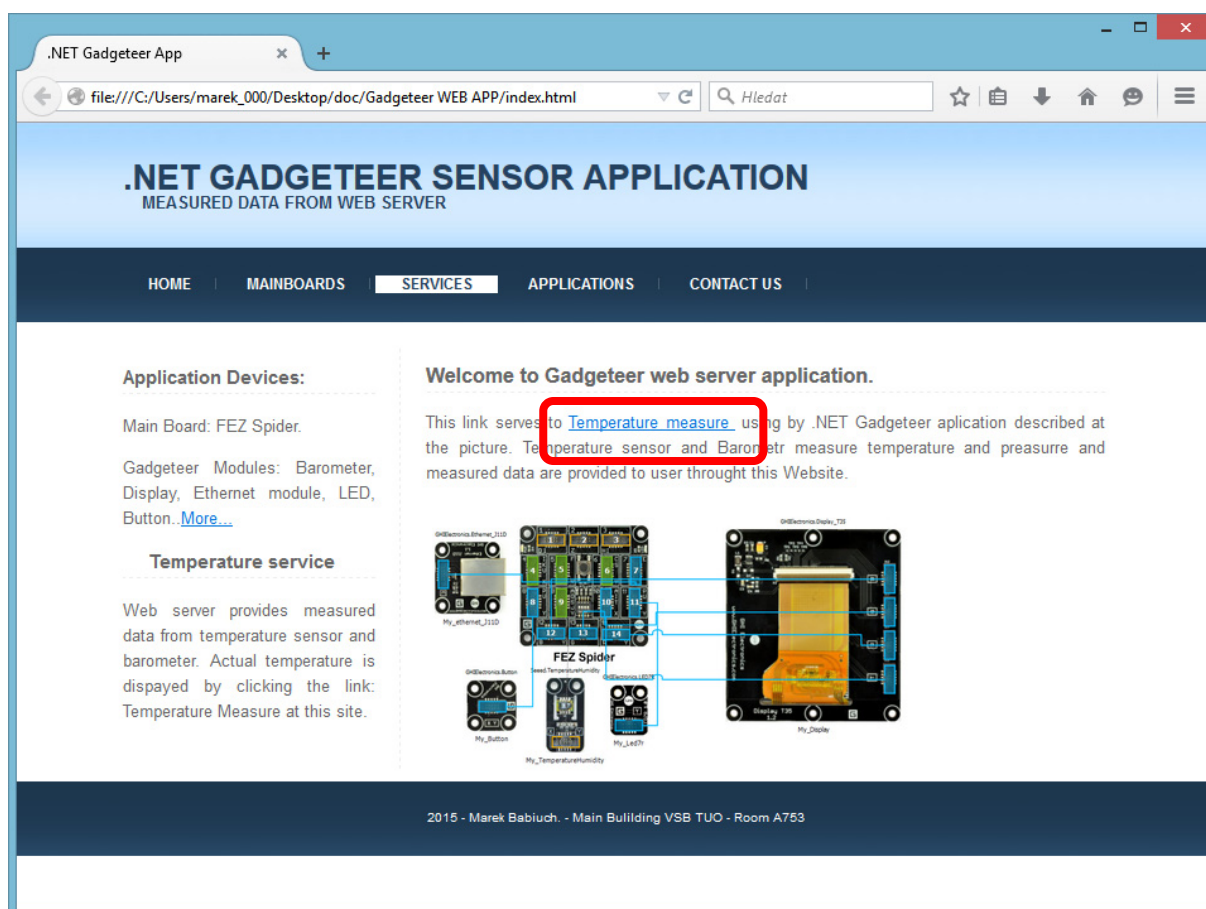
```
void sendTlak_WebEventReceived(string path, WebServer.HttpMethod method,
Responder responder)
{
    responder.Respond(TlakData);
}

void sendTeplota_WebEventReceived(string path, WebServer.HttpMethod method,
Responder responder)
{
    responder.Respond(TeplotaData);
}

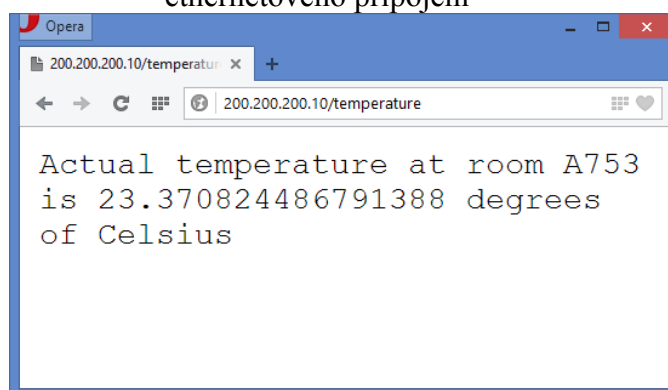
void Interface_NetworkAddressChanged(object sender, EventArgs e)
{
    Debug.Print("address changed");
    Debug.Print("IP address: " + ethernet.NetworkSettings.IPAddress);
}

void Interface_CableConnectivityChanged(object sender,
GHI.Premium.Net.EthernetBuiltIn.CableConnectivityEventArgs e)
{
    Debug.Print("conect");
    Debug.Print("IP address: " + ethernet.NetworkSettings.IPAddress);
    Debug.Print("Phyzical address: " + ethernet.NetworkSettings.PhysicalAddress);
    Debug.Print("Mask: " + ethernet.NetworkSettings.SubnetMask);
    Debug.Print("GW address: " + ethernet.NetworkSettings.GatewayAddress);
}
```

Na obrázku 8 je znázorněno okno aplikace zobrazené ve webovém prohlížeči klienta. Webová aplikace na definovaném linku vyvolá webovou událost a zobrazí informaci ze senzoru viz obrázek 9.



Obr. 8 Web aplikace pro zjištění hodnot ze sensorů připojených prostřednictvím ethernetového připojení



Obr. 9 Odpověď web serveru na požadavek zjištění teploty

4 Závěr

Příspěvek byl věnován popisu tvorby aplikace v technologii .NET Micro Framework s vývojovými zařízeními Gadgeteer technologie společnosti GHI Electronics. Byly popsány základní aspekty návrhu měřicích aplikací s popisem jednotlivých kroků vývoje. Tato na trhu relativně nová open-source technologie má jistě budoucnost, patří jí silná pozice ve vývoji .NET Micro Framework aplikací, bude nadále vyvíjena a je třeba sledovat její další vývoj v oblasti celé technologie .NET frameworku. Výsledky práce byly dosaženy s podporou projektu SGS podporovaným MŠMT: SP 2015/18 - “ Nové přístupy k řízení strojů a procesů”.

5 Použitá literatura

GHI Electronics, “GHI Tutorials”, available at: <https://www.ghielectronics.com/docs/37/netmf-and-gadgeteer-tutorial-index>, 2014.

KUHNER, J. “Expert .NET Micro Framework (Expert's Voice in .NET),” Springer-Verlag New York, ISBN 978-1-59059-973-0, 2008.

Microsoft, Micro Framework websites, available at: <http://www.netmf.com/>, 2015.

MONK, S. “Getting Started with .NET Gadgeteer,” O’Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472, May 2012, ISBN 978-1-449-32823-8.

Sytech Designs web portal, available at: http://www.sytechdesigns.com/micro_framework.htm, 2015.

THOMPSON, D., MILES R., “Embedded Programming with the Microsoft® .NET Micro Framework,” Microsoft Press, ISBN 978-0735623651, 2007.

The Models of Dynamic System Boring Machine - Rock

BARANOVÁ, Vladena¹, LANDRYOVÁ, Lenka² & FUTÓ, Jozef³

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

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

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

Abstract: *current information technology allow sensing and processes data recording under severe conditions of operation with new technical means in real time, storing the measurement data, its processing and evaluation in situ or in the laboratory [1]. An example would be a monitoring system that was used by machinery exploratory gallery excavation tunnel Branisko. The monitored variables of the boring process were downforce of disconnecting head of boring machine, torque, speed of disconnecting head, the power consumption of the aggregate and the extended position of disconnecting head depending on the drilled length. These measured values allowed the creation of models, which help to modeling various properties of boring process within the meaning of Eykhoff definition: "A model is an expression of the essential characteristics of an existing object, which describes the knowledge of this object in a usable form" [2, 3].*

Keywords: *model, modeling, planned experiment optimalization of the process.*

1 Introduction

Boring of the Exploration gallery Branisko from the east took place with the help of full-profile tunneling machinery Wirth TB-II-330H/M. During tunneling the boring machine went through various geological formations. Tunnel tube was excavated simultaneously from both portals by New Austrian Tunnelling Method Technology (NATM).

2 Monitored variables of tunnel boring machine Wirth TB-II-330H/M

Installation of a monitoring system for tunnel boring machine allowed its use as a research facility. Restrictions were the only Technical parameters and operating conditions. The examples of monitored variables courses depending on drilled length in the same section of boring are in Figures 1 to 4.

The each course shows that in general this are the random variables, depending on drilled length and with the known sampling rate $f_{vz}=2,03$ s have different values.

In Figure 1 we can notice the course of the downforce of the boring machine head, which acts on the rock. In that section of monitored signal we can notice that the values oscillate in much of the range of values from 500 to 600 kN. The drilled length of rock at a distance of 144.68 m shows a rapid increase in the observed values of around 40 kN, representing start-up

and downforce on the boring machine head. Its course in the part of the signal looks like a unit step.

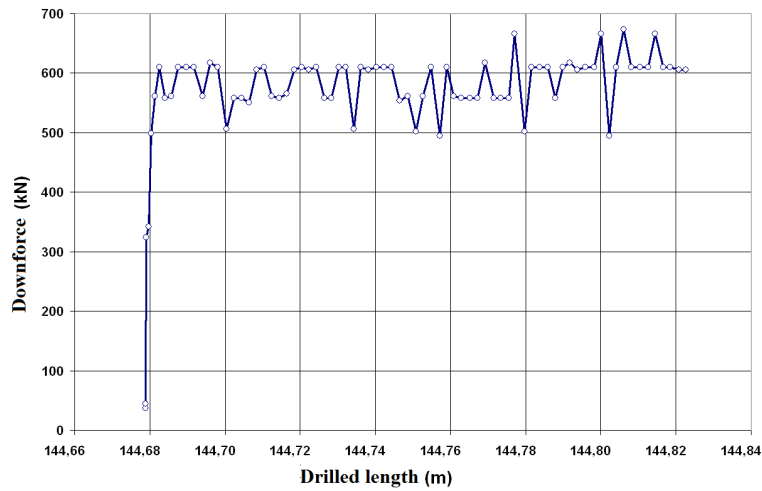


Figure 1 – The course of the part of monitored signal – downforce

In Figure 2 is the part of the signal of torque, which acts on the boring machine head. Its course oscillates in much of the observed signal in the range from 80 to 100 kNm in the amount of 144.68 m drilled length off watching the fall and subsequent rise in the signal value of 80 kNm.

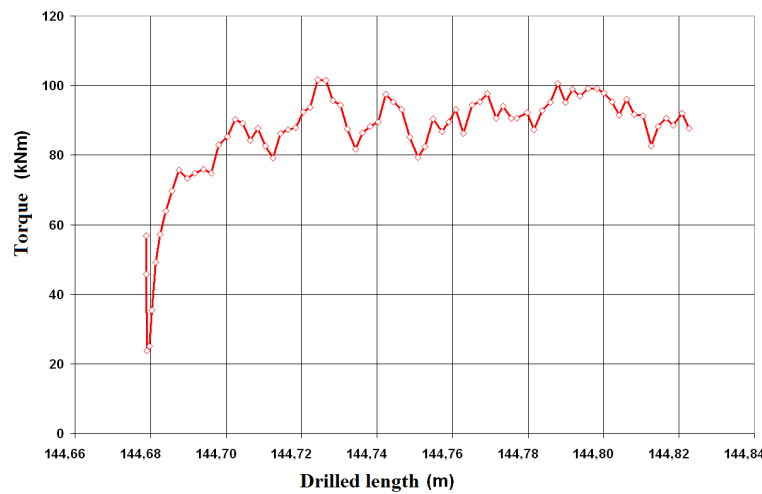


Figure 2 – The course of the part of monitored signal – torque

In Figure 3 we can see the course signal speed, which in large part oscillates around the value 0.00225 s^{-1} in the range of 0.0022 to 0.0023 s^{-1} . Rapid onset and subsequent decline observed variable is explained by changing the applied downforce the boring machine head to the disintegration massif.

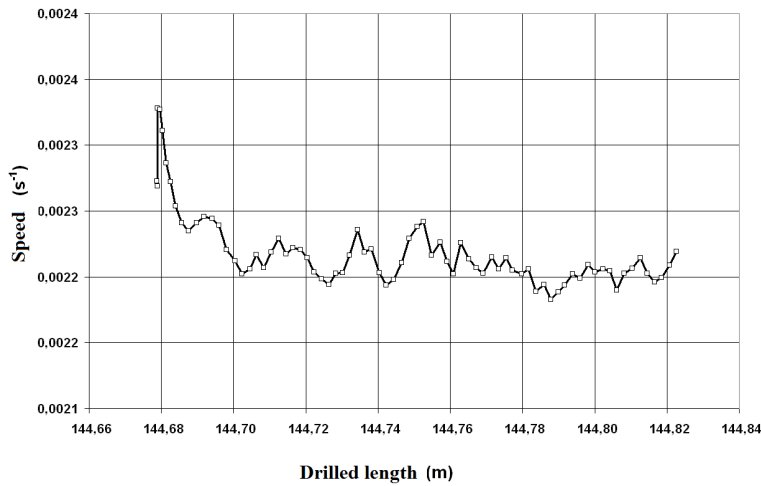


Figure 3 – The course of the part of monitored signal – speed

In Figure 4 is part of the signal, which represents a value of the force needed for rock massif disconnecting in each time period, respectively in the case of its integration mentioned course represents a work done at disconnection this outturn of rock, which is given by average of the boring machine head and a drilled length. The signal value is in the range of drilled length of 144,70 m to 144,82 m and oscillates around the value 9000 kW, merely around a drilled length of 144,68 m is possible monitor the sharp increase and decrease.

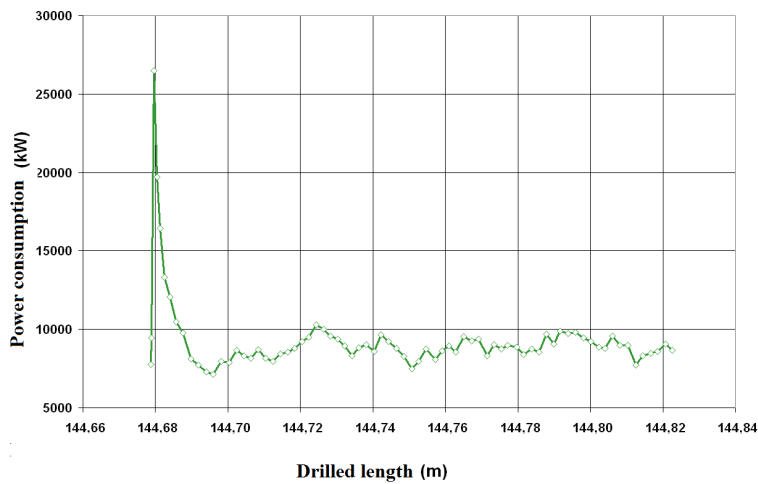


Figure 4 – The course of the part of monitored signal – power consumption

3 Mathematical models of system boring machine - rock

In general, this system has q inputs and v outputs that can be described in the operating point and its vicinity by equations:

$$\mathbf{x}^{(1)}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \quad (2)$$

where $\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{y}(t)$ - mean state variables, input and output,

$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ - mean matrices with the appropriate dimensions.

The starting point for the system identification are measured values, it means inputs and outputs.

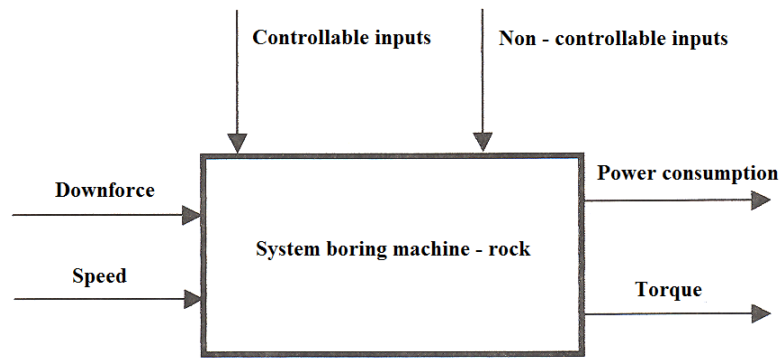


Figure 5 – System boring machine – rock inputs/outputs

In Figure 5 is displayed simply dynamic system boring machine - rock. As input variables we consider downforce and speed and output variables torque of the boring machine head and the power consumption depending on drilled length, respectively on time. Sampling frequency of signals is $f_{vz} = 2,03$ s.

Dynamic model creating is based on the characteristics of the input signal downforce F , part of which can be considered as unit step. On the output side we monitor the course of the signal torque M_k , 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 Figure 5).

Converted time course of output value M_k to a unit change in the input variable F is transient response. 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. Its principles is based on using of more realizations (repeated measures) for the resulting course specifying.

$$f_i = \frac{\sum_{k=1}^N \text{sign}(\Delta u_k) y_{ik}}{\sum_{k=1}^N |\Delta u_k|}, \quad (3)$$

where f_i - means ordinate the resulting transient response in the time $t = i\Delta t$ and Δt is a 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 a number of repeated measurements of transient response in general unequally large step input variable object,

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

i - means an order of sampling points of transient response, $i = 0, 1 \dots m$ [4].

By the model creation according to equation (3) is important to elect appropriate number of repeated measurements. Its final number is given by statistical and physical regularities of investigated system. The examples of these courses we can monitor in Figure 6.

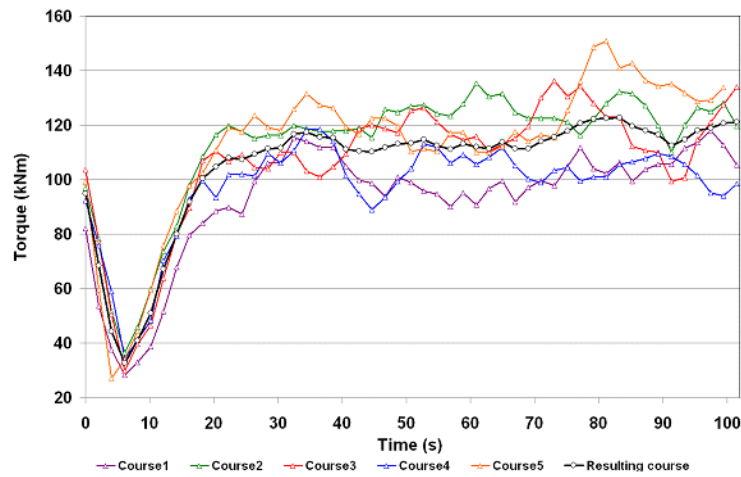


Figure 6 – The courses of transient responses of the repeated measurements and resulting statistical model

Listed resulting statistical model is possible to substitute by approximation - the simplest differential equation of first order without, respectively time-delay. An example of this approximation we can monitor in Figure 7.

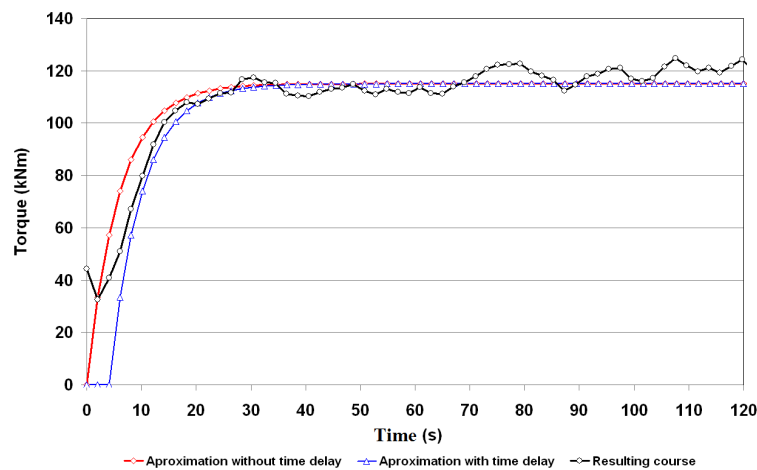


Figure 7 The model without time delay and the model with time delay

Monitored variables allowed application of Box evolution method of planning by monitoring of two input variables (factors), which were kept approximately on the constant level to the system: downforce and speed. The Figure 8 shows two-dimensional cut of the surface, where output variable (monitored indicator) has another method of measurement and physical interpretation. According to used graphical interface, the isolines are substituted by square (quadratic) grid structure, which division is given by process values. The arrow indicates the direction of progress towards optimum in this case the minimum energy consumed in the process of disintegration.

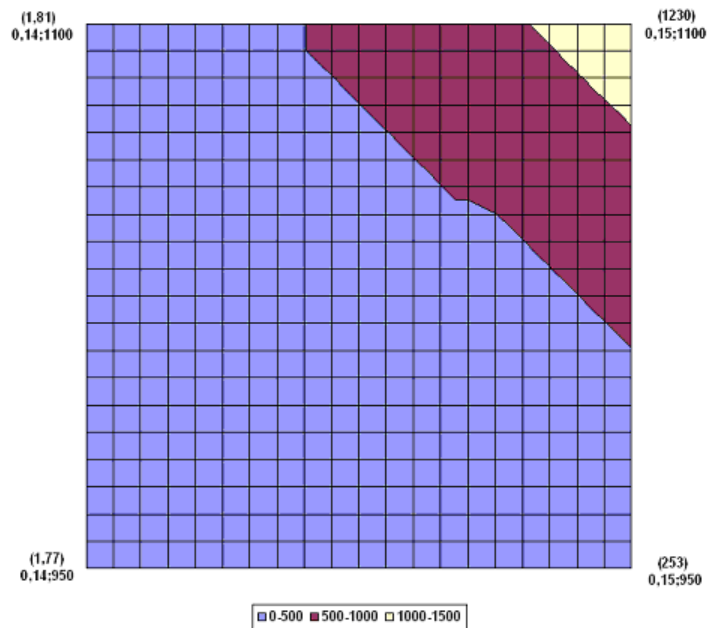


Figure 8 An application of Box method in the process of tunnel boring machine - rock

4 Conclusions

1. For editorial limitation article only briefly describes some graphical and mathematical models of system boring machine - rock. It is largely the models, that serves for the investigation of the dynamic properties of the system.

2. By model creating an important role has their accuracy, which is determined by the purpose (aim) for which they were created. An example of such a model is the median probability course according to equation (3), which forms the basis for all other additional models.

3. For quantitative evaluation of the quality of the model, we can use a criterion that describes monitored part of the model in an appropriate way. For the models mentioned in the article are used the integral criteria that takes appropriate account of the whole monitored course.

4. The models based on Box method describe the synergetic effect of two input variables on output variable and allow to monitor visual approach towards the optimum.

5 References

- [1] Krúpa, V., Pinka, J.: Rozpojovanie hornín, Košice, F BERG TU Košice, 1998, ISBN 80-888896-10-X
- [2] HANZELOVÁ, M., FLOREKOVÁ, Ľ.: Environmental performance evaluation. In 5th International Control Conference 2004. Zakopane, Poland, 25. – 28. may 2004, pp. 915 – 918. ISBN 83 – 89772 – 00 – 0
- [3] ISERMANN, R. : *Prozessidentifikation*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1974
- [4] ROHAL-ILKIV, B.: *Identifikácia sústav*, SVŠT, Bratislava, 1985

Robotic Platform for Gait Disorders Monitoring

CRHA, Jan¹, ŤUPA, Ondřej² & MAREŠ, Jan³

¹ Ing., ✉ VŠCHT Praha, Fakulta chemicko-inženýrská, Studentská 5, 166 28 Praha 6, 🖥️
jan.crha@vscht.cz, 🌐 uprt.vscht.cz

² Ing., 🖥️ ondrej.tupa@vscht.cz, 🌐 uprt.vscht.cz

³ Ing. PhD, 🖥️ jan.mares@vscht.cz, 🌐 uprt.vscht.cz

Abstract: *This paper is focused on the control of a six wheeled robotic platform used for the gait pattern recording of people with gait disorders.*

A key part of the whole robotic platform is a MS Kinect v2 device which tracks the patients' gait. The Kinect also provides the information about the distance driven by the robot to a micro controller LPC1768 which is responsible for the wheels' control. The driven distance is controlled by six encoders that are connected directly to the motor shafts.

There is a cascade of controllers in the LPC for the distance and speed control. The first level of the controller ramps the speed for a smooth start and stop. The second level is represented by three controllers; each one takes care of the wheel speeds on one axle. Another six controllers are in the third level, each is responsible for a more precise speed control of one wheel.

Keywords: *robot control, MS Kinect, gait tracking*

1 Introduction

This paper reports about a six wheeled robotic platform that is used for obtaining the gait pattern. The records are consequently evaluated to see whether the symptoms of the gait disorders are present or not. Neural diseases like Parkinson's or Alzheimer's disease influence the gait pattern and could be observed by the gait analysis.

Many papers deal with the Parkinson's disease and its influences to the walk and the body holding, recently. There are several ways how to observe the movements or the gait of patients, these systems are mentioned in many papers [1,2,3]. From the neurologist point of view, the gait on the treadmill or with special equipment attached directly to the body of the person is different from the natural one. For example, the difference in walking on a treadmill is in the inner ear movement data processing. The inner ear is a complex sensor of movements and it takes care of the stability. Walking on a treadmill causes that the inner ear sends information that the body does not move, but the legs move. This situation is confusing for the brain.

This paper deals with one of the possible ways how to eliminate these disadvantages. The patients' gait is tracked from a mobile robotic platform. This robotic platform was developed to eliminate main differences and it is designed to capture the movement of the whole body during natural walking. The Kinect v2 sensor is used for the subject tracking. It calculates the 3D position of the 25 major joints.

This approach seems to be promising from the neurologist point of view, but it causes some problems with the gait reconstruction:

- The absolute position of both observed subject and sensors has to be calculated.

- The path of robotic platform has to be as narrow as possible, for easier gait reconstruction
- The platform must avoid of any shakes, for higher video quality and gait reconstruction.

2 Motivation

The gait analysis involves a measurement, an extraction of the well-describing features and an interpretation of the results leading to a conclusion about the health of the subject. The process of measurement is highlighted in this paper. There are several techniques how to observe the gait pattern. There are two main categories of the features that have to be observed during the gait tracking.

Temporal and spatial measurement provides the features such as the walking speed or the stride length. This process is usually carried out by a stopwatch and marks on the ground, walking on a pressure mat, laser sensors placed few centimetres above the ground or inertial sensors (gyroscopes and accelerometers).

Measurement of Kinematics could be performed by following methods:

- Chronophotography is using the strobe lighting at a known frequency and capturing the images
- Cine film or video recordings from a single or multiple cameras to measure joint angles and velocities. This method allows an analysis in three dimensions.
- Passive marker systems consist of reflective markers and multiple cameras (up to 12) sensitive to the reflection of the used materials (usually red, infrared or near infrared).
- Active marker systems are based on a similar philosophy as the passive markers with the exception that the markers are triggered by the incoming signal.
- Inertial systems do not need any camera and the movement is captured by a set of sensors. Each sensor is a combination of a gyroscope and an accelerometer. The gait tracking is inferred according to a biomechanical model and a fusion of the information from all sensors.

All these methods need some special equipment of the laboratory, wearable sensors limiting the movement or sensors dedicated to one purpose. Our method of capturing the gait pattern is using the MS Kinect sensor providing the skeletal tracking function. The skeletal tracking function enables to determine the position of the 25 main body joints derived from the depth frame (algorithm by J. Shotton and others). The disadvantage is the limitation of the Kinect sensor field of view, enabling reliable tracking of people only in the distance between 0.5 m and 4.5 m. Therefore the combination of the cost-effective Kinect sensor and the mobile robotic platform is opening a new possibility to track the gait pattern.

In the previous studies [5,6] the Kinect device was placed stationary on a table to track people in its field of view. The MS Kinect that was used for data acquisition was installed approximately 60 cm above the floor. Each individual repeated a straight walk of approximately 4 m (five steps) back and forth 5 times. The experimental portion of this study was devoted to the analysis of the gait of the following two sets of individuals: 18 patients with Parkinson's disease and 18 healthy age-matched individuals. From the acquired records 5 features were extracted – walking speed, stride length, center of mass deviation in the horizontal and vertical projection and limb synkinesis. The results were obtained by a combination of these characteristics by a neural network and the accuracy of decision of this system was up to 91.7 %.

3 Equipment of platform

The platform was developed as a six wheeled remote controlled robotic platform. Each wheel is equipped with a motor with an encoder and a driver. The motors are high power and their maximal rated consumption is about 4 amps with 7 V supply each. Each motor has also a gearbox attached with a 75:1 gear ratio, together they provide enough torque to climb a 60° slope. The maximal speed is about 7 km/h and it is measured by quadruple encoders attached

directly to the motor shafts. Each encoder provides 24 pulses on each channel per revolution, so there are approximately 3600 pulses per revolution of a wheel.

Each motor has our custom full H-bridge driver, which is controlled via the SPI. The driver can supply the motor with up to 5 amps continuously without any additional heat sink.

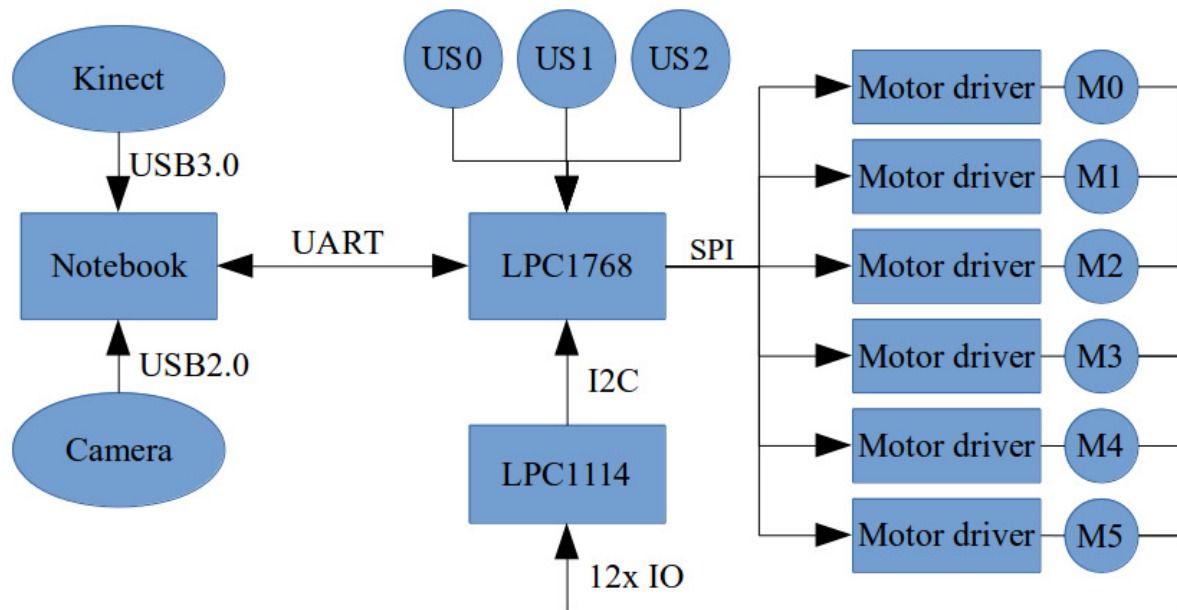


Figure 1 – Scheme of the connections and the modules

Due to the usage of many pins for the SPI, there must be an auxiliary processor to handle all the encoders. For this reason the platform is equipped with an LPC1114, which is an ARM Cortex-M0+ processor, running at 48MHz and in a user-friendly DIP28 package. The LPC1114 is providing information to the main microprocessor on request via the I2C. The main microprocessor is the LPC1768, which is an ARM Cortex-M3 processor, running on 96MHz and with a 512kB FLASH and a 64 kB RAM.

To avoid obstacles there are three ultrasonic sensors connected directly to that processor. All of them are triggered together to avoid cross echo detection. The ultrasonic sensors can measure the distance in a range from 2 cm to 400 cm and 20 times per second.

The image processing is done in a notebook, the images from the Kinect and also from the camera are processed there. The notebook is an Asus zenbook, which is very light and can run long time on the battery power. The attached camera can provide 720p images at 30fps and no additional power supply is needed.

An MS Kinect v2 is connected to the notebook and also to the special power supply via USB3.0, which is capable to provide stable 12V 3A for the sensor from the Li-Po battery pack. The Kinect sensor provides RGB images, depth data image, infra red image and it can also localize the 3D position of the 25 main individuals' joints. The Kinect can track up to six people at one moment and in a range between 1m and 4.5m.

4 Control of platform

The goal of the control is to drive in front of the tracked individual and in the same distance and the same direction. For this reason the control is realized as a cascade computing many input variables. For better measurements, there is a path for both the platform and the individual, marked by a coloured line on the floor.

The main control loop is in the notebook. The depth data and the skeleton information from the Kinect are processed there, to obtain the most precise distance between the individual and the platform. From the measured distance and from the driven distance the speed deviation and then a new speed set point for the platform are computed.

The front camera image and the Kinect RGB image are both used for computing the direction divergence. Based on both – the speed and the direction divergence – new track is computed. The algorithm for returning to the path is quite simple. If the divergence is smaller than 5° , the platform is only controlled by different speeds on the right and the left side. When the direction divergence is greater, the platform has to change the direction back to the path more smoothly. This is done by a circle path, when the platform is pointing back, it drives straight to the path. When the platform is near the original path, a differential way of control is used again to correct the direction.

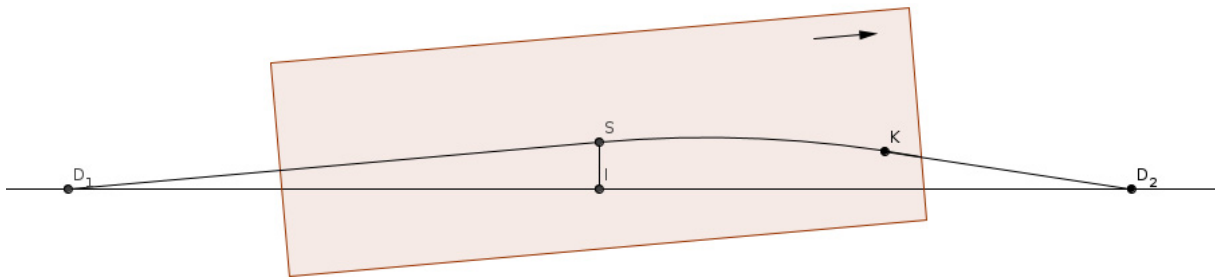


Figure 2 – The platform path corrections

On the figure 2 the platform is shown as a brown rectangle. The center of the platform is marked with the letter S and the original path is the line D_1, D_2 . The position deviance is the $|SI|$ and the angle divergence is equivalent to the angle $[S, D_1, I]$. In the first stage, the platform drives on the circular path between the points S and K. For a correct circular path, there is a custom script that computes the speed for each wheel. When the platform reaches the point K, it drives straight to the point D_2 , where it corrects the direction to the original line.

The second control loop is in the LPC1768 that obtains short commands specifying the type of the movement needed – the differential control, the straight move or the circular move. Each type has its own parameters that are a part of the message. The LPC1768 computes the speeds for all the wheels and then it uses the data from all the encoders to control the desired speed.

There are several ways how the speed divergence of one wheel is compensated. During the two second start of the movement all the speeds are slowly increased from zero to the desired speed. When the platform is already moving, there is an axle compensation active, which means that if one wheel is slower by more than 5 % of its speed, the second wheel on the same axle also slows down. The third possibility of compensation is used when a big divergence occurs in a short time. The reaction to this scheme is increasing the speed of the other wheels on the particular side. The speed of the wheel itself is controlled by a PI controller, whose model was tested in MATLAB, to avoid any overshoot and for a smoother startup.

5 Gait reconstruction

The next step in the process of the gait tracking is to reconstruct the gait pattern from the captured raw data. For the recording purpose a C# application was written to store the recorded skeleton data from the Kinect and the information about the distance driven by the robot.

The data from the Kinect contains a 3D position of the 25 joints returned by the skeletal tracking function and a time stamp of each frame. In the application to the data recording this is a procedure that after the frame is returned from Kinect sends the request to the ARM micro

controller and the answer is the distance travelled by each of the six wheels. This distance driven by each wheel is necessary to compute the overall robot movement and figure out the exact actual direction of the MS Kinect device at this frame. For modelling the gait pattern the movement of the robot is subtracted in the processing.

The most common and the most required case is the movement of the robot only in one axis. If there is an operational interference of the ARM processor, it is necessary to alter the absolute 3D position of the joints. For the verification of the correct process of the gait reconstruction it is possible to observe the center of the mass (COM) movement. If the processing is successful, the COM position is fixed, only with the regular deviation corresponding to the swings of the legs. On the contrary, there will be a discontinuous movement of the COM if the reconstruction is wrong.

After the reconstruction of the gait pattern the feature extraction follows. The temporal and spatial gait characteristics are the walking speed and the stride length. The features describing the kinematics of the gait pattern are computed on the static skeleton. The static skeleton refers to the situation, where the general movement – mean distance travelled by all joints – is subtracted. On the static skeleton it is possible to reveal the limb synkinesis, COM deviation and other details different from the periodic gait pattern.

6 Conclusion

Contemporary result of this project is the hardware solution of the robotic platform. This platform can perform autonomous measurements that are used for the gait analysis. The platform can alter the behavior in different scenarios to avoid possible problems during the measurements. The control of the platform is still in progress and there are some details waiting for more precise and specific solutions and to generalize the overall control.

The project is now in the testing phase in the university background. We are setting different situations and scenarios that will probably occur in the future in the neurology department of FN Hospital in Hradec Králové. We are trying to automatize the control to achieve the narrow path of the platform. Another goal is to create the user-friendly program for recording, which will be handled only by the staff of the hospital.

Financial Support from Specific University Research (MSMT No. 20/2015)

8 References

- [1] Boyd, J.E., Godbout, A., Thornton, C., In Situ Motion Capture of Speed Skating: Escaping the Treadmill, *Computer and Robot Vision*, p.460-467, May 2012. ISBN: 978-1-4673-1271-4
- [2] Machida E., Cao M., Murao T. and Hashimoto H., Human Motion Tracking of Mobile Robot with Kinect 3D Sensor, *SICE Annual Conference*, p.2207-2211, 2012
- [3] Stone E. E. and Skubic M., Unobtrusive, Continuous, In-Home Gait Measurement Using the Microsoft Kinect, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60, 2925–2932, 2013
- [4] Crha J., Kiš M., Mareš J., Úloha inverzní kinematiky - nástroj pro řízení robotického manipulátoru. *Perner's Contact*, vol. 8, no 3, 2013. ISSN 1801-674X
- [5] Procházka A., Vyšata O., Vališ M., Ťupa O., Schätz M., Mařík V., Use of the Image and Depth Sensors of the Microsoft Kinect for the Detection of Gait Disorders. *Springer: Neural Computing and Application*, 2014. DOI 10.1007/s00521-015-1827-x. ISSN 0941-0643
- [6] Ťupa O., Multi-Dimensional Data modelling and Analysis Using MS Kinect. *Diplomová práce, VŠCHT Praha 2014.*
- [7] Crha J., Control of mobile robotic arm chassis. *Diplomová práce, VŠCHT Praha 2014.*

Rozšíření možností Linguistic Fuzzy-Logic Control automatickou změnou kontextů Extending Linguistic Fuzzy-Logic Control possibilities by automatic context change

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

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

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

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

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

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

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

Abstrakt: příspěvek popisuje rozšíření možností systému Linguistic Fuzzy-Logic Control, vyvinutého na Ostravské univerzitě v Ostravě pro řízení technologických systémů. Jednoduchost popisu strategie řízení s jeho pomocí naráží v některých případech na omezení použitelných fuzzy hodnot. V takových případech může být účinným nástrojem vedoucím ke zlepšení dosažených výsledků použití automatické změny kontextů, popsané v tomto příspěvku. Postupy vypracované v Laboratoři inteligentních systémů řízení Ostravské univerzity v Ostravě jsou prezentovány na řízení modelu vrtulníku, který reprezentuje rychlou regulovanou soustavu s velmi malým tlumením. Příspěvek ukazuje, jak je možné regulátory využívající metodiku LFLC dále zlepšit použitím automatické změny kontextů LFLC regulátoru.

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

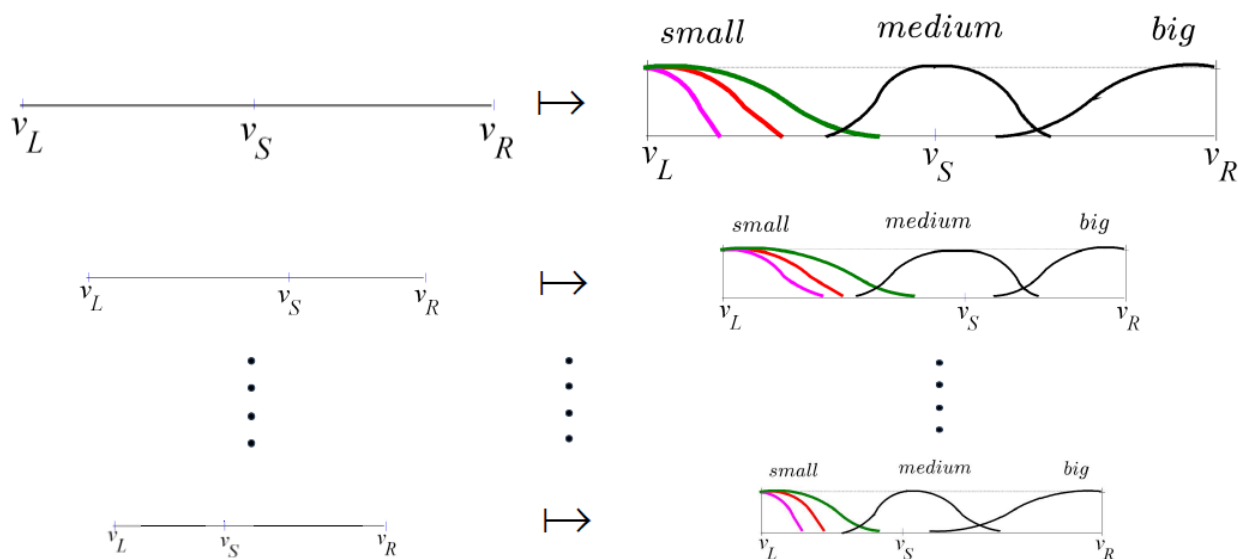
1 Princip Linguistic Fuzzy-Logic Control

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

regulované soustavy, nedostatku znalostí o regulované soustavě, lidský faktor v řízení, a další, obvykle v kombinaci několika vlivů.

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

Jednoduché hodnotící jazykové výrazy mají obecnou podobu <linguistic modifier> <TE-adjective> (kde <TE-adjective> je jedním z přídavných jmen "malé - sm, střední - me, big - bi" nebo "zero - ze ". <linguistic modifier> je příslovce, jako je "extrémně - ex, výrazně - si, velmi - ve, spíše - ra, více či méně - ml, přibližně - ro, přibližně zhruba - qr, velmi zhruba - vr"), viz obrázek 1. LFLC je dobrým nástrojem pro definování strategie řízení, můžeme ho použít i pro řízení rychlých technologických procesů se vzorkovací periodou 0,01 [s] nebo kratší. Příspěvek prezentuje příklad citlivého nelineárního modelu vrtulníku, který představuje velmi rychlé systémy řízení. Tento model je velmi užitečný pro ověření návrhu systému řízení, protože jeho popis a matematický model jsou k dispozici, např. [Humusoft 2014].



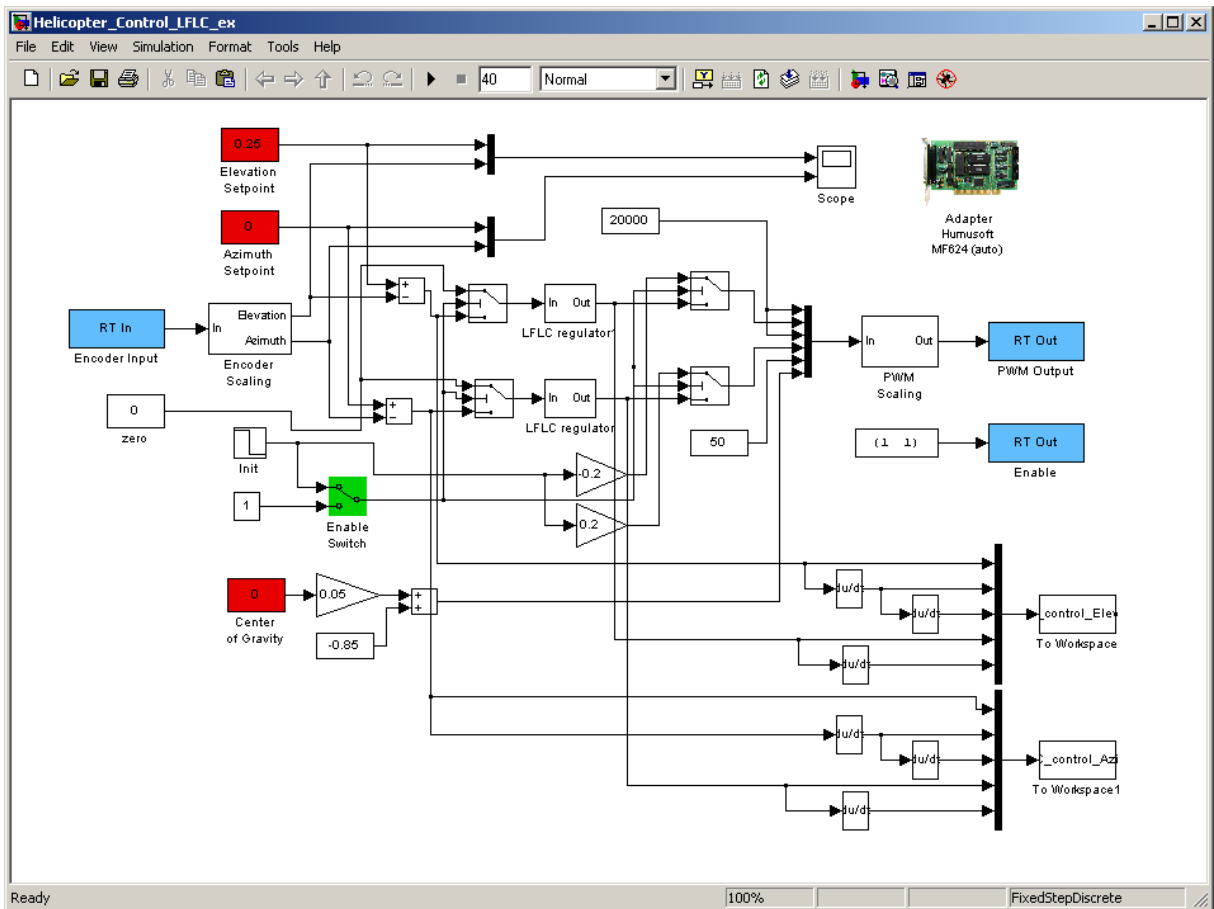
Obrázek 1 – Základní principy určení hodnot (extrémně malý, velmi malý, malý, střední a velký) jako funkce přiřazující ke každému kontextu $w \in W$ specifickou fuzzy množinu [Novák 2010]

2 Řízení modelu vrtulníku

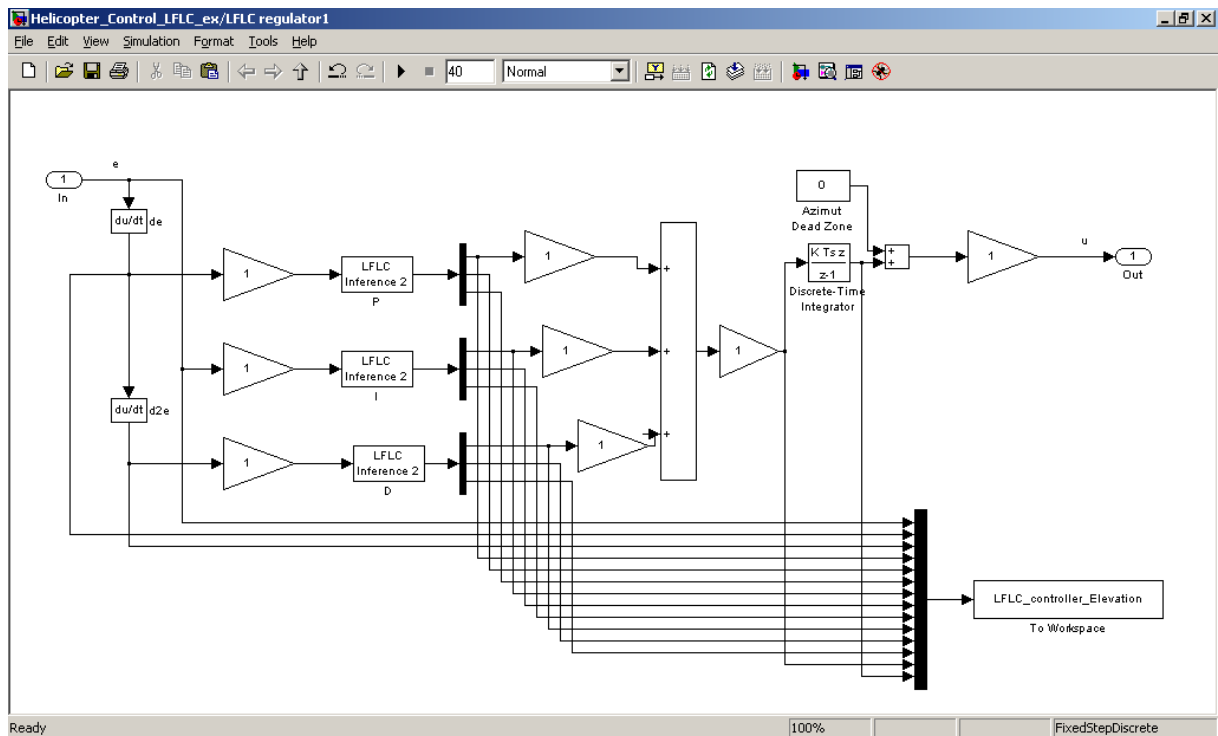
Model vrtulníku představuje citlivý dvourozměrný systém řízení – řízeny jsou úhly náklonu a azimutu a je možné je řídit odděleně. Identifikace regulované soustavy a návrh regulátoru byly popsány v předchozím příspěvku [Farana *akol.* 2014], na který nyní navazujeme. Systém řízení byl odvozen od standardního návrhu výrobce v prostředí Matlab/Simulink, viz obrázek 2.

Vlastnosti regulované soustavy si vynutily specifické řešení LFLC regulátoru s oddělenými parametry, viz obrázek 3. Největší problémy způsobovaly hodnoty derivací regulační odchylky, které nabývají o dva (resp. čtyři) řády vyšších hodnot než samotná

regulační odchylka. Proto byly testovány další možnosti úprav systému řízení, využívající např. FIR filtry, viz [Cedro & Janecki 2011]

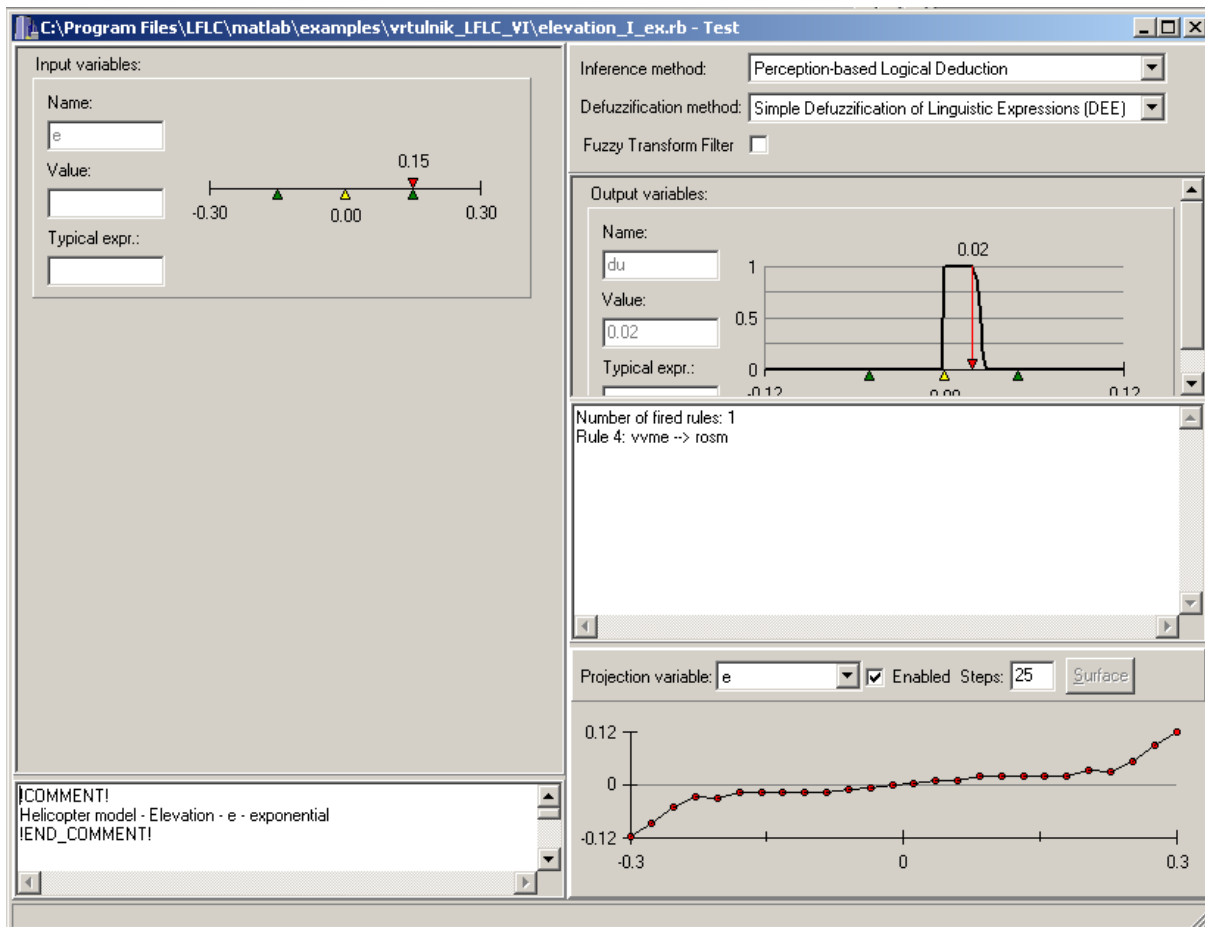


Obrázek 2 – Systém řízení úhlu naklonění a orientace vrtulníku



Obrázek 3 – Fuzzy regulátor úhlu naklonění vrtulníku

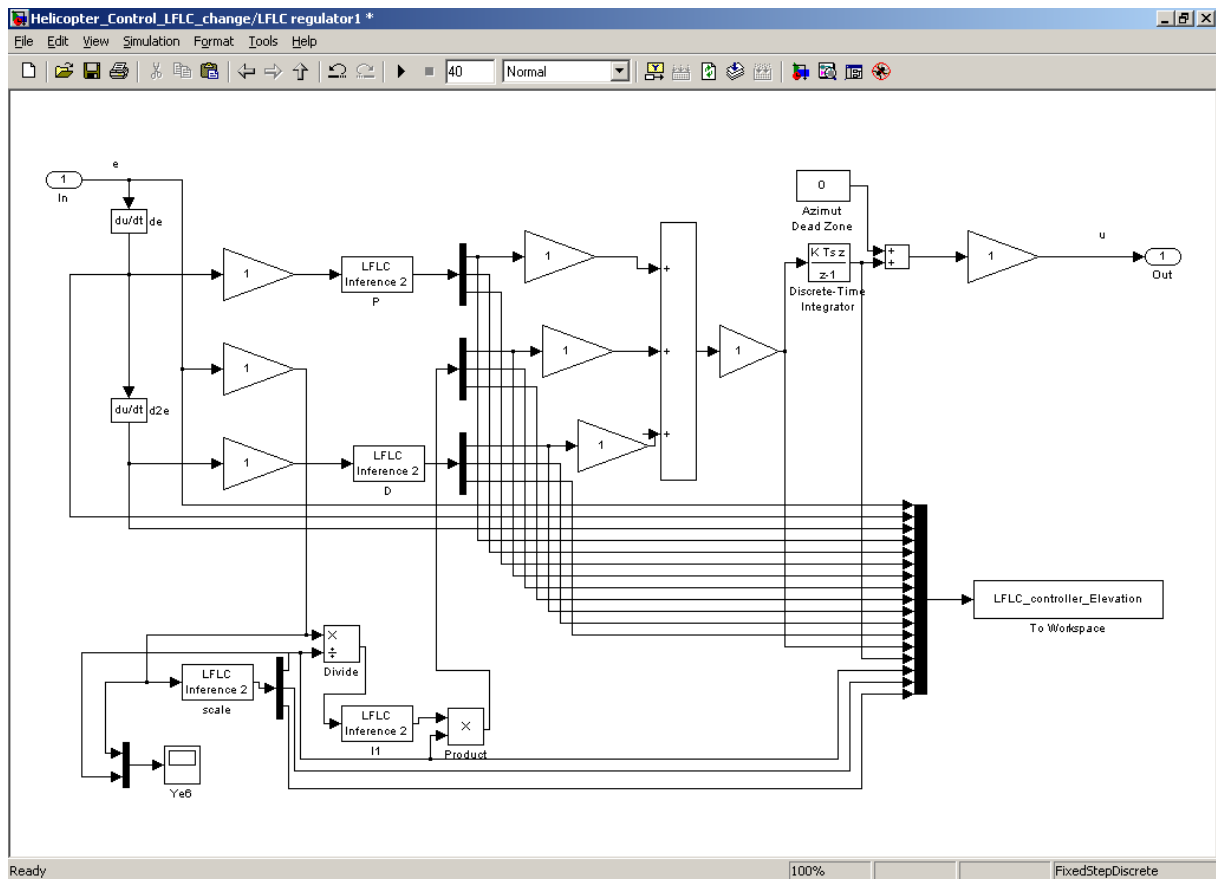
Inferenční blok LFLC propojuje vždy jeden LFLC regulátor definovaný souborem pravidel, jeho chování dokumentuje obrázek 4. Jedná se o jednoduchou strategii řízení, kdy na malé odchylky regulátor reaguje malým zásahem, na velké naopak velmi velkým.



Obrázek 3 – Fuzzy regulátor úhlu naklonění vrtulníku

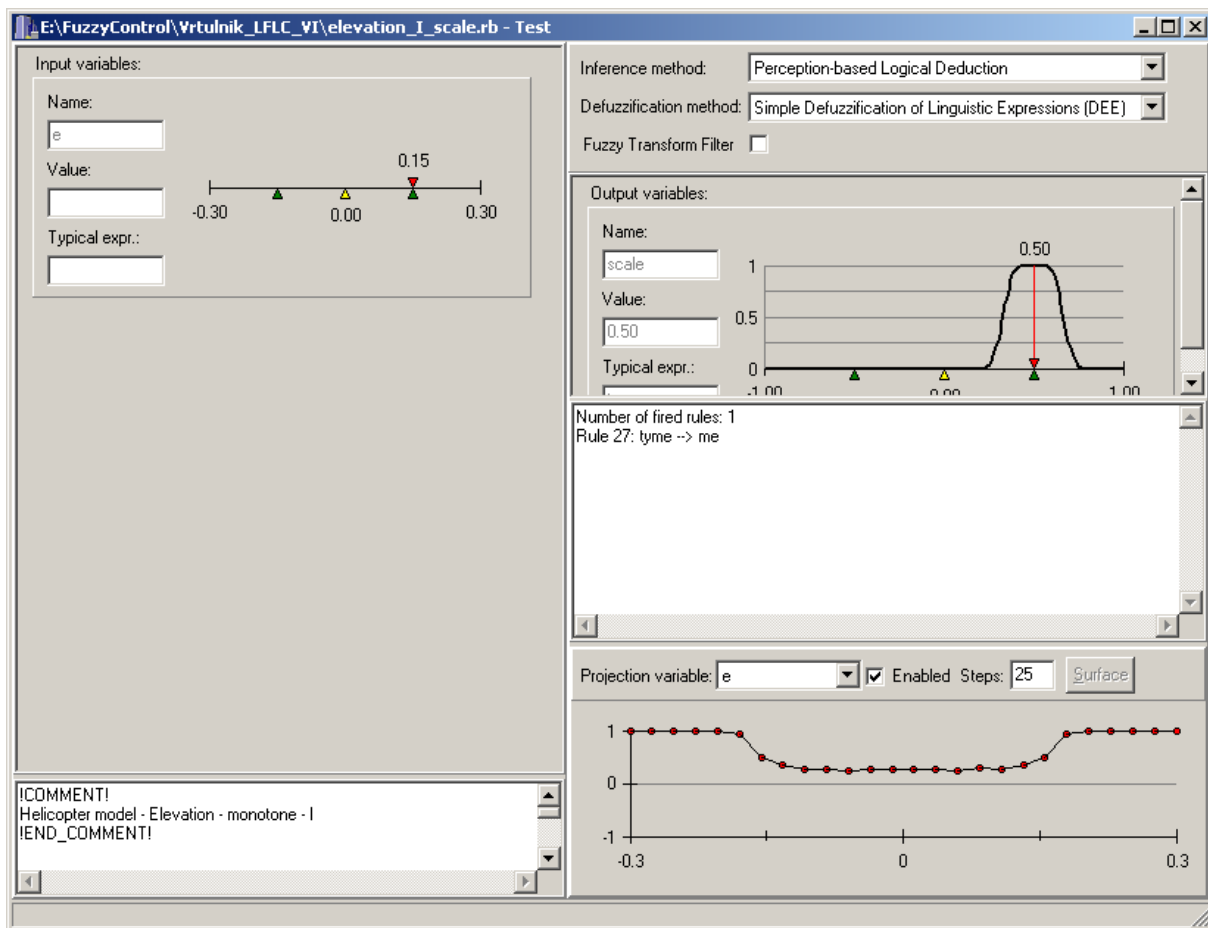
Z předchozího článku [Farana okol. 2014] víme, že tato strategie dosahuje velmi dobrých výsledků. Bohužel má však svá omezení. Tím je především tendence k ustáleným kmitům systému při požadavku na zachování konstantního úhlu náklonu resp. omezená přesnost jeho dosažení. Je to důsledek mimo jiné malého počtu fuzzy hodnot pro malé odchylky náklonu. Myšlenku, jak chování systému zlepšit navrhl prof. Novák a prezentoval ve svých dřívějších pracích [Novák 2000, Novák 2010] jako automatickou změnu kontextů LFLC regulátoru. Jakmile se regulační odchylka zmenší a po stanovenou dobu nevybočuje z pásma 50 % původní hodnoty vstupního kontextu, je vstupní i výstupní kontext zmenšen na polovinu, takže strategie řízení je opět použita v celém rozsahu. Tato myšlenka byla v případě řízení modelu vrtulníku upravena. Především byla změna kontextu realizována ve dvou stupních – při poklesu pod 50 % původní hodnoty a při poklesu pod 25 % původní hodnoty kontextu, dále pak vzhledem k velmi rychlým dějům, nebylo požadováno, aby odchylka setrvala ve stanoveném pásmu po žádanou dobu, ale zásah byl proveden okamžitě.

Protože největší vliv na celý LFLC regulátor má část reagující na regulační odchylku, zaměřuje se na ni i následující ukázka. Upravený LFLC regulátor ukazuje obrázek 4.



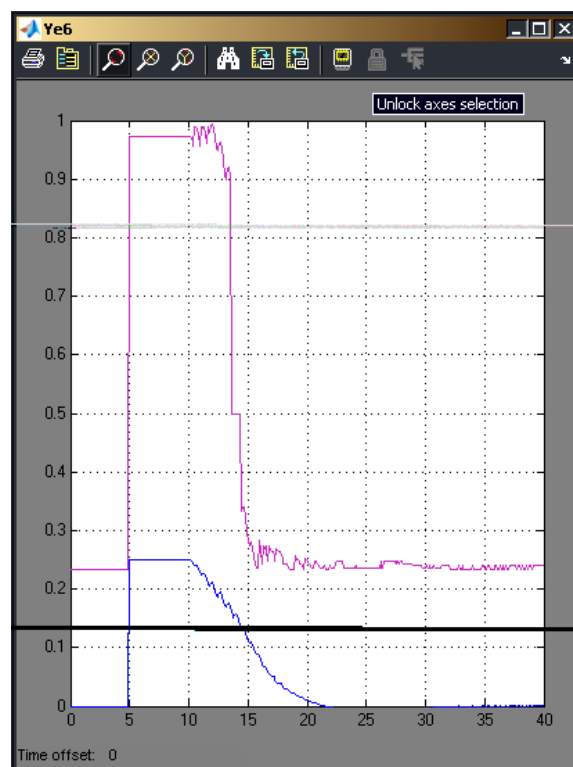
Obrázek 4 – Výsledný LFLC regulátor pro řízení úhlu naklonění vrtulníku s automatickou změnou kontextu

Automatická změna kontextu byla popsána pomocí dalšího LFLC regulátoru, jeho chování dokumentuje obrázek 5. Jeho výstup nabývá hodnot od 0,25 přes 0,5 po 1,0, čemuž odpovídá jeho použití ve schématu na obrázku 4.



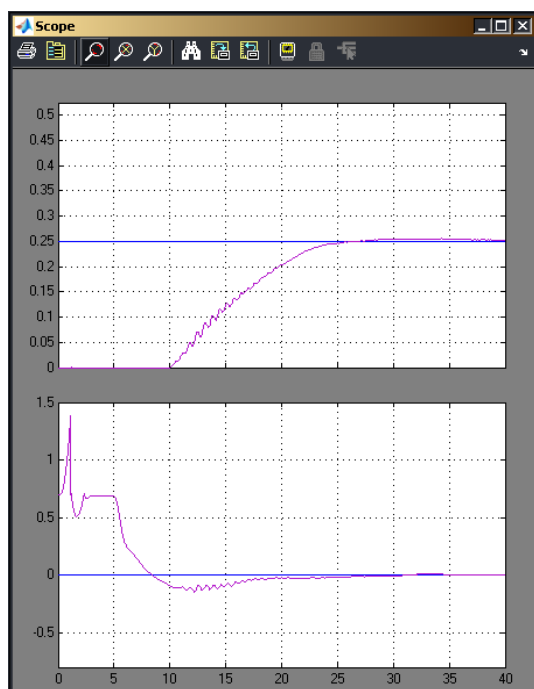
Obrázek 5 – Blok LFLC pro automatickou změnu kontextu

Jak systém pracuje, vidíme na ukázce průběhu vstupní a výstupní veličiny bloku při polohovém řízení náklonu vrtulníku, viz obrázek 6.

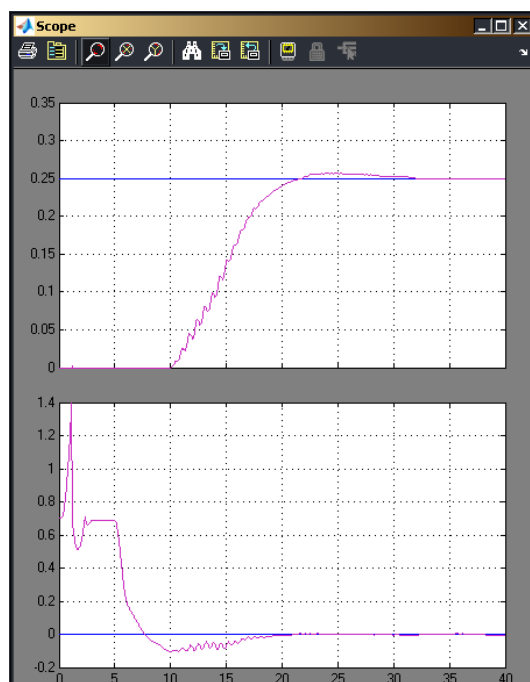


Obrázek 6 – Průběh vstupní a výstupní veličiny bloku pro automatickou změnu kontextu

Náklon vrtulníku se velmi rychle přiblíží požadované hodnotě a setrvává v jejím okolí. Proto nám automatická změna kontextu dává možnost využít opět celou strategii řízení ve zmenšeném rozsahu hodnot regulační odchylky. Dosažené výsledky, resp. porovnání původní strategie a nového přístupu ukazuje obrázek 7.



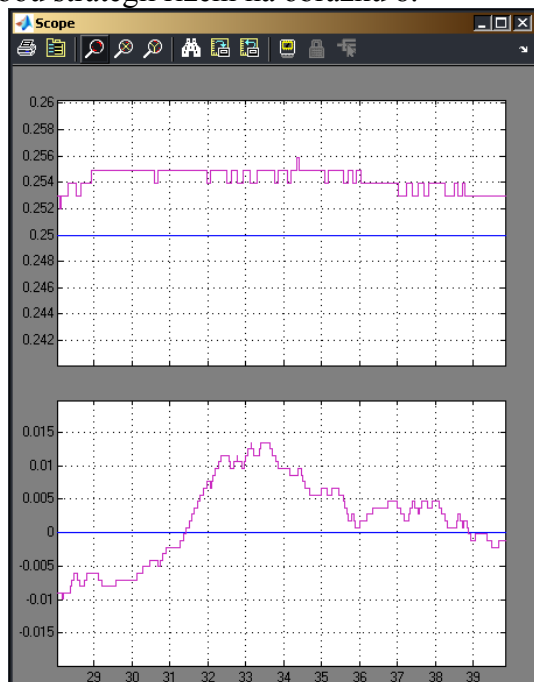
a) průběh úhlu náklonu a orientace vrtulníku při klasickém LFLC řízení



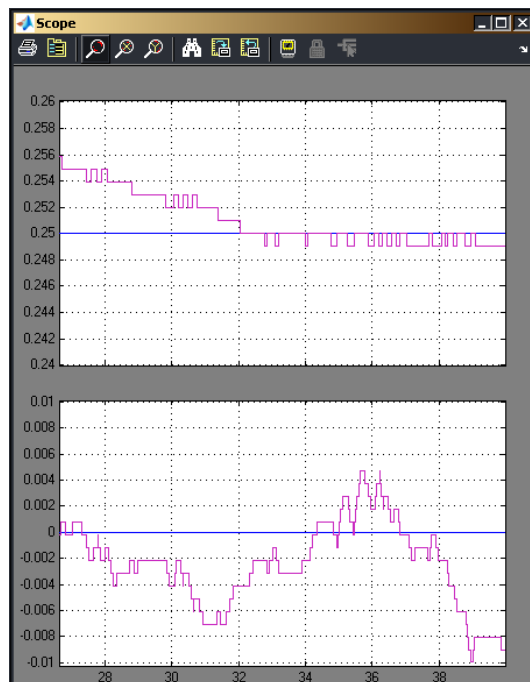
b) průběh úhlu náklonu a orientace vrtulníku při LFLC řízení s automatickou změnou kontextu

Obrázek 7 – Porovnání průběhu řízení původního a upraveného regulátoru

Z obrázku 7 nemusí být zlepšení dostatečně zřetelné, proto si ukažme detaily průběhů obou strategií řízení na obrázku 8.



a) průběh úhlu náklonu a orientace vrtulníku při klasickém LFLC řízení



b) průběh úhlu náklonu a orientace vrtulníku při LFLC řízení s automatickou změnou kontextu

Obrázek 8 – Detaily průběhu řízení původního a upraveného regulátoru

4 Závěr

Prezentované příklady LFLC řízení byly získány na Ostravské univerzitě v Ostravě v rámci řešení podpory European Regional Development Fund, při řešení projektu IT4Innovations Centre of Excellence (CZ.1.05/1.1.00/02.0070) a v rámci řešení projektu Studentské grantové soutěže (SGS15/PřF/2015) za účasti studentů, podporovaný Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR. Z dosažených výsledků je zřejmé, že moderní matematické metody, jako je fuzzy řízení, mají zajímavé možnosti využití i pro řízení rychlých technologických procesů s periodou vzorkování 0,01 [s] nebo kratší. Systém Linguistic Fuzzy-Logic Control, vyvinutý na Ostravské univerzitě, je velmi užitečný nástroj pro popis strategie řízení a systém automatické změny kontextů mu dává další možnosti zlepšení kvality a přesnosti řízení. Tato technologie a reálné modely jsou využívány jako podklad pro problémově orientovanou výuku na Katedře informatiky a počítačů, Přírodovědecké fakulty pro studenty magisterských studijních programů a jejich společně i individuální projekty. Studenti se přitom naučí, jak definovat strategii řízení a ověřit si její chování na reálném modelu vrtulníku. Po dokončení svých projektů jsou studenti schopni definovat strategie řízení založené na LFLC pro jakýkoli podobný řízený systém. Jsou také schopni porovnat získané výsledky s různými strategiemi fuzzy řízení, např. [Takosoglu akol. 2012], [Godoy akol. 2013] nebo [Velagic & Osmic 2014].

5 Použitá literatura

- CEDRO, L. & JANECKI, D. 2011. Determining of Signal Derivatives in Identification Problems – FIR Differential Filters. *Acta Montanistica Slovaca*. Volume 16, Issue 1, 2011. pp. 47 – 54. ISSN 1335-1788.
- FARANA, R., WALEK, B, JANOŠEK, M. & ŽÁČEK, J. 2014. Využití Linguistic Fuzzy-Logic Control pro řízení technologických systémů. In *XXXVII. Seminar ASR '2014 "Instruments and Control"*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 25. 4. 2014, s. 20 – 27. ISBN 978-80-248-3398-9.
- GODOY, W. F., DA SILVA, I. N., GOEDEL, A. & PALÁCIOS, R.H.C. 2013. Fuzzy logic applied at industrial roasters in the temperature control. In *11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, IMS 2013*, Sao Paulo, Brazil, 2013, pp. 450-455.
- HUMUSOFT 2014. *CE 150 Helicopter Model* [on-line], 2014 [cit 2014-04-18]. Available on web: <http://www.humusoft.cz/produkty/models/ce150/>
- MAMDANI, E. & ASSILIAN, S. 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic control. *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, 1975, pp. 1–13.
- NOVÁK, V. 1995. Linguistically Oriented Fuzzy Logic Control and Its Design. *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 12, 1995, pp. 263-277.
- NOVÁK, V. 2000. *Základy fuzzy modelování*. 1. vyd. BEN-Technická literatura, Praha, 2000, 175 pp. ISBN 80-7300-009-1.
- NOVÁK, V. 2010. Genuine Linguistic Fuzzy Logic Control: Powerful and Successful Control Method. *Computational Intelligence for Knowledge-Based Systems Design*, Hüllermeier, E. and Kruse, R. and Hoffmann, F. (eds.), Springer, Berlin, 2010, pp. 634 - 644.
- NOVÁK, V. & PERFILIEVA, I. 1999. Evaluating Linguistic Expressions and Functional Fuzzy Theories in Fuzzy Logic. *Computing with Words in Information/Intelligent Systems 1*, L. A. Zadeh a J. Kacprzyk (eds.), Springer-Verlag, Heidelberg, 1999, pp. 383-406.
- TAKAGI, T. & SUGENO, M. 1985. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybern*, Vol. 15, 1985, pp. 116–132.

- TAKOSOGLU, J. E., LASKI, P. A. & BLASIAK, S. 2012. A fuzzy logic controller for the positioning control of an electro-pneumatic servo-drive. *Journal of Systems and Control Engineering*, volume 226, Issue 10, November 2012, pp. 1335-1343.
- VELAGIC, J. & OSMIC, N. 2014. Fuzzy-Genetic Identification and Control Structures for Nonlinear Helicopter Model. *Intelligent Automation & Soft Computing*, Volume 19, Issue 1, pp. 51-68, ISSN 1079-8587. DOI: 10.1080/10798587.2013.771454
- ZADEH, L. A. 1965. Fuzzy sets. *Information & Control*, vol. 8, 1965, pp. 338-353.
- ZADEH, L. A. & KACPRZYK, J. 1992. *Fuzzy Logic for the Management of Uncertainty*. J. Wiley & Sons, New York 1992.

Metodika ukládání a správy velkého množství dat v databázích běžících na SQL Server Express

FOJTÍK, David¹ & PODEŠVA, Petr²

¹ Ing., Ph.D., ✉ Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 2172/15,
708 00 Ostrava 🖨 david.fojtik@vsb.cz, 🌐 <http://www.352.vsb.cz/>

² Ing., 🖨 petr.podesva@vsb.cz

Abstrakt: Článek popisuje prakticky ověřené postupy, které umožňují v databázovém systému MS SQL Server Express automaticky vytvářet a udržovat primární databázi s novými daty a starší data, která slouží většinou jako archiv, jsou dynamicky přesouvána do menších sekundárních databází. Metodika tak umožňuje rychlejší práci s čerstvými a s větší pravděpodobností užívanými daty.

Klíčová slova: SQL databáze, SQL Server Express

1 Úvod

Moderní průmyslová výroba je neoddelitelně spjata s ukládáním široké škály dat související s každým jednotlivě vyrobeným kusem. Tyto údaje se často archivují na SQL serverech nejméně po dobu záruky a mnohdy i déle. Z obrovského množství uložených dat se však často sledují pouze ta nejnovější. Starší data jsou používána jen velmi zřídka, přičemž zabírají nejvíce úložného prostoru a výrazně zpomalují práci s čerstvými daty. Kromě toho, pro velké databáze je zapotřebí mít drahé licence serveru.

S rostoucími požadavky na kvalitu výroby, se zvyšuje počet dílčích kontrolních stanovišť, za účelem průběžného monitorování výrobku během celého výrobního procesu. Získává se tak značné množství dat, jejichž analýzou lze vysledovat příčiny, ovlivňují kvalitu a spolehlivost výroby. Potlačování těchto příčin pak vede k vyšší konkurenceschopnosti výrobků a zároveň k nižším celkovým nákladům.

Tento postup mimo jiné klade vysoké požadavky na úložiště získaných dat. Značná množství dat musí být spolehlivě ukládána a dlouhodobě archivována. Často se data z různých kontrolních bodů ukládají odlišným způsobem. Mnohdy jsou to unikátní souborové formáty, které vyžadují specifický software pro jejich zpracování. Takováto řešení však výrazně komplikují hlubší analýzy. Taktéž vyhledávání konkrétních údajů často vyžaduje značné úsilí.

Daleko lepší variantou je ukládání dat do databází SQL serveru. Stabilita a bezpečnost je dána vlastnostmi zvoleného SQL serveru, přístup k datům zprostředkovává jednotný jazyk SQL, přičemž data mohou být libovolně rozprostřena do různých serverů. Od této varianty často odrazují očekávané vysoké náklady na licence SQL serveru. Je to dáno potřebou spravovat velké množství dat. Jisté východisko nabízí SQL serverová řešení z dílen Open Source, kde jsou licence „zdarma“. Avšak, v průmyslové výrobě obvykle nejsou k těmto řešením naklonění, nehledě na to, že často již používají komerční SQL serverová řešení, a pro údržbu open source řešení nemají zaškolený personál. Dodatečné náklady pak mohou někdy převýšit náklady na pořízení vyšších licencí.

Článek nabízí jiné řešení. Použít volně šiřitelný SQL server z dílny renomovaných výrobců a obejít primární omezení, tedy malou kapacitu databáze. Konkrétně popisuje prakticky ověřený postup nasazení MS SQL serveru Express v provozu Třineckých železáren

a.s. Válcoven trub Vítkovice, kde jsou spravovány data v rozsahu 40 GB. Zde jsou údaje z posledních 30 dnů držena v primární databázi a starší údaje jsou přenášeny do databází, které se dynamicky vytvářejí odděleně pro každý měsíc výroby. Díky této metodě, jsou všechny databáze menší než 2 GB, zatímco všechny údaje jsou snadno přístupné z jednoho SQL Server Express.

3 Výhody a nevýhody SQL serveru expres

MS SQL server express je bezplatnou alternativou plné verze MS SQL serveru. Přestože je zdarma, zachovává si plnou kompatibilitu včetně podpory jazyka Transact-SQL. V podstatě jde o plnohodnotný SQL server s několika omezeními [viz.], mezi významná omezení patří:

- Maximální výpočetní kapacita využitelná jednou instancí SQL Serveru
- Maximum paměti přiřaditelné jedné instanci SQL Serveru
- Maximální velikost relační databáze

Má-li SQL server sloužit primární jako úložiště naměřených dat, kdy je jediným pravidelným uživatelem technolog, který převážně pracuje s nejnovějšími záznamy, pak první dvě zmíněná omezení nejsou zásadní.

Zásadní je však omezení na velikost databáze. Nezřídka se stává, že za jedním měsícem se vygeneruje i několik GB dat. Pak samozřejmě není možné v jedné databázi si uchovávat víceletou produkci. Navíc, čím větší databáze je, tím jsou vyšší nároky na paměť a výpočetní výkon SQL severu. Pak i jednoduché dotazy vysoce zatíží SQL server, čímž se projeví první dvě zmíněná omezení.

Na druhou stranu MS SQL server Express umožňuje obhospodařovat i několik desítek databází současně (Autor otestoval 50 databází současně). Tudíž problém se dá obejít tak, že se data rozdělí do několika oddělených databází, přičemž každá z nich může obsahovat výrazně menší množství dat.

Navíc data nebývají využívána stejnoměrně. Intenzivně se využívají pouze nejčerstvější data. V podstatě je jimi kontrolován aktuální proces výroby. Čím jsou však data starší, tím četnost jejich používání klesá. Od určitého okamžiku bývají využívána pouze sporadicky, například při řešení reklamací, nebo když jsou prováděny složitější analýzy za delší časová období. Data starší než je doba záruky, se obvykle nepoužívají vůbec.

4 Princip řešení

Jádrem řešení je rozdělení dat do několika databází. Každá databáze uchovává data pouze za určité časové období. Délka období je omezena podmínkou, že žádná z databází nesmí přesáhnout maximální přípustnou velikost. Podle množství produkovaných dat tak lze například zvolit týdenní, měsíční, nebo čtvrtletní produkci apod. Jedna z databází tvoří primární úložiště. Zde jsou ukládána nejčerstvější data a také přes tuto databázi jsou distribuovány všechny dotazy. Současně jako jediná spravuje data různě velkého období. Například může být stanoveno, že trvale si má udržovat produkci za posledních 24 hodin, ale díky nepřerušené výrobě může dočasně spravovat produkci za výrazně delší období (například pracovní týden). Vše závisí na množství dat a také na četnosti odstavek, či přestávek ve výrobě.

Primární databáze plní následující funkce:

- Uchovává nejčerstvější data
- Na základě stanoveného období zakládá podřízené databáze.
- Převádí data z primární databáze do podřízených databází
- Udržuje přehled o všech databázích
- Přijímá všechny dotazy a distribuuje je podřízeným databázím.
- Zajišťuje komplexní údržbu, archivaci starých databází atd.

K realizaci uvedených funkcí je použit jazyk Transact SQL s jehož pomocí se vytvoří uložené procedury komunikačního rozhraní minimálně pro tři základní operace:

1. Uložení nového záznamu
2. Vyhledání záznamu
3. Roztřídění dat do podřízených databází

První operace je nejméně náročná. V podstatě slouží k uložení získaných dat. Tato operace může být podle povahy dat realizována sadou samostatných uložených procedur.

Vyhledání záznamu je dvojstupňová operace. Voláním uložené procedury se předají podmínky pro nalezení požadovaných záznamů. Procedura nejprve zkontroluje kritéria, a rozhodne, zda hledané záznamy lze najít pouze v primární databázi, nebo je nutné pracovat s podřízenými databázemi. V prvním případě data jednoduše vrátí z primární databáze. V druhém případě nejprve zjistí, ve kterých databázích jsou data uložena, a následně je tam vyhledá. Pokud není možné zjistit, ve kterých databázích se nacházejí, pak prohledává všechny databáze od nejnovějších po nejstarší.

Úkolem třetí operace je záznamy starší než je předvolený interval přenést do podřízených databází. Zároveň si musí poznačit souhrnné informace o přenesených datech pro případné vyhledávání záznamů. Pokud příslušná databáze neexistuje, pak ji nejprve musí založit. Případně již nepotřebné databáze (například po záruční lhůtě), zálohovat a odpojit z SQL serveru. Tato operace je klíčovou a je předmětem níže uvedeného popisu.

5 Popis řešení

Výše zmíněné operace lze plně realizovat jazykem Transact-SQL. Skripty pro založení podřízených databází je dokonce možné vygenerovat v prostředí MS SQL Management studio ze vzorové verze databáze. Je však nutné provést úpravy, které zajistí oddělené vykonání některých příkazů. Jazyk Transact-SQL totiž nedovoluje, aby v jednom skriptu (dávce příkazů) byly současně příkazy, které nejprve objekt založí a pak jej volají. Například, nelze v jednom skriptu založit databázi a následně v ní vytvářet tabulky. Také nejde založit tabulku a následně ji plnit daty apod. Tyto operace musí být na SQL server odeslány v oddělených dávkách. U skriptů volaných v prostředí MS SQL management studia, toto oddělení zajistí direktiva GO. Tato direktiva však není příkazem jazyka Transact-SQL a rozdělení na dvě samostatné sekvence se musí provést jinak.

Jazykem Transact-SQL lze příkaz či sekvenci zaslat odděleně příkazem EXECUTE (EXEC). Sekvence, jež se má odděleně vykonat se příkazu předává formou textového argumentu. Například, níže je uvedený skript uložené procedury, která založí novou databázi, jejíž název je předán textovým argumentem. Pak v databázi založí tabulky (tPoints tTubes) a primární indexy. Následně přidá pohled Points, uživatele TubesReader a přidělí mu roli datareader. Nakonec si do pomocné tabulky tSlaveDatabase uloží informaci o nové podřízené databázi. Klíčové operace jsou prováděny odděleně prostřednictvím příkazu EXECUTE.

Nyní k proceduře, která přenese starší data do podřízených databází. Následující procedura převede data starší nežli je požadovaný počet dnů (předává se argumentem procedury) z primární databáze do podřízených databází. Každá z nich obsahuje data za jeden kalendářní měsíc. Tomu také odpovídají názvy databází. Například pro leden 2015 bude název TB201501.

Vlastní převod začíná vytvořením kurzoru ze seskupení přenášených dat podle měsíce vzniku. Současně se každé skupině přidá název cílové podřízené databáze. Pro každé seskupení se pak zjišťuje, zda podřízená databáze existuje či nikoliv. V ukázce se dotazuje systémové tabulky sys.databases, která obsahuje seznam všech připojených databází. Není-li databáze nalezena, pak se pomocí výše uvedené procedury založí. Pak se již data nakopírují do podřízené databáze a odstraní z primární databáze. Nakonec se primární i podřízené databáze zálohují, čímž se vyčistí logy.

Uvedená metoda vyžaduje pravidelně provádět operaci roztřídění dat do podřízených databází. Vzhledem k náročnosti této operace a sníženého výkonu MS SQL Serveru Express, je důležité zajisti dostatečný časový prostor. V ideálním případě se operace provádí během pravidelných odstavek.

8 Závěr

Metoda je více než dva roky úspěšně využívána v provozu Válcoven trub v Třineckých Železárnách a. s. v Ostravě Vítkovicích. Zde se u každé vyrobené trubky po celé její délce kontrolují průměry a ovalita. Měření probíhá bezkontaktně laserovým skenováním. Do databáze se ukládají všechny naskenované body. Z těchto bodů se pak rekonstruuje povrch trubky, přičemž se řez po řezu vyhodnocují průměry a ovalita. Za jeden měsíc výroby se takto uloží přibližně 1,7 GB nových dat. Za dva roky je tomu přes 40 GB. Přičemž vše je uloženo na SQL Serveru Express 2005 ve 24 databázích. Primární databáze udržuje záznamy maximálně za poslední 30 dnů výroby. Starší záznamy se automaticky přenášejí do podřízených databází. Je-li obdržen dotaz na záznam, který je uložen v podřízené databázi, je automaticky vyhledán. Databáze s daty staršími než dva roky se po zálohování automaticky odstraní. Ze zálohy je samozřejmě možné data kdykoliv obnovit. To však aktuálně musí učinit obsluha ručně.

9 Použitá literatura

MICROSOFT. (2014, June 5) Features Supported by the Editions of SQL Server 2014 [Online]. Dostupné z: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/cc645993.aspx>

TSQL. (2014, June 12) TSQL Tutorial. [Online]. Dostupné z: <http://www.tsql.info>

MICROSOFT. (2014, July 14) Books Online for SQL Server 2014. [Online]. Available: <https://technet.microsoft.com/en-us/library/ms130214.aspx>

PODEŠVA, P., FOJTÍK, D. Calibration of 2D scanner with nonlinearities In Proceedings of 15th International Carpathian Control Conference ICC'2015 May 28-30, 2014, Velké Karlovice, Česká republika, pp. 446-449. ISBN 978-1-4799-3528-4.

FARANA, R. & TŮMA, J. "Database Support for Operational Measurement Management," in Proceedings of the 5th International Scientific - Technical Conference Process Control 2002, Kouty nad Desnou, 2002, pp. 1-5, ISBN 80-7194-452-1

Návrh regulačního obvodu pro řízení teploty přehřáté páry

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. Ing., Ph.D., 🖥️ renata.wagnerova@vsb.cz

Abstrakt: *Nejrozšířenější způsob regulace teploty páry je dnes regulace teploty páry vstříkem napájecí vody. Má nejnižší realizační náklady, protože pára se vodou ochlazuje ve směšovacím výměníku, který je součástí spojovacího parního potrubí. Článek se zabývá návrhem a realizací regulačního obvodu pro řízení této technologie. Navržený regulační obvod odpovídá rozvětvenému regulačnímu obvodu s pomocnou regulovanou veličinou a kompenzací změn výkonových hladin a nelinearity ventilu. Celý regulační obvod byl simulačně ověřen v programu MATLAB Simulink, následně byly řídicí algoritmy implementovány do PLC systému a řízení otestováno v reálném provozu v teplárně. Pro možnost nastavení parametrů regulátorů a bodů kompenzační křivky byla vytvořena vizualizace.*

Klíčová slova: rozvětvený regulační obvod, nelinearita, přehřívák, MATLAB, PLC

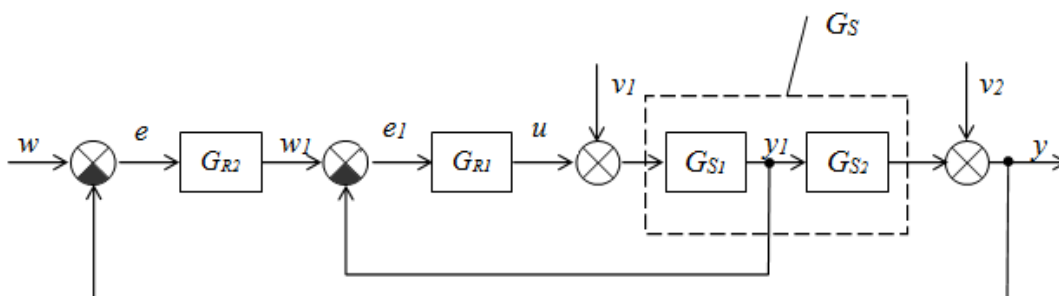
1 Úvod

Jednoduchý jednorozměrový regulační obvod má v obvodu jen jednu regulovanou a jednu akční veličinu, které jsou zapojeny ve zpětnovazební smyčce. Tyto jednoduché základní regulační obvody mohou splnit většinu běžných regulačních úkolů. Při vyšších požadavcích na přesnost a dynamiku regulace hlavně u složitějších regulovaných soustav jsou jejich možnosti omezené. S rostoucí složitostí (vyšším řádem setrvačnosti) regulované soustavy se zvyšuje i sklon k nestabilitě a zhoršuje se také kvalita regulačního pochodu. Použitím rozvětvených regulačních obvodů, tj. zavedením dalších proměnných do regulačního obvodu a tedy uspořádáním dalších smyček regulačního obvodu, se získají výhodnější dynamické i statické vlastnosti celého systému. Je možné také jednotlivé rozvětvené regulační obvody kombinovat a ještě více zlepšit regulaci, tj. chování výstupní veličiny. Jedná se pak o tzv. sdružené rozvětvené regulační obvody.

2 Regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou

Jedním z nejrozšířenějších rozvětvených regulačních obvodů je obvod s pomocnou regulovanou veličinou, který se nazývá také kaskádový (kaskádní) regulační obvod, a jeho schéma je uvedeno na obr. 1. Tento regulační obvod se používá v případě, jde-li regulovanou soustavu popsanou přenosem G_S rozdělit na dvě části, kde první část popsaná přenosem G_{S1} je rychlejší než druhá s přenosem G_{S2} , a pokud regulovaná soustava umožňuje měřit pomocnou regulovanou veličinu y_I za její první částí. Druhá část řízené soustavy může být silně nelineární, ale neměla by obsahovat dopravní zpoždění. Pokud jsou tyto podmínky splněny, pak lze použitím rozvětveného regulačního obvodu s pomocnou regulovanou veličinou zlepšit kvalitu regulačního pochodu oproti běžnému zapojení. Vliv poruchové veličiny v_I je potlačen tím, že měříme na vhodném místě pomocnou regulovanou veličinu y_I a zavádíme ji do pomocného regulátoru s přenosem G_{RI} . Nejčastější nasazení tohoto typu regulačního obvodu

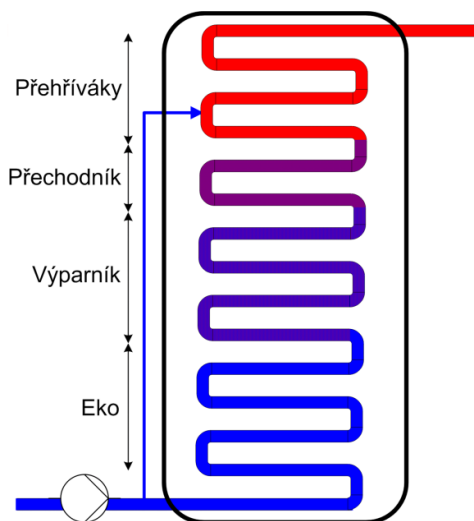
je při regulaci elektrických pohonů a výkonových servomechanismů i při regulaci kotlů, destilačních komor, jaderných reaktorů a jiných tepelných zařízení.



Obr. 1 Regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou

3 Popis řízené technologie

Před samotným popisem návrhu rozvětveného regulačního obvodu bude nejlépe uvést stručný popis řízené technologie, což je výroba přehřáté páry v teplárnách či elektrárnách. V současné době nejvíce rozšířený průtočný parní kotel si můžeme v zjednodušené formě představit jako trubku, ve které se voda přemění na páru, a té se dodá další energie v přehříváčích, jak popisuje obr. 2. Přehřívák páry je vlastně průtočný výměník tepla, kde jedním médiem je kotlem vyráběná (ohřívaná) pára a druhým médiem (ohřívacím, topným) jsou obvykle spaliny.

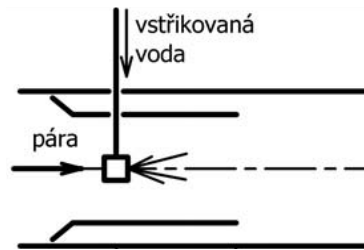


Obr. 2 Schéma průtočného kotle [Menkina 2011]

Kotel je konstruován a provozován tak, že ke změně z vody na páru dojde už před přehříváky a dále proudí jen pára. Části před a za klíčovým prvkem kotle (výparník) se využívá nejprve ekonomizéru, který je obvykle umístěn v zadním tahu. Oběžné trubky výparníku, se obvykle zařazují podél všech stěn topeniště kotle, kde mají spaliny nejvyšší teplotu. Pak jsou zařazeny přehříváky, které mají za úkol dodat páře dostatek energie, která je posléze využitelná na turbíně. Vstřikovými ventily zařazenými do oběhu v části přehříváků je zajištěno řízení výstupní teploty přehřáté vysokotlaké páry. Pára turbíně předá svou energii a dojde ke ztrátě teploty i tlaku [Menkina 2011].

Nejrozšířenější způsob regulace teploty páry je dnes regulace teploty páry vstřikem napájecí vody. Má nejnižší realizační náklady, protože pára se vodou ochlazuje ve směšovací výměníku, který je součástí spojovacího parního potrubí. Vstřikovaná voda (kondenzát) musí být přivedena tak, aby nedošlo k ohrožení pevnosti vnějšího pláště vstřiku (potrubí) od teplotních rozdílů v místě připojení a ani od tepelných prnutí způsobených

dopadem kapiček vody na stěny vnějšího pláště. Vstříkovaná voda (kondenzát) je proto rozprášena na jemné kapičky a vnější plášť tělesa vstříku musí být před dopadem kapiček chráněn tzv. košílkou.

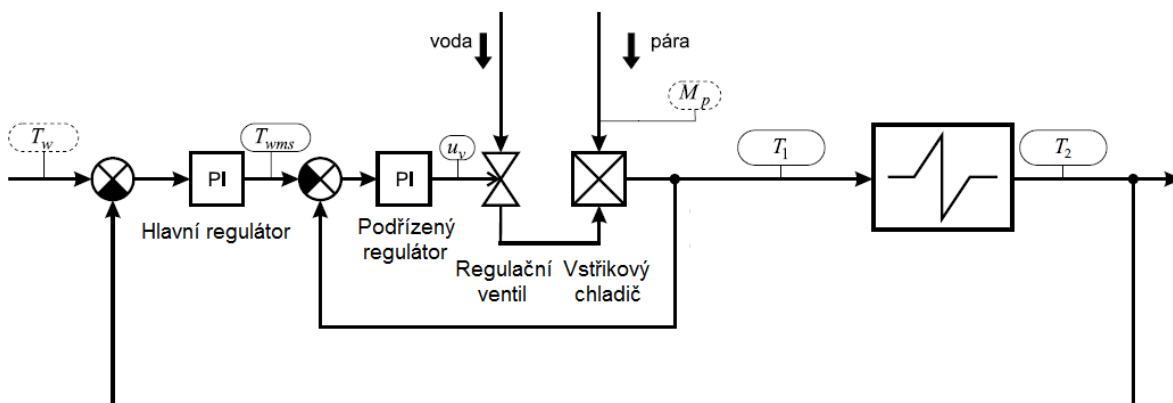


Obr. 3 Principiální schéma stříku

V případě, kdy kotol dodává páru pro parní turbínu elektrárenského bloku, tak se při vyšší teplotě páry zvyšuje tepelná účinnost parního oběhu a snižuje se opotřebení posledních lopatek turbíny erozí vodními kapičkami. Současně však se snižuje životnost ocelí použitých pro výrobu přehříváku kotle, parního potrubí a turbíny, což vede ke zvyšování nákladů na údržbu (výměnu) těchto částí nebo naopak se zvyšují investiční náklady v souvislosti s použitím dražších legovaných ocelí s vyšší pevností při tečení za vysokých teplot. Tolerovaná odchylka od předepsané teploty přehřáté páry je daná normou ČSN a např. při teplotě 445 °C činí +15 a -10 K [Kočič, Stáňa, Vilimec 2007].

4 Návrh regulačního obvodu

Jak již bylo zmíněno výše, nejrozšířenější způsob regulace teploty páry je dnes regulace vstříkem napájecí vody. Tato technologie byla taktéž instalována v teplárně, pro kterou bylo navrženo řízení. Regulační obvod teploty páry vstříkem napájecí vody byl proveden podle obr. 4.



Obr. 4 Regulační obvod teploty páry vstříkem napájecí vody

Regulovanou veličinou je teplota páry T_2 za přehřívákem. Hlavní regulátor zpracovává regulační odchylku $(T_w - T_2)$ a je obvykle typu PI, někdy se používá i PID, ačkoliv toto provedení regulační pochod zlepšuje jen málo. Protože přenos změny teploty T_2 (za přehřívákem) je dynamicky nevýhodný (přechodová charakteristika je vyššího řádu s velkou dobou přechodu), je vhodné měřit i teplotu T_1 před přehřívákem a využít ji jako pomocnou regulovanou veličinu.

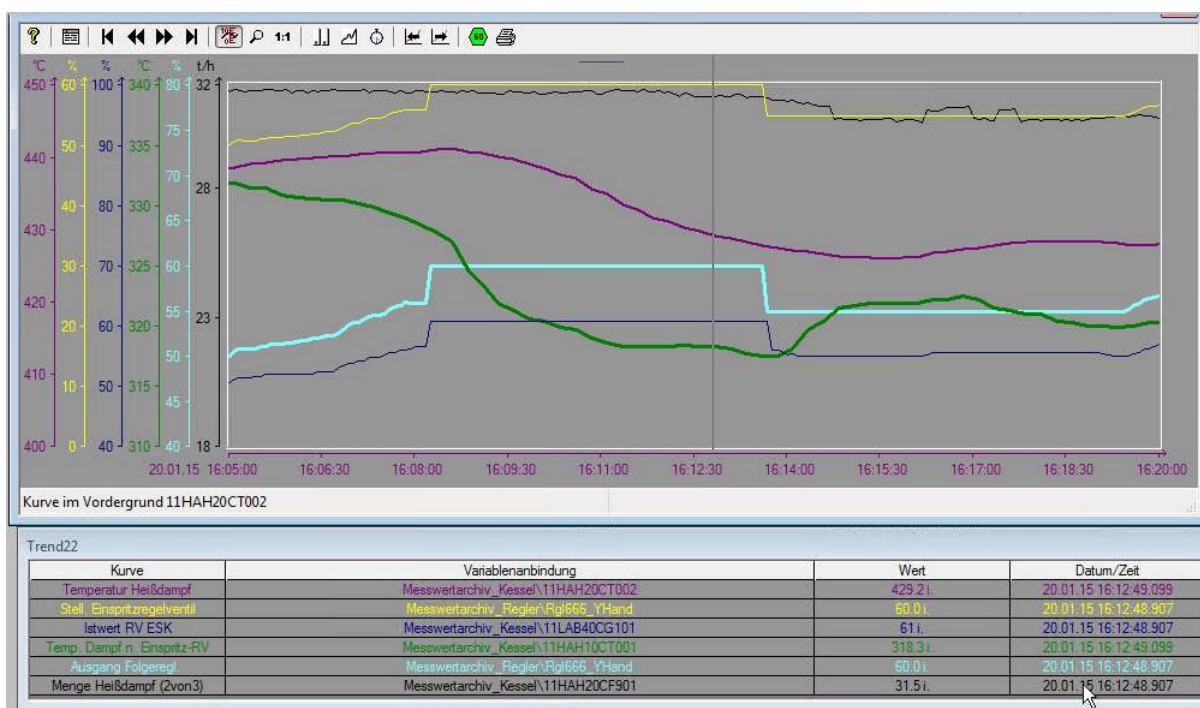
Hlavní regulátor PI vlastně zadává žádanou hodnotu teploty T_1 a dostáváme tak kaskádovou strukturu regulačního obvodu. Vzniklou regulační odchylku pak zpracovává podřízený regulátor, obvykle typu P. Takový regulační obvod (velká smyčka zadává žádanou hodnotu malé smyčce) má poměrně dobrou stabilitu a při vhodně navrženém přehříváku (regulovaná soustava) i dobrou kvalitu regulace. Někdy se i podřízený regulátor provádí jako

PI, takže vzniká kaskáda s regulátory PI/PI, tato však z hlediska regulace dává výsledky jen o málo lepší než kaskáda PI/P a stabilita obvodu může být i horší. V našem případě byla v PLC realizována kaskáda s regulátory PI/PI, jak je zobrazeno na obr. 4.

Podle [Kočiš, Stáňa, Vilimec 2007] se jako poruchová veličina často používá signál od parního výkonu kotle M_p . Tento se přivádí do druhého sumačního členu obvykle přes PD člen a přechodné zvýšení vstřiku se využívá při rychlém zvýšení výkonu kotle. Tato poruchová veličina se s výhodou používá v těch případech, kdy při regulaci výkonu kotle (např. při zvýšení) se přereguluje množství paliva, čímž se vytvoří porucha, která velmi silně ovlivňuje teplotu páry. Uvedené zapojení vliv této poruchy výrazně omezuje.

5 Identifikace řízeného procesu

Identifikace řízeného procesu proběhla za plného provozu při konstantním proudění páry $M_p=30$ t/h, což odpovídá maximálnímu výkonu kotle. Řízení bylo přepnuto do manuálního režimu a v obvyklém pracovním pásmu ventilu byla iniciována skoková změna akční veličiny (pozice ventilu) o 5%. Během experimentu byla zaznamenávána teplota T_1 před přehřívákem a teplota T_2 za přehřívákem. Změna akční veličiny proběhla směrem nahoru i dolů a celý test byl později pro zlepšení přesnosti ještě jednou opakován.



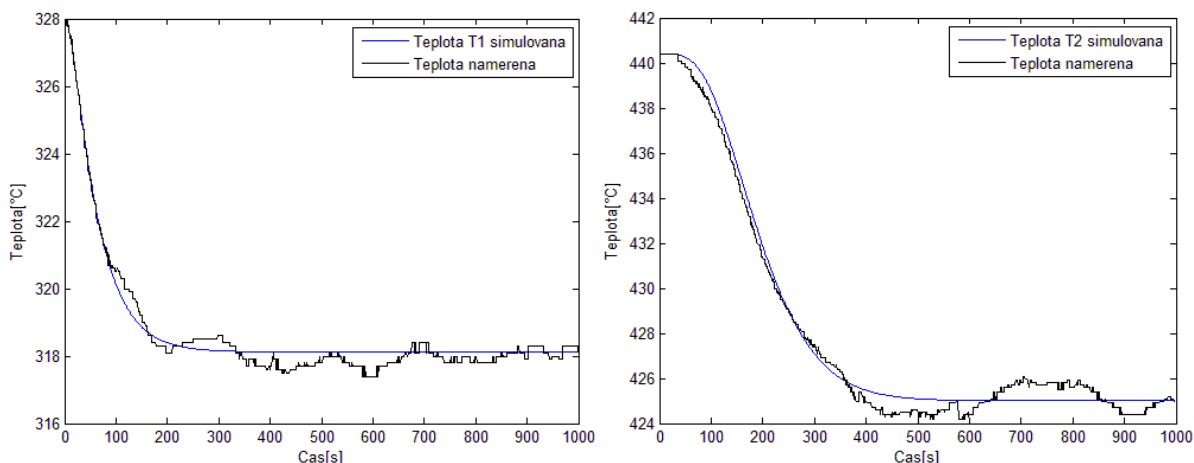
Obr. 5 Průběhy veličin zaznamenávané během procesu identifikace

Z aproximace naměřených průběhů regulovaných veličin byly identifikovány dva přenosy tohoto systému. Jelikož chování obou veličin vykazovalo aperiodický průběh, byla pro jejich identifikaci použita Strejcova metoda. Průběh teploty T_1 za vstřikem byl aproximován proporcionalní soustavou 2. řádu s rozdílnými časovými konstantami, jejíž přenos byl určen jako

$$G_{T_1}(s) = \frac{-2}{(50,57s + 1)(16,28s + 1)}$$

Průběh teploty T_2 za přehřívákem byl aproximován proporcionalní soustavou 5. řádu se stejnými časovými konstantami

$$G_{T_2}(s) = \frac{1,4}{(40,25s + 1)^5}$$



Obr. 6 Aproximace naměřených průběhů (za vstřikem-vlevo, za přehřívákem-vpravo)

6 Vpočet parametrů regulátorů

Nejprve jsme určili hodnoty parametrů podřízeného regulátoru pomocí metody optimálního modulu, která umožňuje seřadit regulátor pro systémy popsané proporcionální soustavou 2. řádu s rozdílnými časovými konstantami. Jelikož vzorkovací perioda regulátoru je v řádu milisekund a časové konstanty přenosu v řádu desítek sekund, bylo možno regulátor uvažovat za spojitý. Z tohoto vyplývá, že integrační časová konstanta T_I je rovna větší z časových konstant a tedy platí $T_{I1}=50,57$. Zesílení regulátoru k_{p1} bylo vypočteno následovně

$$k_{p1} = \frac{T_I}{2k_1T_2} = \frac{50,57}{2 \cdot (-2) \cdot 16,28} = -0,78.$$

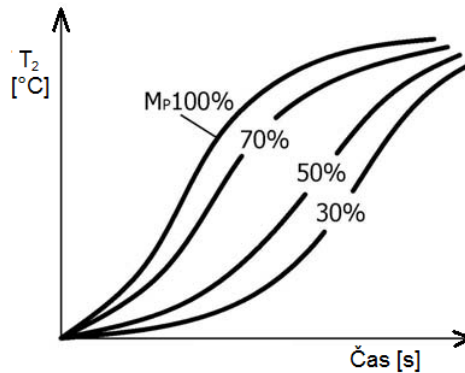
Před určením hodnot parametrů hlavního regulátoru, jsem nejprve přenos popisující průběh teploty T_2 za přehřívákem zjednodušil na tvar

$$G_{T_2}^*(s) = \frac{1,4}{105,25s + 1} e^{-110,33s}$$

Pro seřízení regulátoru byla následně použita univerzální experimentální metoda, kde pro nejrychlejší odezvu bez překmitu byla spočítána integrační časová konstanta $T_{I2}=123,14$ a zesílení regulátoru $k_{p2}=0,24$.

7 Kompenzace změn výkonových hladit a nelinearity ventilu

I u přehříváku páry (stejně jako u každé soustavy, v níž dochází k akumulaci tepla) se časové konstanty přechodových charakteristik mění v závislosti na výkonu kotle, tzn. s klesajícím výkonem se časové konstanty zvětšují. Na obr. 7 je znázorněna odezva teploty T_2 na změnu teploty páry na vstupu ΔT_1 při různých výkonech kotle.



Obr. 7 Vliv změny výkonových hladin na přechodovou charakteristiku přehříváku

S touto skutečností se musí počítat při návrhu i seřizování regulátoru. Obvykle se seřízení provádí pro střední regulovaný výkon kotle nebo se navrhuje adaptivní regulace, která přizpůsobuje seřízení regulátoru podle okamžitého výkonu kotle.

7.1 Kompenzace změn výkonových hladin

V našem případě byla realizována adaptivní regulace, kde dochází ke změně zesílení podřízeného regulátoru úměrně se změnou okamžitého výkonu kotle, což lze pospat vzorcem

$$k_p = k_{p2} \cdot (M_p / M_{pMAX})$$

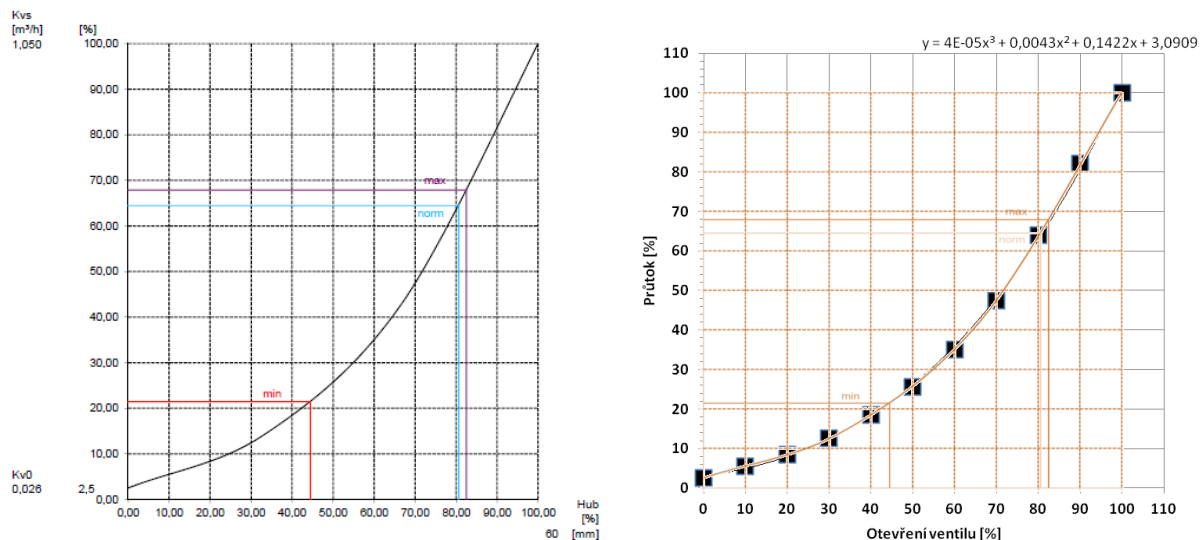
kde je

- k_p – aktuální použité zesílení podřízeného regulátoru
- k_{p2} – vypočtené zesílení při maximálním výkonu kotle
- M_{pMAX} – proudění páry při maximálním výkonu kotle (30t/h)
- M_p – aktuální (měřené) proudění páry.

Se snížením výkonové hladiny kotle tedy dojde také ke snížení hodnoty zesílení podřízeného regulátoru. Toto se děje z důvodu toho, že při nižší výkonové hladině a tudíž menším proudění páry se mění parametry řízené soustavy a je třeba tuto změnu promítnout i do zesílení podřízeného regulátoru.

7.2 Kompenzace nelinearity ventilu

Z výrobcem dodané statické charakteristiky instalovaného regulačního ventilu (obr. 8) bylo zjištěno, že je silně nelineární.



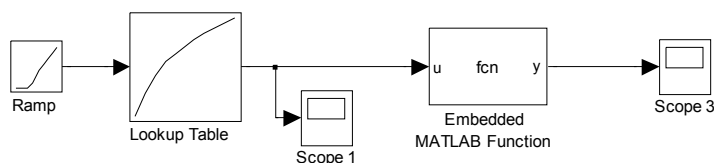
Obr. 8 Statická charakteristika ventilu dodaná výrobcem (vlevo), aproximace statické charakteristiky ventilu polynomickou funkcí (vpravo)

Jelikož v regulačním obvodu jsou použity jen lineární regulátory, bylo pro správnou funkci regulačního obvodu nutné tuto nelinearitu kompenzovat. Statickou charakteristiku jsem tedy aproximoval pomocí Excelu polynomicou funkcí třetího stupně a určil její koeficienty.

Samotná kompenzace byla nejdříve nasimulována v programu MATLAB *Simulink*. V Excelu zjištěnou aproximační funkci statické charakteristiky

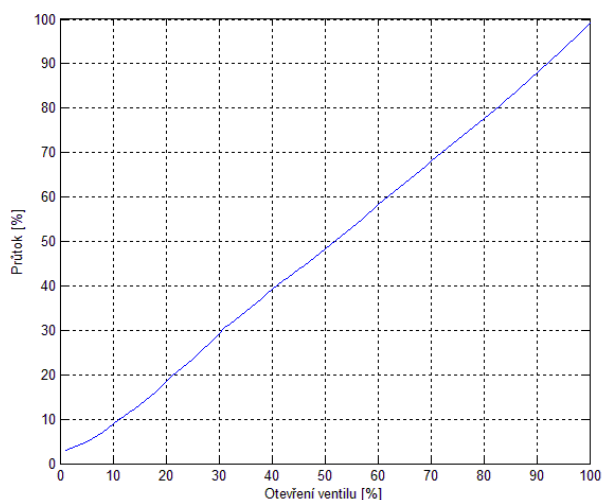
$$y = 0,00004x^3 + 0,0043x^2 + 0,1422x + 3,0909$$

jsem do simulačního programu zapsal pomocí bloku „Embedded MATLAB Function“ a kompenzace její nelinearity byla realizována k ní inverzní funkcí, respektive pomocí 8 bodové lineární interpolace této inverzní funkce. Pro lineární interpolaci byl použit blok „Lookup Table“. Na obr. 9 je patrné simulační schéma, kde jako zdroj vstupního signálu byl použit funkční blok „Ramp“, který realizoval lineární změnu vstupní veličiny od 0 do 100.



Obr. 9 Použité simulační schéma pro ověření správnosti kompenzace

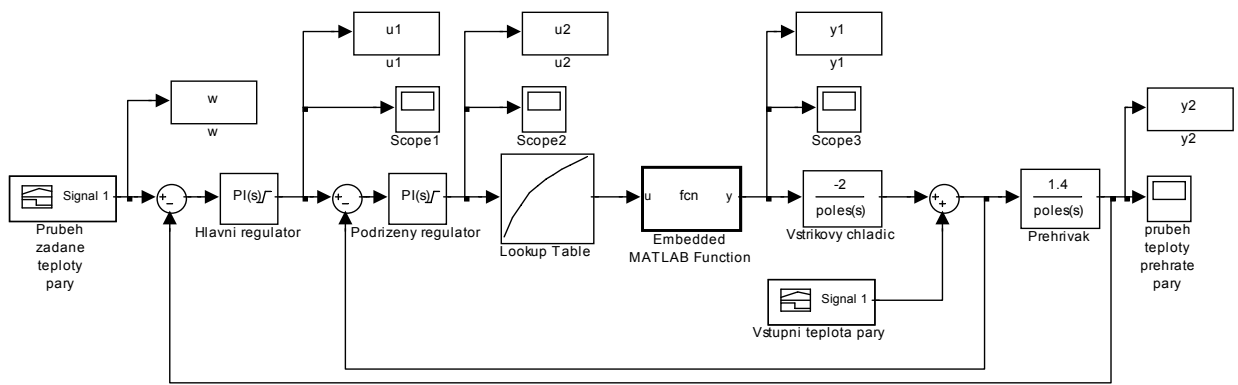
Výsledná kompenzovaná statická charakteristika je zobrazena na obr. 10.



Obr. 10 Kompenzovaná statická charakteristika

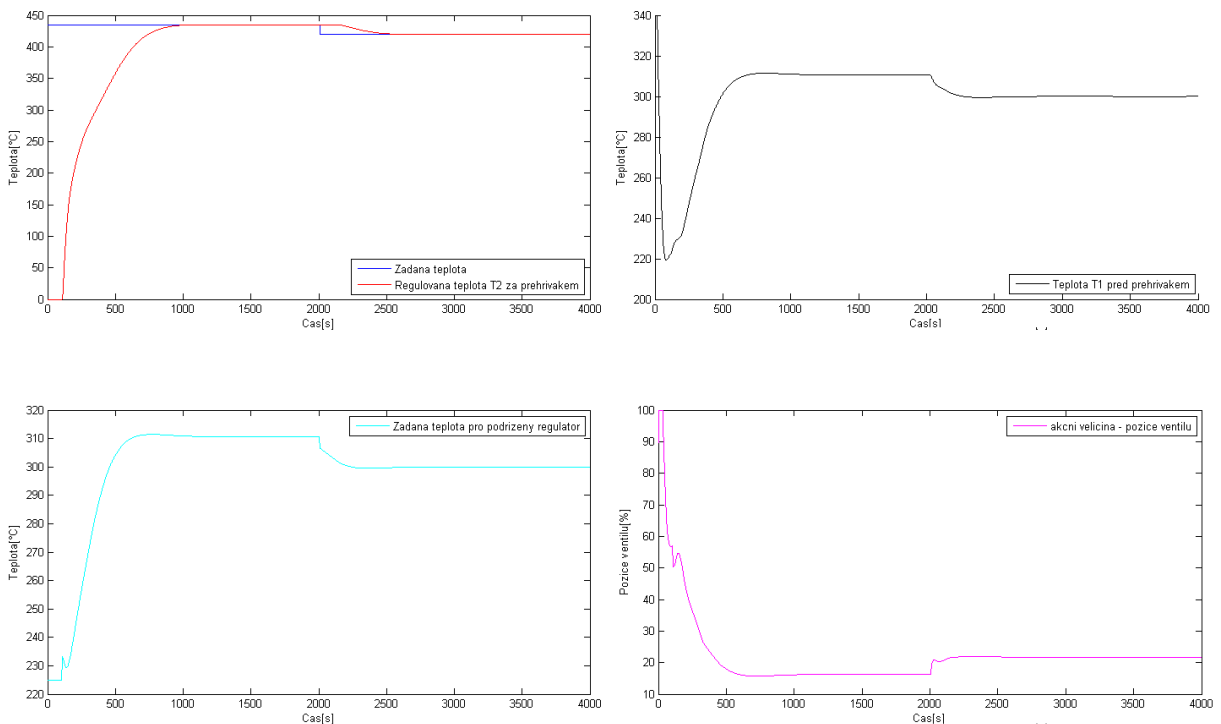
8 Simulační ověření navržených regulátorů

Správnost navrženého regulačního obvodu a vypočtených hodnot stavitelných regulátorů byl simulačně ověřen v programu MATLAB *Simulink* a schéma použitého simulovaného regulačního obvodu je na obr. 11. Akční zásahy regulátorů byly omezeny pomocí saturačních limitů, kdy pro hlavní regulátor byl nastaven horní saturační limit 400 a dolní 225. Saturační limity podřízeného regulátoru byly určeny s ohledem na rozsah nastavovacího signálu pro akční člen (ventil), tedy horní saturační limit 100 a dolní 0. Průběh vstupní teploty páry byl namodelován pomocí bloku „Signal Builder“.



Obr. 11 Simulační schéma (MATLAB *Simulink*)

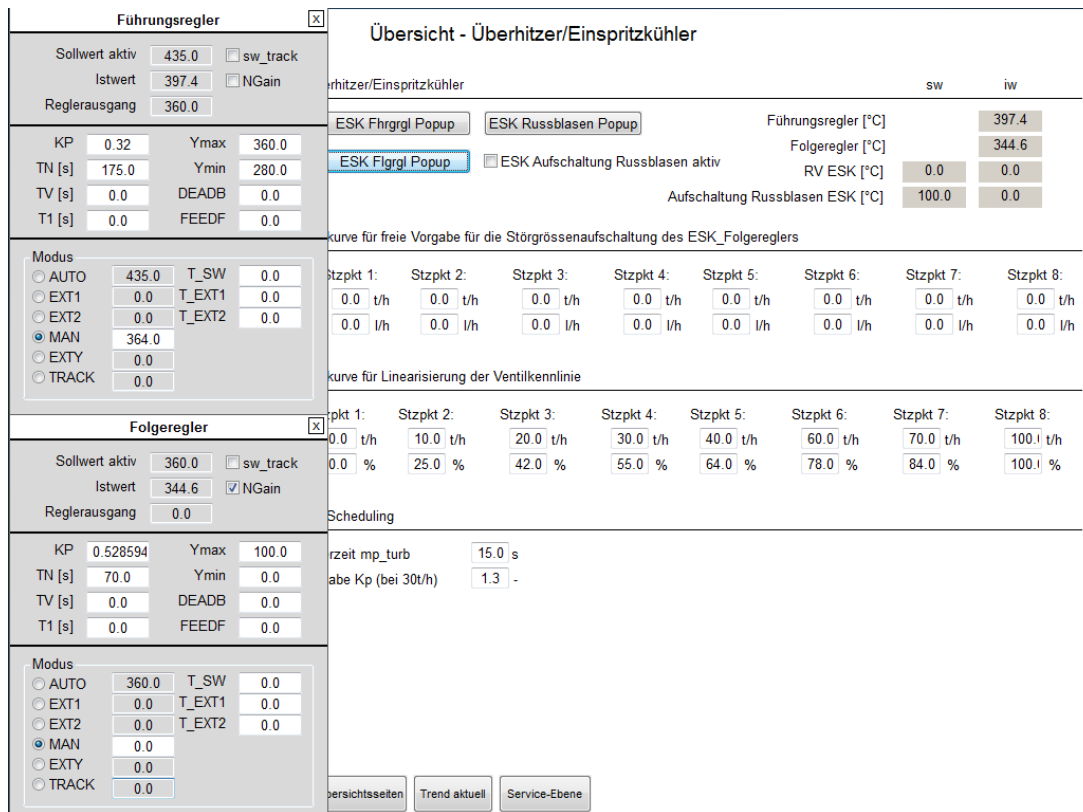
Průběhy žádané veličiny i průběhy akčních a regulovaných veličin zaznamenaných při simulaci jsou zobrazeny na obr. 12 a potvrzují správnost navržených regulátorů pro daný identifikovaný proces.



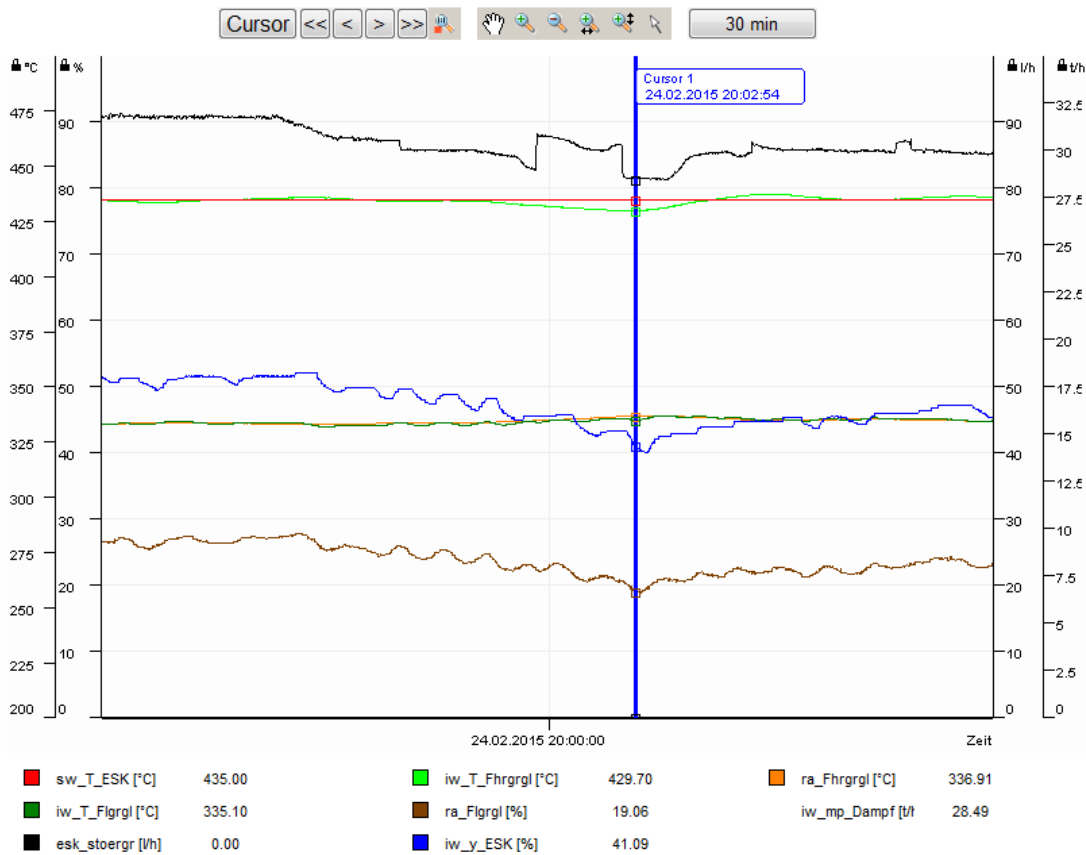
Obr. 12 Průběhy simulovaných veličin

9 Ověření na reálném procesu

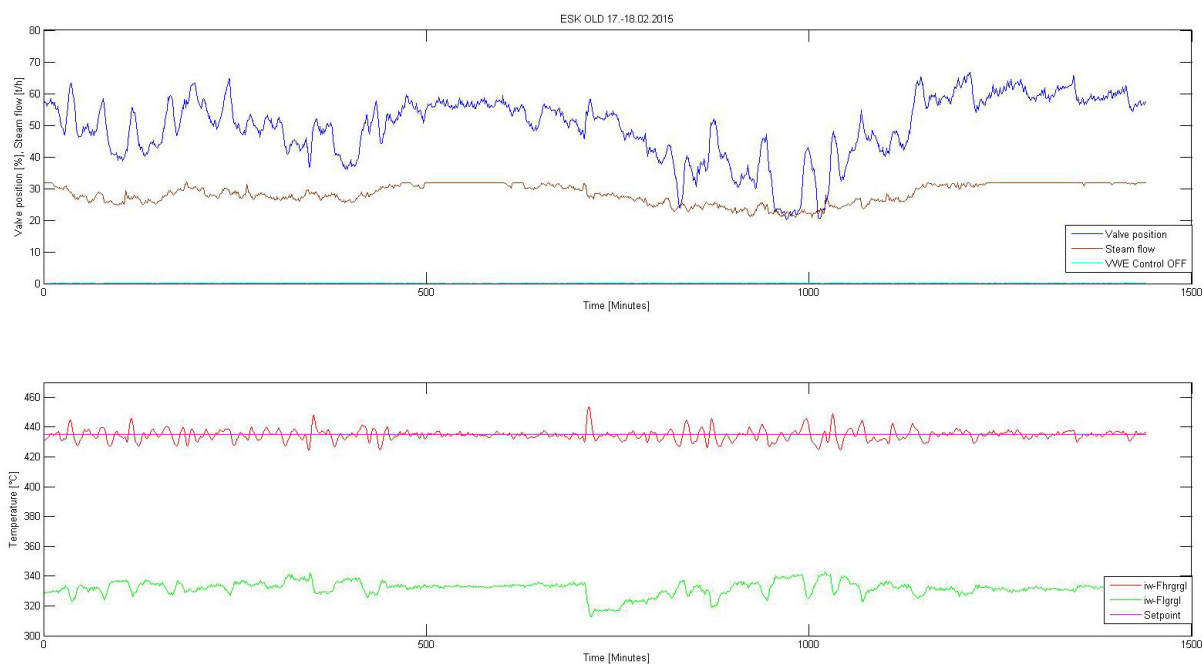
Navržený regulační obvod byl za použití jazyka Structured Text dle normy IEC 61131-3 realizován v PLC, ke kterému byly připojeny všechny potřebné signály. Pro možnost nastavení parametrů regulátorů byla vytvořena vizualizace s možností zobrazení trendů použitých veličin (obr. 13 a 14), s kterou PLC komunikuje pomocí OPC komunikace. V instalované vizualizaci v teplárně byl dále přidán přepínač pro přepínání mezi původním řízením a novým námi vytvořeným. Pro možnost jejich srovnání jsou na obr. 15 a 16 zobrazeny výsledné průběhy regulovaných a akčních veličin zaznamenané vždy v průběhu 24 hodin.



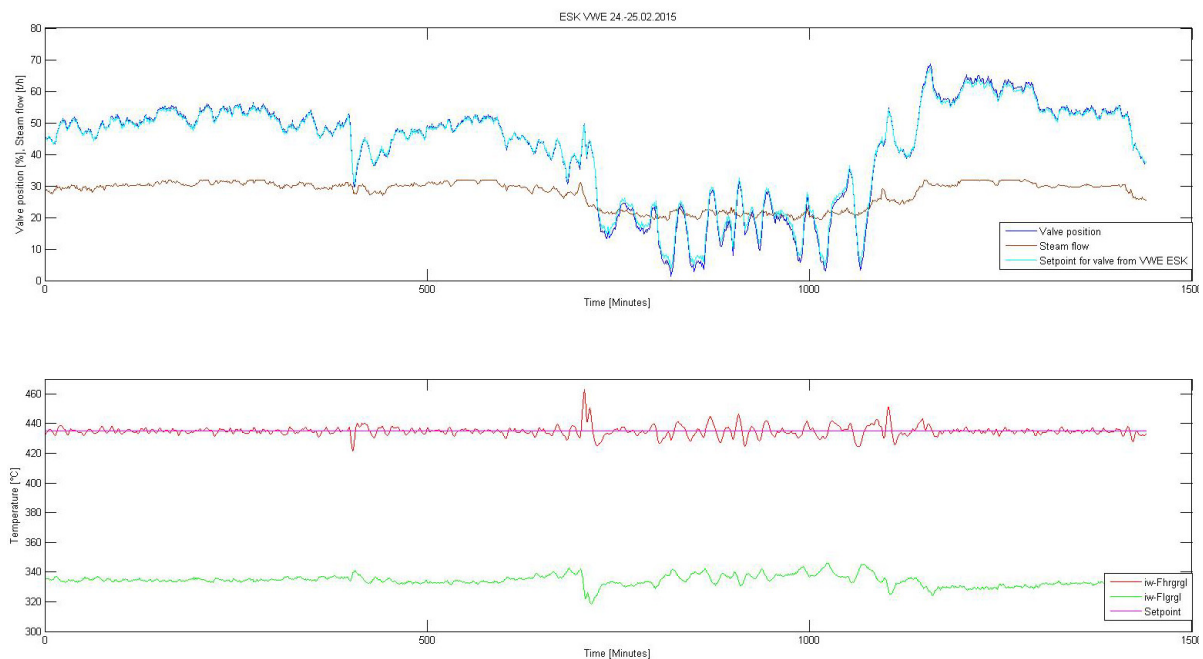
Obr. 13 Obrazovka pro parametrizaci regulátorů a kompenzační křivky



Obr. 14 Obrazovka pro zobrazení trendů použitých veličin



Obr. 15 Zaznamenané trendy při nasazení původního řízení



Obr. 16 Zaznamenané trendy při nasazení nového řízení

10 Závěr

Výsledkem práce je navržený rozvětvený regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou pro řízení teploty přehřáté páry a jeho následné nasazení v reálném provozu v teplárně. V regulačním obvodu byly použity dva regulátory typu PI zapojené v kaskádě.

Řízený systém byl nejprve identifikován z naměřených průběhů regulovaných veličin při skokové změně akční veličiny. Pro identifikované přenosy byly navrženy parametry hlavního a podřízeného regulátoru. Jelikož statická charakteristika akčního členu (ventilu) byla silně nelineární, bylo nutno tuto nelinearitu kompenzovat pomocí funkce k ní inverzní, která byla realizována pomocí lineární interpolace této inverzní funkce. Správnost navrženého regulačního obvodu byla následně simulačně ověřena v programu MATLAB *Simulink*. Jelikož k identifikaci řízeného procesu došlo během maximálního výkonu teplárny, tzn. při maximálním parním výkonu kotle a také z důvodu toho, že dochází ke změnám časových

konstant identifikovaných přenosů při změně této výkonové hladiny, bylo nutné tuto změnu promítnout i do parametrů regulátorů. Jako dostačující se jevílo zavést změnu výkonové hladiny do zesílení podřízeného regulátoru, což bylo realizováno a jeho zesílení se plynule snižuje se snižováním výkonové hladiny. Pro snadnou parametrizaci navrženého řízení byla vytvořena vizualizace s možností sledování použitých proměnných.

Navržený regulační obvod byl realizován v PLC a nasazen v reálném provozu. Z porovnání průběhů regulované veličiny naměřených při původním řízení a nově realizovaným řízením bylo patrné, že během nasazení nového řízení vykazovala odchylka regulované veličiny od žádané veličiny menších absolutních hodnot. Z porovnání akčních veličin vyplývá, že nové řízení vykazuje menší aktivitu akčního členu.

11 Použitá literatura

BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení. 1. vyd. Praha: BEN, 2003. 664s. ISBN 80-7300-020-2.

HORA Regelaraturen, Regulovatelný ventil – typové označení 11LAB40AA101. [online], 2015 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.hora.de/>

KOČIŠ, Štefan., STÁŇA, Michal., VILIMEC, Ladislav. Provoz a regulace energetických zařízení. [online]. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2007 [cit. 2015-05-02]. 200 s. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/414/provoz-a-regulace-energetickyh-zarizeni.pdf>

MENKINA, Michal. Pokročilé algoritmy řízení prvků a skupin elektrárenských bloků. Liberec: Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Technická univerzita v Liberci, 2011. 140 s. Dizertační práce, Vedoucí: doc. Ing. Osvald Modrlák, CSc.

NAVRÁTIL, Pavel. AUTOMATIZACE – vybrané statě. [online]. Zlín: Fakulta aplikované informatiky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011 [cit. 2015-05-02]. 290 s. Dostupné z: www.utb.cz/file/13883_1_1

NOSKIEVIČ, Petr. Modelování a identifikace systémů. Ostrava: Montanex, 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.

PIEŠ, Martin. Regulační model přehříváku páry a jeho ověření na elektrárenském bloku 200 MW elektrárny Dětmárovice. Ostrava: Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011. 126 s. Dizertační práce, Vedoucí: Prof. Ing. Pavel Nevřiva, DrSc.

ŠULC, Bohumil., VÍTEČKOVÁ, Miluše. Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 333 s. ISBN 80-01-03007-5.

ŠVARC, Ivan, ŠEDA, Miloš, VÍTEČKOVÁ, Miluše. Automatické řízení, 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2007. 324 s. ISBN 978-80-214-3491-2.

VÍTEČKOVÁ, Miluše., VÍTEČEK, Antonín. Základy automatické regulace. 2. vyd. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB – TU Ostrava, 2008. 244 s. ISBN 978-80-248-1924-2.

SSL – Functional Prototyp

JANEČKA, Patrik¹ & TŮMA, Jiří²

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

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

Abstract: *This paper is about a functional prototype developing to measure and analyze arrival acoustic waves. As SSL (Sound-Source Localization) are called techniques to getting coordinates or angles of arrival sounds. Usually, two mainstream methods have been used. The first one is TDOA (Time Difference of Arrival) method and the second one is Beamforming method. Both of mentioned methods are applicable on special devices proposed to determine an angle of sound arrival or its coordinates respectively. At the beginning a heart of the functional prototype was proposed. As a right choice EZ-Board 21469 has been determined. The EZ-Board includes high performance audio processing optimized processor ADSP-21469 DSP (Digital Signal Processor) and also can be fitted with Audio EZ Extender that plugs onto the EZ-Board. That combination provides capabilities of the evaluation system by providing other analog audio codecs to extend number of possible analog inputs to 12. These analog signals are represented by couple of microphones connected to designed and created PCD (Printed Circuit Board) for each microphone especially. The PCDs include analog low pass filter and analog amplifier for each microphone. The microphones are flexible to be mounted to make different variations. A limit is only their cable length. Processed signals from PCDs flow into processor. SSL algorithms process receiving signals and determine angles of arrival or coordinates of sound source. The whole project has been designed and built as a functional prototype to find a cheap way of SSL processing*

Keywords: *SSL, Beamforming, TDOA, ADSP-21469*

1 Introduction

Sound Source Localization (SSL) is a sector that uses a microphone array includes two microphones at least. Those microphone arrays have been designed to measure sound signals to transfer them to analog - digital convertors. The convertors are small devices connected to microchips or different processors. Also digital signal processors or embedded systems are used. SSL algorithms are designed in those devices to provide information about measured signals and angle of arrival of those sound signals. As a result of previews short description this paper is going to be about a functional prototype design. The functional prototype is a device uses two methods to determine angle of arrival of receiving sound signals. As a main attribute of the functional prototype the price was considered.

2 Methods of SSL

The functional prototype uses two methods. The first one is a method called Time Difference of Arrival (TDOA).

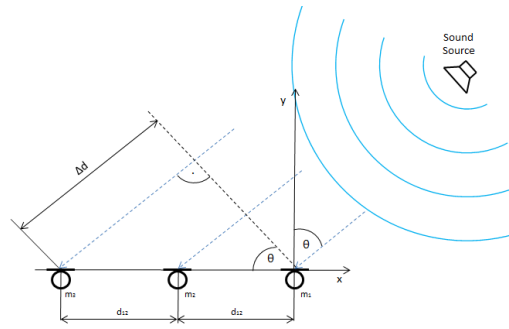


Figure 1 – Microphone array and a sound source

The figure 1 describes mathematical symbols to determine angle of arrival θ . The math expression is:

$$\theta = \arcsin \frac{\tau_{12} \cdot c}{d_{12}} \quad (1)$$

d_{12} is two microphones distance

τ_{12} is time delay between two microphones

c is sound speed

Time delay between two microphones is calculated as cross-correlation to get Time Delay Estimation (TDE). To know coordinates of microphones in a microphone array and time delay between two microphones there is a hyperbole for each microphone pair as a result. The sound source coordinate is determined as a cross point of all hyperbolas.

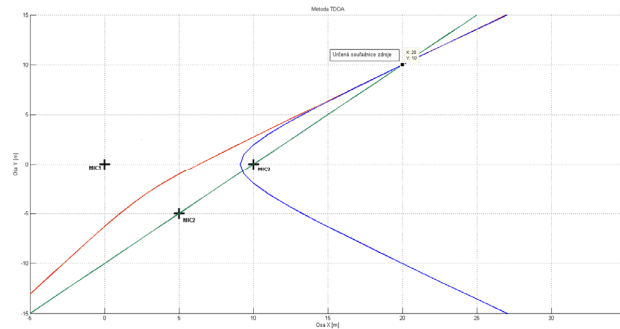


Figure 2 – Cross point of 3 hyperbolas

Second method is Beamforming. In a short description that method determines angle of arrival. For each possible angle the microphone array is imaginary steered to get maximizing Steered Response Power (SRP) of a beamformer. One of a basic approach is called *Delay and Sum*. Mathematically it is described as follow:

$$y(n) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_i(n - \tau_n) \quad (2)$$

$x_i(n)$ is measured signal of n microphone

w_i is a window value

τ_n time delay setting for each angle

N is number of microphones

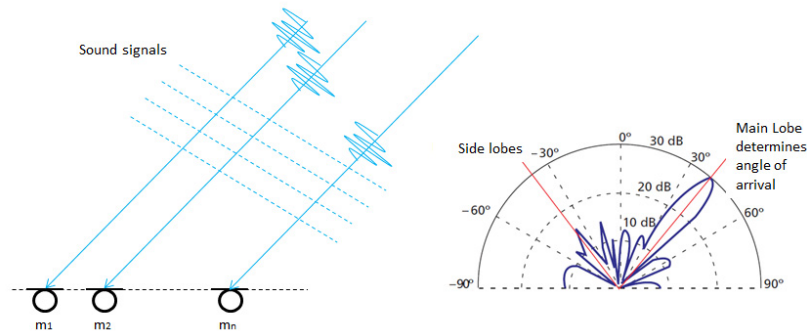


Figure 3 – SRP of beamformig

3 Hardware design

As a main part of functional prototype the *SHARC ADSP-21469 EZ-LITE* was picked up from digital signals processors (DSP) options. As a basic option there are two stereo signal inputs. To get more analog inputs *Audio EZ Extender* is available to expand analog input options. To use the extender 6 stereo analog inputs are available that also means 12 analog inputs available.

Microphones are the first step of recording sound signals. There are used electret microphone capsules MCE-4000. According to no MIC inputs but only LINE IN inputs on ADSP-21469 EZ Lite desk the microphones need to be powered up separately and also an amplifier need to be designed to gain receiving analog signals. To determine work range of the functional prototype need to be designed an analog antialiasing low pass filter. As a high limit of work range the value 5kHz has been determined. The low pass filter was designed as Huelsman typology with Butterworth approximation. That decision is related to simulate tests in *Matlab*. The final design of circuit board contains 9 V power for microphone MCE-4000, amplifier with 60 dB gain and low pass filter designed to 5kHz high limit. Each 4 microphones can be connected to one desk because each desk contain 4 microphone inputs and 4 analog outputs through CINCH connectors.

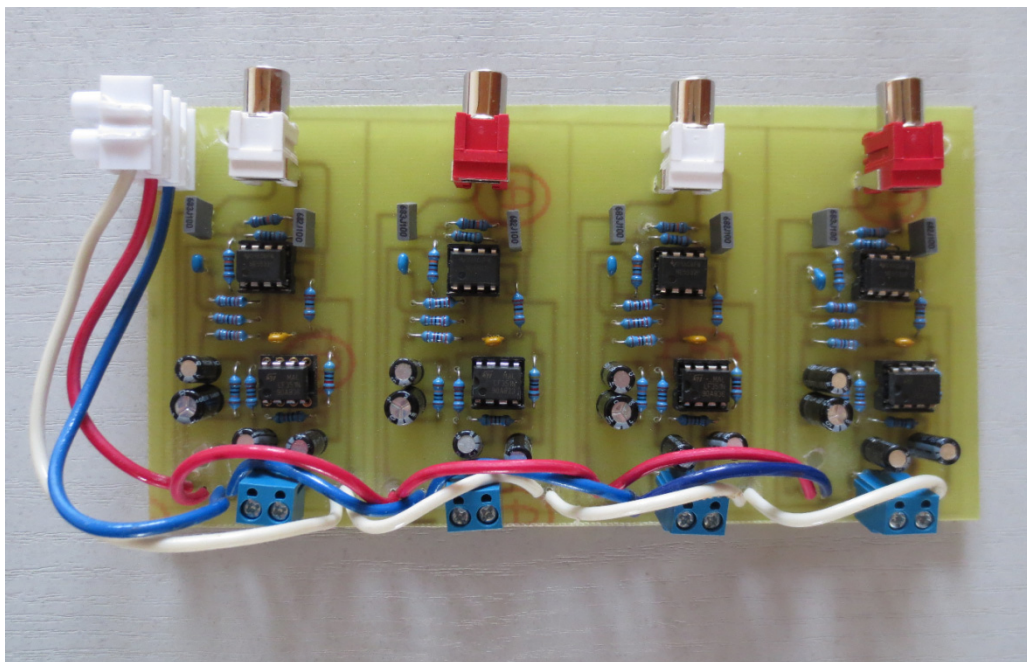


Figure 4 – Designed circuit boards

The data from the boards are transferring to the AD 1939 convertors. The convertors convert analog data to digital form and SSL methods are used inside DSP. Results are sent to PC and can be displayed on a monitor or save in files.

The functional prototype is designed as a flexible device which can be set as is needed at the moment. The block diagram of the functional prototype design is on follow picture:

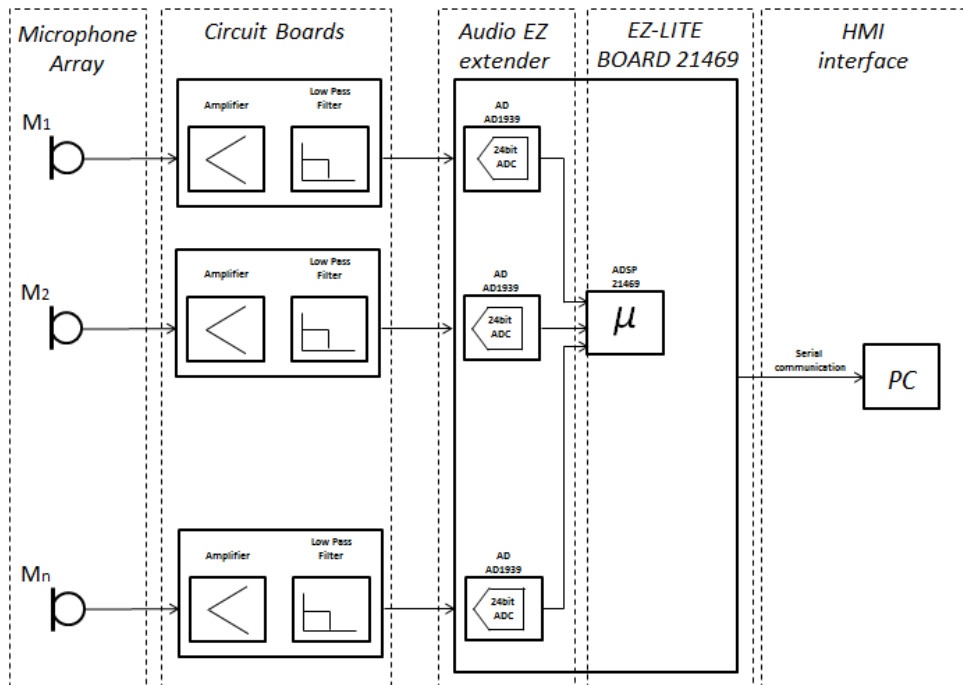


Figure 5 – Block diagram of the functional prototype

4 Software design

Software solution of the functional prototype is huge part of the design and it is not possible to include it to this paper. The main programme code is C coding but there is also used Assembler coding in some part of this project. As a software development tool *VisualDSP++* has been used. There is a basic concept to transfer digital data from *AD 1939* to DSP. Basically, *Signal Route Unit* (SRU) needs to be set to make connections between *Digital Audio Interface* (DAI) and *AD 1939* convertors. Also *Digital Peripheral Interface* (DPI) needs to be set. To transfer more signals from convertors to memory *Time Division Multiplex* (TDM) data transfer approach is used. Data to memory are sent in 256 block of values.

In TDOA algorithm the data are saved to memory and then Hamming window is applied on the data. After that windowed data are transferred to FFT block. In FFT block the data are transferred from time domain to frequency domain it is because of faster cross correlation action in that domain. Then for each microphone pairs a time delay is calculated. All time delays are saved into one array and then send to PC. Also all measured data are saved to files on PC site.

In Beamforming algorithm received data are also windowed by Hamming window and then send from memory to FIR filter. In FIR filter each microphone data are delayed to simulate each possible angle of arrival. The FIR filter is used because of SRP for each angle. Also in that case results are saved and send to PC.

5 Functional prototype - measurements

Many simulations and measurements have been done, but in this paper two measurements are shown. Both of them have the same basic things. The sound of source is a speaker connected to PC. Acoustic signals are generated and the speaker provides sound and 2,5kHz was used. Frequency sampling is 48kHz, but there are used 2 lines because of stereo inputs and in that case there is 24kHz for each analog input. There is a microphone array contains 9 microphones. The microphones are sorted into lines. Each line contains 3 microphones and distance among them is $a=5,5$ cm. Distance between lines is $b=4,2$ cm. Speaker was $c=30$ cm from microphone array.

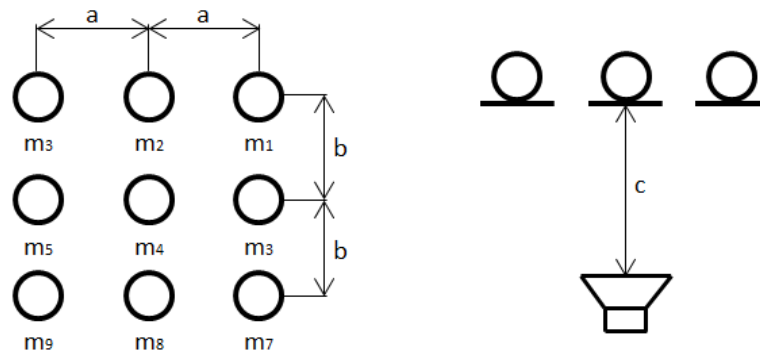


Figure 5 – Microphone array – distances

The speaker was shifted by 15 degrees so the measured range is from -60 to 60 degrees. In TDOA there are many microphone pairs can be used for an angle calculation and there is supposed the final result is an average value of results for each angle also values out of range are not used in the set. In Beamforming there is only one value for each angle. Next table shows angle results of TDOA and Beamforming methods:

Table 1 TDOA and Beamforming results

| Angle [°] | TDOA Result [°] | TDOA Deviation [°] | Beamforming Result [°] | Beamforming Deviation [°] |
|--------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 15 | 0 | 16 | 1 |
| 30 | 31 | 1 | 32 | 2 |
| 45 | 37 | 8 | 50 | 5 |
| 60 | 41 | 19 | 53 | 7 |
| -15 | -15 | 0 | -17 | 2 |
| -30 | 29 | 1 | -37 | 7 |
| -45 | -41 | 4 | -51 | 6 |
| -60 | -40 | 20 | -54 | 6 |

6 Conclusions

The functional prototype works with deviations in results. TDOA method shows better results for lower angles and on the other hand Beamforming shows better results for higher angles. Problem of that measurement is frequency sample 48kHz for one stereo input, there is possibility to use 96kHz and then more precise results can be achieved. There are still good options to improve its features and measurements. One of the options is to invest more to microphones because of cheap microphones are used at this moment. It is because it is supposed that functional prototype development is being focused on a low cost design. Also

circuit boards can be improved by better equipment. The simple fact of the matter is this, there is possible to create a SSL functional prototype but results are equal to invest to better equipment.

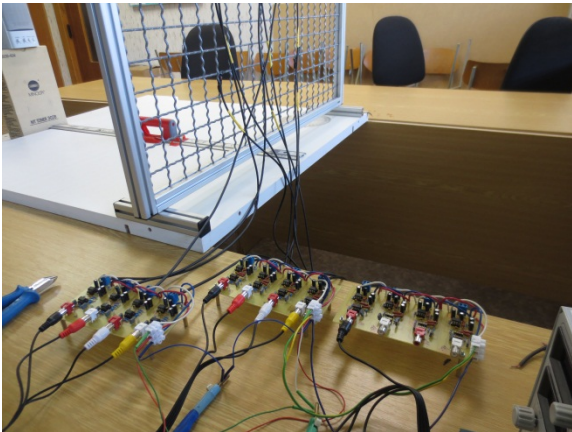


Figure 6 – Circuit board



Figure 7 – Measurement side view

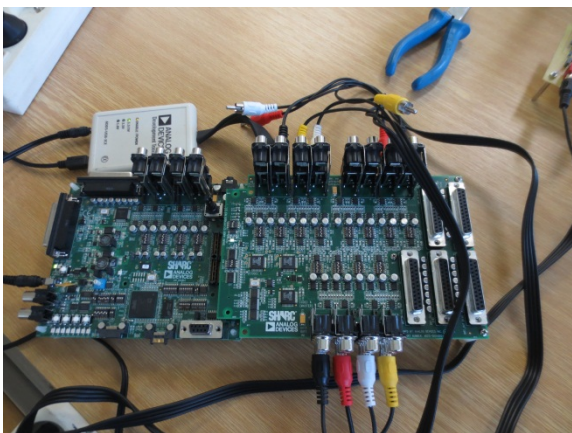


Figure 8 – ADSP-21469 and Extender Board

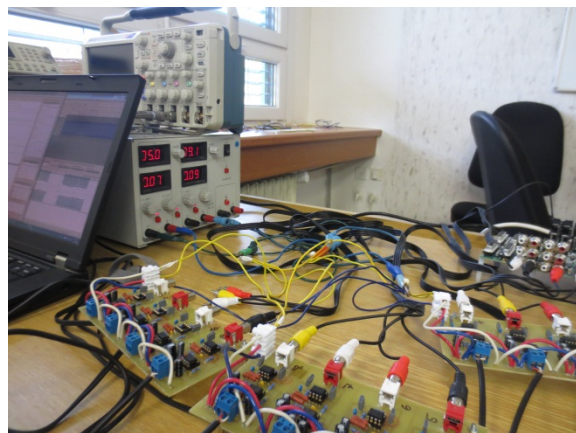


Figure 9 – Circuit boards and power supply

7 References

ANALOG DEVICES, Manual section, Norwood 2014 [online].
Available from: <http://www.analog.com/>


DOSTALEK, Petr. . Embedded systém pro lokalizaci zdroje zvuku. Zlin, 2009. Dissertation thesis. Univerzita Tomase Bati in Zlin.


SMITH, W., Steven, Digital Signal Processing. Burlington, Newnes, 2003.
ISBN 0-75067444-X

TUMA, Jiri, Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Stramberk, Sdělovací technika, 1997.
ISBN 80-901936-1-7

Coordination of periodic multiple source transport processes in selected nodes of network

LORENZ, Filip¹ & TEICHMANN, Dušan²

¹ Ing., FS VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika,
 e-mail: filip.lorenz.st1@vsb.cz

² Ing., Ph.D.,  dusan.teichmann@vsb.cz

***Abstract:** The article deals with the creation of a mathematical model of a real problem with discreet flows. Transport processes are repeated at predetermined intervals and they must be time coordinated in selected coordination places. The main criterion is the amount of created coordination bonds with respect to downtime of transported elements emerging in coordination places. The optimization task is solved by methods of mathematical programming. The presented paper contains a mathematical model of the task being solved. The proposed model is tested with real data. Computational experiments were conducted in the optimization software Xpress – IVE.*

***Keywords:** mathematical model, transport process, mathematical programming, optimization software, coordination place*

1 Motivation for solving the task and current state of knowledge

The motivation to solve the problem is searching for an approach allowing the maximum increase of coordination bonds with respect to fluency of network transport processes. Discreet periodic transport processes, which are the subject of our interest, occur primarily in transport systems. What is characteristic for certain types of these systems, is the fact that the transported elements pass between the transport paths. The fluency of such transport processes can be increased primarily by mutual time coordination of the moments of interruption of a transport process on one path and continuation of a transport process on the following path.

The tasks described in the previous paragraph belong to optimization tasks. Basic considerations related to the use of optimization approaches to coordination tasks were formulated in “Základy matematickej teórie dopravy”.

Two types of optimization coordination tasks were formulated in those pieces of work. The two types differ in the type of a network segment where coordination is to be performed. The authors distinguish the coordination tasks in the network nodes and the coordination tasks on the sections of the network. The issue of time coordination in the network nodes was further developed by prof. RNDr. Jaroslav Janáček, CSc., who proposed a very efficient model soluble by methods of linear programming. This model was verified in terms of nodes specific transport systems. The issue of time coordination on the sections of the networks modeling transport systems was solved in the work “Optimalizace na dopravních sítích”.

2 Formulation of solving task and construction of a mathematical model

Let L be a set of linear (not circular) paths ($l, m \in L$) where transport processes $i \in S_l$ $j \in S_m$ take place. The arrangement of individual paths creates a set of potential coordination

nodes where it is possible to coordinate the timing of transport processes (the set of coordination nodes is marked K).

Each transport process is initiated and completed outside the coordination nodes (so-called start and end process node), it occurs on defined transport paths and it passes through just two different coordination nodes, as shown in Figure 1.

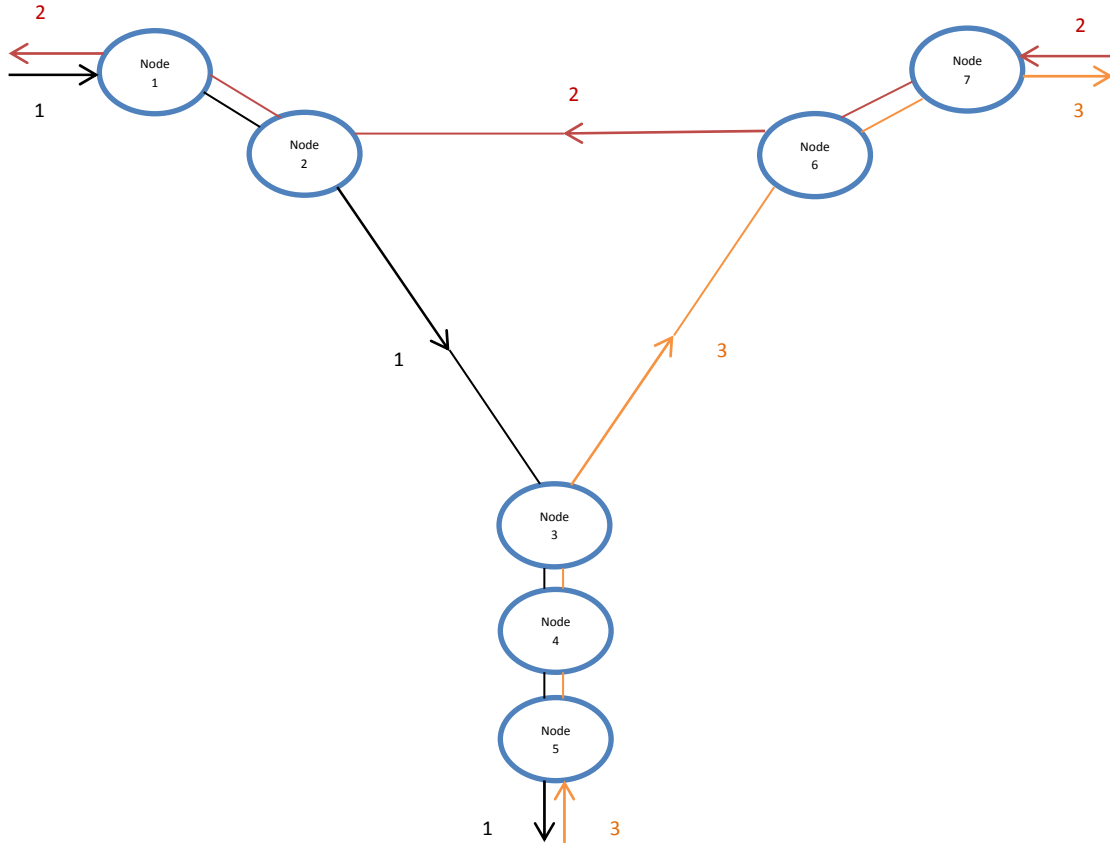


Figure 1 – Network with coordination nodes (Nodes 1,...,7) and with transport paths (1,2,3)

A set of coordinating nodes $k_{lm} \in K$ is defined for each two transport processes. Those transport processes are required to be coordinated in the node. For each transport process i, j the earliest possible time moments of its initiation in the start node T_i and T_j are known (the same start position is selected for coordinated transport processes, i.e. the earliest possible time position of their beginnings) as well as the time required to achieve the coordinating node $k \in k_{lm} - t_{ik}$. The time needed to transfer the transported element between coordinated transport processes within the coordinating node τ_p is also known.

The task is to decide on the shift of the beginnings of individual transport processes so that there would be respect to the time delay of the transported elements between coordinated directions was created as much as possible coordination bonds. The time shift of the beginning of coordinated technological processes is limited. The weight of each transfer is considered equal to 1.

3 Solution of the model

The following variables are used in the task:

x_{li} - time shift of the beginning of transport process $i \in S_l$ for transport path $l \in L$ in the start node,

x_{mj} - time shift of the beginning of transport process $j \in S_m$ for transport path $m \in L$ in the start node,

h_{ijk} - time delay of the transported element when transferred from the transport process $i \in S_l$ to $j \in S_m$ (the introduction of variables h_{ijk} for the couples $i \neq j$ is supposed). Because the coordination for the specific combination of indexes $i \in S_l$ and $j \in S_m$ takes place in multiple coordinating nodes, the coordinating node index does have to be included in the variable label.

z_{ijk} - bivalent variable modeling the existence of transfer between the transport process $i \in S_l$ and the transport process $j \in S_m$ (the introduction of variables z_{ij} for the couples $i \neq j$). When $z_{ijk} = 1$, the coordinative bond between the processes is created, otherwise it is not. Because the coordination for the specific combination of indexes $i \in S_l$ and $j \in S_m$ takes place in multiple coordinating nodes, the coordinating node index does have to be included in the variable label.

The mathematical model will have the form:

$$\max f(x, z, h) = \sum_{k \in k_{lm}} \sum_{i \in S_l} \sum_{\substack{j \in S_m \\ i \neq j}} z_{ijk} \quad (1)$$

under these conditions:

$$(T_j + t_{jk} + x_{mj}) - (T_i + t_{ik} + x_{li}) - \tau_p \geq M(z_{ijk} - 1) \quad \text{for } i \in S_l; j \in S_m; l, m \in L; k \in k_{lm}; i \neq j \quad (2)$$

$$(T_j + t_{jk} + x_{mj}) - (T_i + t_{ik} + x_{li}) - \tau_p \leq h_{ijk} + M(1 - z_{ijk}) \quad \text{for } i \in S_l; j \in S_m; l, m \in L; k \in k_{lm}; i \neq j \quad (3)$$

$$\sum_{k \in k_{lm}} \sum_{j \in S_m} z_{ijk} \geq 1 \quad \text{for } i \in S_l \quad (4)$$

$$x_{mj} \leq 19 \quad \text{for } j \in S_m; m \in L \quad (5)$$

$$x_{li} \leq 19 \quad \text{for } i \in S_l; l \in L \quad (6)$$

$$h_{ijk} \leq 2 \quad \text{for } i \in S_l; j \in S_m; l, k \in k_{lm} \quad (7)$$

$$x_{li} = x_{li+1} \quad \text{for } l \in L; i \in S_l \setminus \{n_l\}; |S_l| = n_l \quad (8)$$

$$x_{mj} = x_{mj+1} \quad \text{for } m \in L; j \in S_m \setminus \{n_m\}; |S_m| = n_m \quad (9)$$

$$z_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \text{for } i \in S_l; j \in S_m; k \in k_{lm}; i \neq j \quad (10)$$

$$x_{mj}, x_{li} \geq 0 \quad \text{for } i \in S_l; j \in S_m; l, m \in L \quad (11)$$

$$h_{ijk} \geq 0 \quad \text{for } i \in S_l; j \in S_m; k \in k_{lm}; \quad (12)$$

The objective function (1) represents the optimization criterion of the total number of the coordination bonds resulting between different transport processes. The group of constraints (2) ensures that if it is not possible to connect a transport process to the following one in terms of time, the coordination bond between these transport processes is not created. The group of constraints (3) ensures the link between the constraints and the group of constraints (7). The group of constraints (4) ensures that coordination bond creates only in one node from set of

potential coordinating nodes. The group of constraints (5) and (6) ensures that time shift does not exceed a defined value.

The group of constraints (7) ensures that coordination bond creates between two transport processes only in that case that time loss of transported elements will be smaller than allowable time loss. The group of constraints (8) and (9) ensures that time shift of transport processes will always in the same direction. The group of constraints (4) ensures that at least one following process will be set to each transport process, except for the node 2. The constraints (10), (11) and (12) are obligatory and define the domains of definition for individual variables.

4 Computational experiments

In this section we will present the result of executed computational experiment, which was executed in order to validate the proposed model. One of the necessary input data are the driving time coordinated transport processes to the individual coordinating nodes. Other input data are time position departures each transport processes. Departure of transport process is in time 3 min. for transport path 1. Departure of transport process is in time 6 min. for transport path 2. Departure of transport process is in time 2 min. for transport path 3. Departure of following transport processes are in 20 min. cycle for each transport paths. Three transport processes were used for computational experiment for each transport paths.

Time coordination of processes in Nodes 1 and 2:

- 2 → 1 (transport path 2; following transport path 1)

Time coordination of processes in Nodes 3, 4 and 5:

- 1 → 3 (transport path 1; following transport path 3)

Time coordination of processes in Nodes 6 and 7:

- 3 → 2 (transport path 3; following transport path 2)

Table 1: Summary of obtained results

| Node | z_{ijk} [1] | h_{ijk} [min.] |
|------|---------------------|---------------------|
| 1 | x | x |
| 2 | $z_{2,1,1,2} = 1$ | $h_{2,1,1,2} = 0$ |
| | $z_{2,2,1,2,2} = 1$ | $h_{2,2,1,2,2} = 0$ |
| | $z_{2,3,1,3,2} = 1$ | $h_{2,3,1,3,2} = 0$ |
| 3 | $z_{1,1,3,3,3} = 1$ | $h_{1,1,3,3,3} = 0$ |
| 4 | x | x |
| 5 | x | x |
| 6 | $z_{3,1,2,1,6} = 1$ | $h_{3,1,2,1,6} = 0$ |
| | $z_{3,2,2,2,6} = 1$ | $h_{3,2,2,2,6} = 0$ |
| | $z_{3,3,2,3,6} = 1$ | $h_{3,3,2,3,6} = 0$ |
| 7 | x | x |

Time shift of transport processes is 19 min. for transport path 1. Time shift of transport processes is 18 min. for transport path 2. Time shift of transport processes is 11 min. for transport path 3. The new departure time of transport processes is in time 22 min. for transport path 1, in time 24 min. for transport path 3 and in time 13 min. for transport path 3. From the above results of the optimization calculation, it is clear that the total time loss for all the coordinated transport processes is 0 min.

Optimization experiments were conducted in the optimization software Xpress-IVE.

5 Conclusions

The paper deals with the creation of coordination bonds between individual discrete flows. It also contains a linear mathematical model, the optimization criterion is the total number of the coordination bonds resulting between different transport processes within the coordination places where the coordination of those processes takes place. The specific experiment was conducted in the conditions of tram network in Ostrava. Using the mathematical model, the coordination bonds between coordinated transport processes were created and the values needed to make the timetable were calculated. The further development of the mathematical model will be to increase the number of coordination places and coordinated transport processes.

6 References

- ČERNÝ, J., P. KLUVÁNEK. Základy matematickej teórie dopravy. Bratislava: VEDA, 1989. ISBN 80-224-0099-8.
- KRÁL, Michal. Časová koordinace přípojně taktové dopravy v železniční stanici Ostrava – Svinov. Ostrava, 2010. Diplomová práce. VŠB – TUO, Fakulta strojní, Istitut dopravy.
- KOZEL, Petr. Časová koordinace spojů veřejné hromadné dopravy v úseku Frýdek-Místek - Dobrá. Ostrava, 2009. Diplomová práce. VŠB – TUO, Fakulta strojní, Istitut dopravy.
- JANÁČEK, Jaroslav. Optimalizace na dopravních sítích. ŽILINA: ŽU v Žiline, 2002. ISBN 80-807-0031-1.

Control of Groundwater Remediation Process as Distributed Parameter System

MENDEL, Mário¹, HULKÓ, Gabriel² & MÉSZÁROS, Alajos³

¹ Ing., ✉ Institute of Automation, Measurement and Applied Informatics, Faculty of Mechanical Engineering, Slovak University of Technology, Nám. slobody 17, 812 31 Bratislava, SLOVAKIA, 📧 mario.mendel@stuba.sk

² prof. Ing. DrSc., 📧 gabriel.hulko@stuba.sk

³ prof. Ing. PhD., ✉ Institute of Information Engineering, Automation and Mathematics, Faculty of Chemical and Food Technology, Slovak University of Technology, Radlinského 9, 812 37 Bratislava, SLOVAKIA, 📧 alajos.meszáros@stuba.sk

Abstract: *With contemporary technological approaches which allow a significant reduction in energy consumption and conversely huge increase in computing power in real time applications, which greatly exceed the requirements for error-free operation, it is possible to implement the most modern methods of control. The model problem comprises of fittingly spaced soil region with groundwater flow and transport of pollution which are modelled in the software MODFLOW and MT3DMS. Operating quantities are generated by pumping wells. Solution of control is supported by DPS Blockset for MATLAB & Simulink. Remediation wells and hydraulic head constitute in practice a lumped input and distributed parameter output system. The main objective of modeling and control is on simulation level determine the volumetric flow from remediation wells and thereby achieve the desired shape of cone of depression. Control synthesis is based on control loop with distributed parameters.*

Keywords: *groundwater remediation, distributed parameter system, control, MODFLOW, DPS Blockset for MATLAB & Simulink*

1 Introduction

Groundwater pollution constitutes a significant threat to drinking water supplies. The prodigious progress in information and communication technologies (ICT), and advanced control methods offer new options for remediation of groundwater. Virtual software environment MODFLOW is based on the numerical solution of partial differential equations which describe the dynamics of groundwater as a system with distributed parameters. Software environment MT3DMS is used to describe the transport of pollution in groundwater in the form advection, dispersion and chemical reactions of solutes. Representation of the system with a lumped input and distributed output in extent of remediation control of groundwater is intended with pumping wells and hydraulic heads. Specifying the shape of depression cone by rate of volumetric flow from remediation wells is the key goal of control, which takes place in a controlled loop with distributed parameters.

2 Modeling of groundwater dynamics

2.1 MODFLOW, Flow model

The area of pollution distribution simulates a condition in which petroleum substances leaked into the aquifer and with controlled pumping from wells (remediation) is effectively prevented the spread of contamination. The deployment of pumping wells is directly affected by the solution from MODFLOW and MT3DMS and the main aim is a creation of suitable cone of depression.

Description of the groundwater flow in a coordinate system (x, y, z) is expressed by the equation

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - Wb = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T &= K \cdot b \\ S &= S_s \cdot b \end{aligned} \quad (2)$$

| | | |
|-------|---------------------------|--|
| where | L, M, T | – unit of length, mass, time, |
| | T | – transmissivity $[L^2 T^{-1}]$, |
| | K | – hydraulic conductivity $[L T^{-1}]$, |
| | $\partial h / \partial x$ | – gradient in hydraulic head, |
| | W | – volumetric flux per unit volume representing sources and sinks of water $[T^{-1}]$, |
| | b | – vertical thickness of model $[L]$, |
| | S | – storage coefficient $[L^{-1}]$, |
| | S_s | – specific storage $[L^{-1}]$ |

The solution of task is orientated at local pollution under the influence of non-polar extractable substances (NEL), which is set as concentrations into MT3DMS. Model is based on a horizontal division of the soils with the required properties (Table 1). Simulation of transient flow is divided into equally distributed stress periods. Transient response from pumping wells is obtained as a system with distributed parameters. The simulation of the state of the contaminant is shown in Figure 1.

2.2 MT3DMS, Contaminant transport in groundwater

The movement of dissolved constituents in groundwater is affected by three factors:

- (1) advection of the constituent with the water flowing through the aquifer,
- (2) dispersion of the constituent,
- (3) sources and sinks of the constituent within the volume such as chemical reactions or adsorption onto the solid matrix of the aquifer.

Computer models of solute transport are based on mass-balance equations that describe these factors. In these models are generally considered advection by pumping (q_{out}) and injection (q_{in}) due to the natural flow of water. Thus, the contaminant mass balance may be written as:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{\phi} \bar{D} \cdot \bar{\nabla} C - \bar{\nabla} \cdot \bar{q} C + q_{in} C^* - q_{out} C + R = \frac{\partial(\phi C)}{\partial t} \quad (3)$$

| | | |
|-------|----------------|--|
| where | C | – material concentration $[M/L^3]$, |
| | C^* | – concentration of the source term $[M/L^3]$, |
| | \bar{q} | – Darcy velocity $[L/t]$, |
| | q_{in} | – volumetric flow rate of the water source $[L^3/t]$, |
| | q_{out} | – volumetric flow rate of the water sink $[L^3/t]$, |
| | R | – chemical source or sink $[M/L^3]$, |
| | ϕ | – porosity $[-]$, $\bar{\bar{D}}$ – dispersion tensor $[L^2/t]$, |
| | $\bar{\nabla}$ | – gradient differential operator $[1/L]$ |

2.3 MT3DMS, Contaminant transport in groundwater

Dimensions in the coordinate system (x, y, z) : $(4000, 3000, 20)[m]$, division of finite differential grid, number of elements (i, j, k) : $(60, 80, 1)$ for (y, x, z) . Boundary conditions: specific head on left border of model is 116m, specific head on right border of model is 110m. Number of stress periods: 550. Total duration of transient simulation: 475200000 s B 15 years.

The input parameters for the model MT3DMS are:

- Initial concentration of the contaminant: High degree of pollution 10 mg/l.
- Spread of contaminant is shown in Figure 1 controlled by pumping wells in time 99366480 s B 1150 days.

Table 1: Material properties

| Name (sediment, rock) | Horizon. hydraulic conductivity K_h | Vertical hydraulic conductivity K_v | Horizon. anisotropism | Vert. anisotropism K_h/K_v |
|-----------------------------|--|--|------------------------------|------------------------------------|
| clay | 0.0001 | 0.000005 | 1.0 | 3.0 |
| sand | 0.001 | 0.00005 | 1.0 | 3.0 |
| gravel_a | 0.003 | 0.00016 | 1.0 | 3.0 |
| gravel_b | 0.008 | 0.0004 | 1.0 | 3.0 |
| gravel_c | 0.012 | 0.0006 | 1.0 | 3.0 |
| Name (sediment, rock) | Specific storage $S_s [L^{-1}]$ | Specific yield | Longitudinal dispersivity | Porosity |
| clay | 0.0009 | 5.0 | 1.0 | 0.2 |
| sand | 0.00049 | 28.0 | 15.0 | 0.2 |
| gravel_a | 0.000049 | 26.0 | 20.0 | 0.2 |
| gravel_b | 0.000057 | 25.0 | 25.0 | 0.2 |
| gravel_c | 0.0001 | 35.0 | 30.0 | 0.2 |

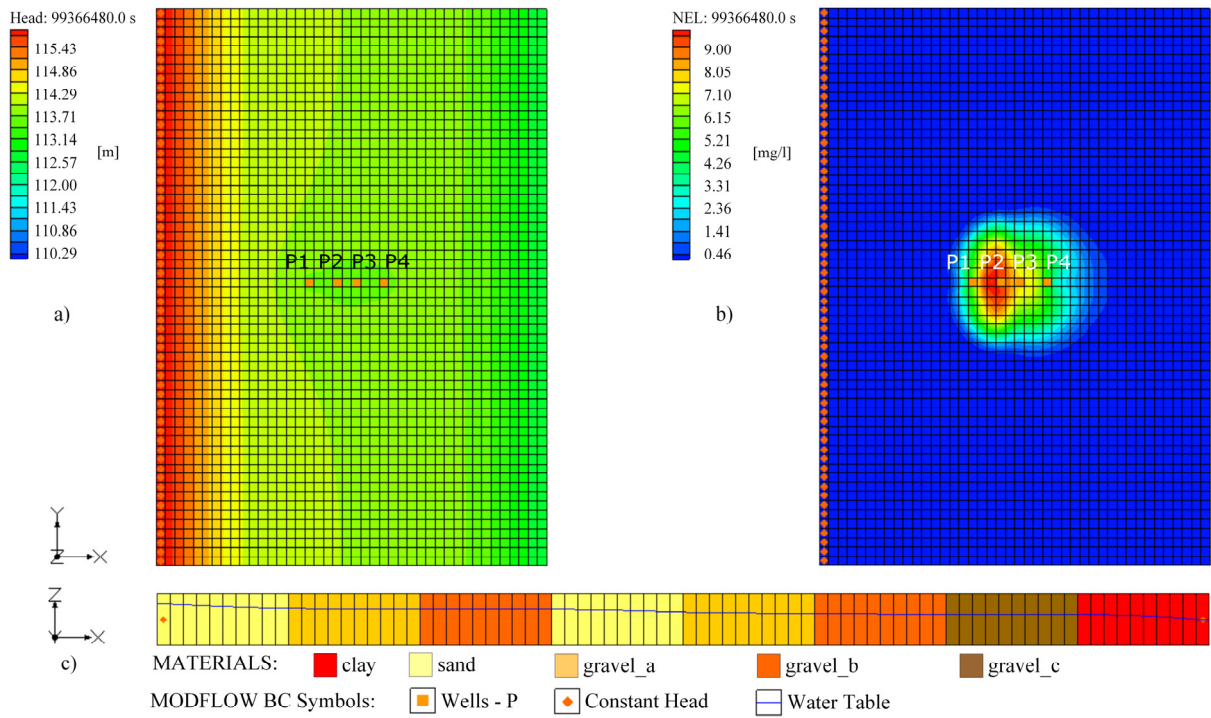


Figure 1 – a) Detail of the model for Hydraulic Head (flow in direction of x axis) – MODFLOW (hydraulic head is directly influenced by the characteristics of individual soil), b) Detail of the model for Distribution of contamination – MT3DMS, c) Distribution of soil (materials) for whole model

3 LDS and HLDS dynamics, control

For the description and modelling of the dynamics of the system with a lumped input and distributed parameter output (LDS) is established block LDS , in which is generated causal relation between $U(x,t)$ a $Y(x,t)$, (Figure 2).

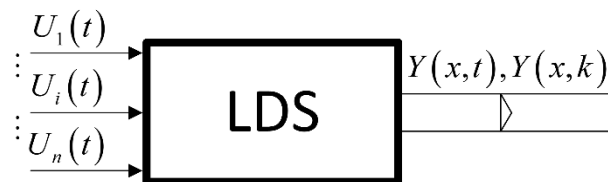


Figure 2 – System with lumped input and distributed output

- (LDS) – system with lumped input and distributed output,
- $Y(x,t)$ – continuous distributed output variable,
- $Y(x,k)$ – distributed output variable,
- $\{U_i(t)\}_i$ – lumped input variable

For a graphic representation of linear systems (LDS), distributed on the interval $\langle 0, L \rangle$, are used the time-spatial variables at a right hand isometric system. By considering zero initial and boundary conditions, input – $U_i(t)$, we receive distributed variable $Y_i(x,t)$, (Figure 3).

We may express the relationship between lumped input and distributed output variable in discrete form as the product of convolution in the form

$$Y(\mathbf{x}, k) = \sum_1^n Y_i(\mathbf{x}, k) = \sum_1^n \mathcal{G}H_i(\mathbf{x}, k) \oplus U_i(k) \quad (4)$$

where $\{\mathcal{G}H_i(x, k)\}_{i=1, n}$ – distributed impulse response functions of *LDS* with zero-order hold units $\{H_i\}_{i=1, n}$, $\{\mathcal{G}H_i(x, k) = \mathcal{H}H_i(x, k) - \mathcal{H}H_i(x, k-1)\}_{i=1, n}$ based on $\{\mathcal{H}H_i(x, k)\}_{i=1, n}$ distributed transient responses of controlled system,
 \oplus – sign of convolution summation

During the decomposition of output variables and dynamic characteristics of the steady state is obtained stable value distributed output variable $Y(x, \infty)$. We can express it by using steady values distributed transition functions *HLDS*: $\{\mathcal{H}H_i(x, \infty)\}_{i=1, n}$ (Figure 3).

We can obtain characteristics $\{\mathcal{H}H_i(x, k)\}_{i=1, n}$ as action on step function for each input of distributed system. For reduced transient steady distributed functions at the time $k \rightarrow \infty$, for pumping wells, is the graphical representation in the positive direction (in Figure 3 are plotted inversely). The following relation holds

$$\left\{ \mathcal{H}HR_i(x, \infty) = \frac{\mathcal{H}H_i(x, \infty)}{\mathcal{H}H_i(x_i, \infty)} \right\}_i \quad (5)$$

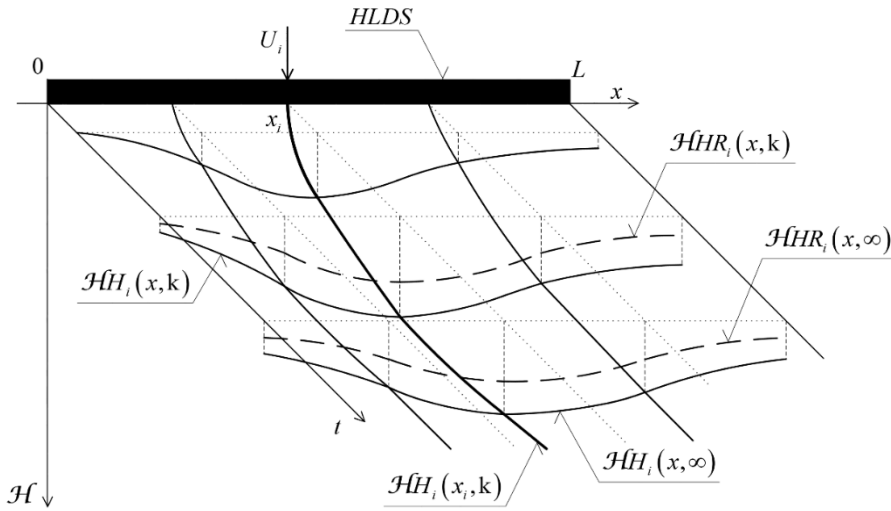


Figure 3 – *i*-th distributed transient characteristic $\mathcal{H}H_i(x, k)$ of the system with lumped input and distributed parameter output

where *HLDS* – system with lumped input and distributed output with block of zero-order hold units,
 $U_i = 1(k)$ – *i*-th lumped discrete unit input function,
 $\mathcal{H}H_i(x, k)$ – *i*-th distributed transient response,
 $\mathcal{H}H_i(x_i, k)$ – *i*-th partial distributed, lumped transient response at a point x_i ,
 $\mathcal{H}HR_i(x_i, k)$ – partial distributed reduced transient response at the point x_i ,
 plotted inversely (a positive orientation),

$\mathcal{H}HR_i(x_i, \infty)$ – steady-state distributed reduced transient response, plotted inversely (a positive orientation)

Control synthesis of distributed system, for established sequence setting variables $\bar{U}(k)$ in the steady-state for $k \rightarrow \infty$, can gain control error $E(x, k)$ minimal value in chosen quadratic norm.

In the block Space Synthesis (Figure 4) is evaluating the following approximation problem solution

$$\begin{aligned} \min_{w_i} \left\| W(x, \infty) - \sum_{i=1}^n W_i \mathcal{H}HR_i(x, \infty) \right\| &= \\ &= \left\| W(x, \infty) - \sum_{i=1}^n \hat{W}_i \mathcal{H}HR_i(x, \infty) \right\| = \\ &= \left\| W(x, \infty) - \hat{W}O(x, \infty) \right\| \end{aligned} \quad (6)$$

where $W(x, \infty)$ – reference variable,
 \hat{W}_i – lumped reference variable,
 $\{\mathcal{H}HR_i(x, \infty)\}_i$ – reduced steady-state distributed transient response,
 $\hat{W}O(x, \infty)$ – best approximation of reference variable

4 MATLAB & Simulink Model, DPS blockset

Control system is built up, Figure 4, in the software environment DPS Blockset for MATLAB & Simulink. Block HLDS represents the relationship between pumped water and hydraulic head. Block DPS Space Synthesis generates the desired values corresponding to the specified shape of depression cone. In block DPS Time synthesis controllers are tuned by SISO circuit.

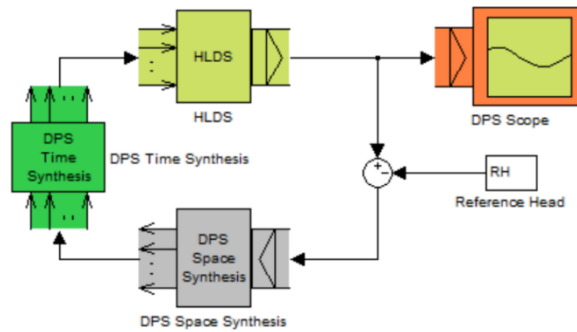


Figure 4 – Schematic diagram of the block DPS Space Synthesis, Time synthesis and block *HLDS* for the studied system

Distributed transient characteristics for pumping wells $P_1 - P_4$, by application the principle of superposition, is the output of the block *HLDS* shown in Figure 5. In the block DPS Time synthesis is built-up a set of SISO controllers defined by the user in an external Simulink model.

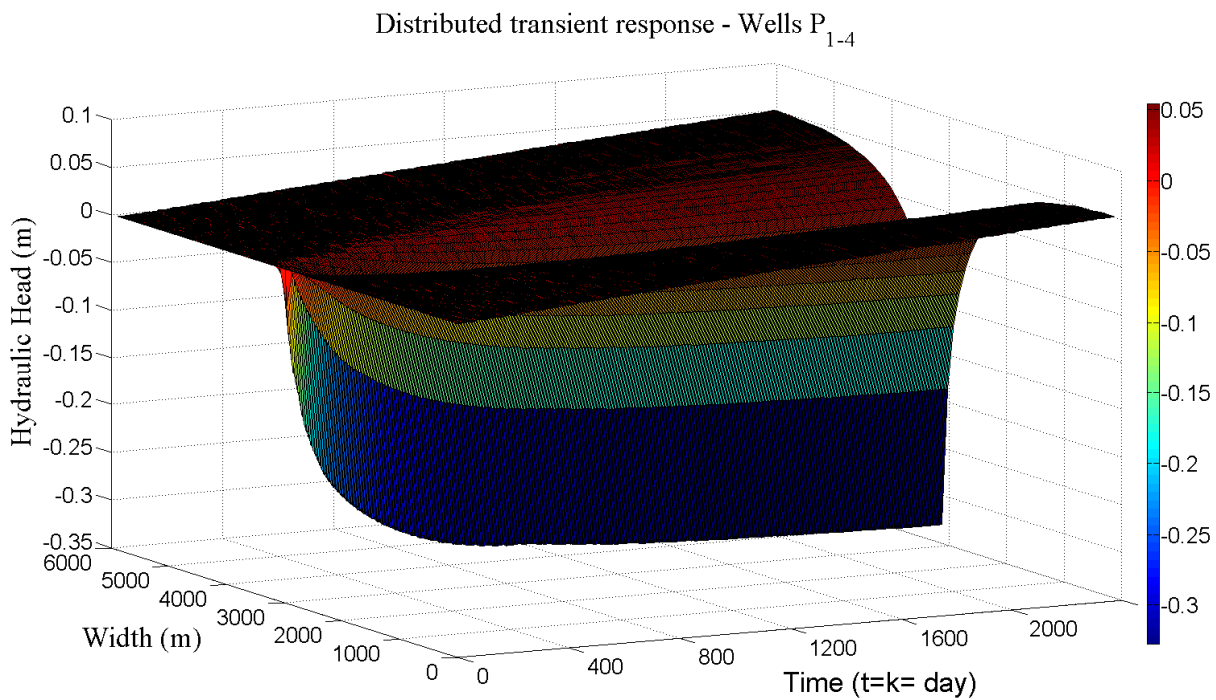


Figure 5 – Distributed transient response of the system with a lumped input and distributed output for pumping wells P_{1-4}

5 Conclusion

In the paper was elaborated a model of groundwater remediation as system of control with distributed parameters. Description of the controlled system dynamics is implemented in software environment MODFLOW and for actuating quantities are used pumping wells. Synthesis of control is put together in software environment DPS Blockset for MATLAB & Simulink.

6 Acknowledgements

The preparation of the paper was supported by the grants APVV-0160-07 „Advanced methods of modelling, control and design of mechatronic systems as lumped input and distributed parameter output systems“ and APVV-0131-10 „High-tech solutions for technological processes and mechatronic components as controlled distributed parameter systems“. Furthermore, the authors would like to thank the Slovak State Agency ASFEU for the support provided within the framework of projects ITMS-26240220072 „Center of Competence for intelligent technologies and informatization of systems and services“ and ITMS-26240220084 „University scientific park STU in Bratislava“.

7 References

HULKÓ, G. et al.: Modeling, Control and Design of Distributed Parameter Systems with Demonstrations in MATLAB. Publishing House of STU, Bratislava, pp. 265. 1998. ISBN80-227-1083-0.

HULKÓ, G. et al.: Distributed Parameter Systems Blockset for MATLAB & Simulink. DPS Blockset for MATLAB & Simulink. Bratislava – Natick, 2003-2013.

HULKÓ, G. et al.: Engineering Methods and Software Support for Modelling and Design of Discrete-time Control of Distributed Parameter Systems. In: European Journal of Control. ISSN 0947-3580. Vol. 15, Iss. 3-4 (2009), Fundamental Issues in Control, pp. 407-417. 2009.

HULKÓ, G., BELAVÝ, C., NOGA, K., ONDREJKOVIČ, K.: Control of Technological and Production Processes as Distributed Parameter Systems Supported by Virtual Software Environments. Publishing House of STU, Bratislava, pp. 283. 2015. ISBN 978-80-227-4289-4.

MODFLOW. USGS. Available on the internet: [cit. 2013-06-07] <http://water.usgs.gov/ogw/modflow/>

MT3DMS. The Hydrogeology Group, The University of Alabama. Available on the Internet: [cit. 2013-06-07] <http://hydro.geo.ua.edu/mt3d/>

SMITH, L.; WHEATCRAFT, S. J. Groundwater Flow. Vancouver, British Columbia, Canada. Canada : McGraw-Hill, Inc.

Mercer, J. W., Waddell, R. K., Contaminant Transport in Groundwater. Sterling, Virginia. Boulder, Colorado : GeoTrans,.Inc.

The Latest Trends in Industrial Robot End Effectors

Aktuálne trendy vo vývoji koncových efektorov priemyselných robotov

ÖHLSCHLÄGER Kamil¹ & ŠEMINSKÝ Jaroslav²

¹ Ing.  Mechanical Engineering Faculty, Technical University of Košice, Slovak Republic,
 kamil.ohlschlager@tuke.sk,  <http://www.sjf.tuke.sk/karagr/>

² doc. Ing., PhD.  jaroslav.seminsky@tuke.sk,  <http://www.sjf.tuke.sk/karagr/>

Abstract: *Industrial robots are important part of automated manufacturing systems today and fields of their using is continuously expanding. Most of them are designed as universal but modification to technology requires designing of specific end effectors. The role of robot end-of-arm tooling has never been more important. Just different types of effectors adapted to the requirements of the technology allow so extensive using of robotics. Application-specific grippers expand new industries and small-to-midsized businesses. New types of anthropomorphic or advanced end effectors find their way from labs to practice.*

Klíčová slova: *End robot effector, Gripper, End-of-arm tooling, Industrial robot tool*

1 Introduction

Nowadays the industrial robots and manipulators has become indispensable component of industrial automation in many areas over a relatively short period. [1] Direct interaction of industrial robots and manipulators with manipulated objects is realized by working heads - effectors as functionally separate output units of open kinematical structure.

Effectors of industrial robots, despite the advanced and well-conceived development, constitute a permanent critical material for the implementation of robotic technology devices and their users are therefore largely depend on their own efforts in design and implementation. [2-3]

2 Factors influencing the effectors

With regard to the immediate interaction with the object and system environment are effectors the most variable element of robotic technology. Long-term problem is their fully complying design with the requirements of applied areas and technical capabilities of components that are available

This knowledge, in relation to the potential practical requirements for possibilities of application effectors, gives scope for search methodological and technical tools supporting professionally specialized engineering training for the research & development and application of effectors. [4-9]

From analysis of the purpose effector resulting from handling tasks the effector solution results mainly from point of view of: shape and dimensional characteristics of manipulated object, its behaviour, the operating state of the surface, the nature and parameters of the contact surfaces and the relevant physical properties of the manipulated object.



Fig.1 Three fingers gripper head by Schunk [10]

From analysis of the purpose effector resulting from technological tasks solution results mainly from point of view of: mechanical, physical and topological nature of object of processing, weight, accuracy and stability of position, method and check of adjustment and frequency of object processing exchange.

From analysis of nature of the application environment (ambient interactive objects, direct cooperation, interaction) solution of effector results mainly from point of view of: workspace (position, shape, size, input), technological axis displacement (position, input function), interactive relationship, clamping systems (function block, grip and constriction / release the object manipulation), the nature of realized the technological process (technological tools, process parameters).

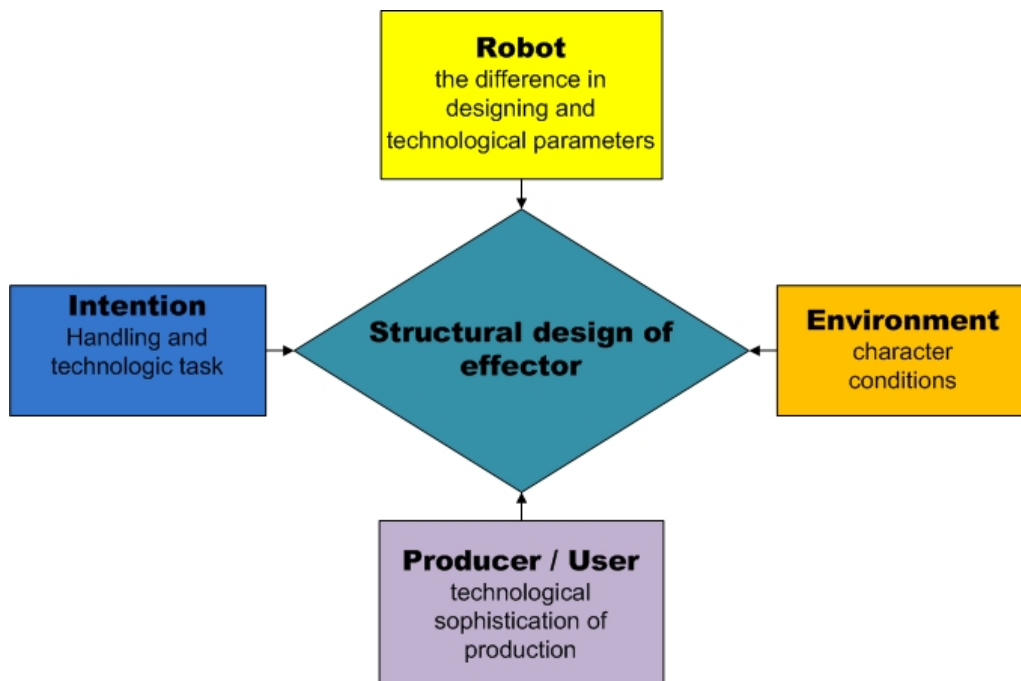


Fig.2 Factors affecting the structure of the effector

From analysis of the application conditions solution of effector results mainly from point of view of: load capacity, accuracy and stability of grip, gripping and releasing time, possible effector weight, sensor equipment of gripper (level of smart functions), setting and adjustability of effector, versatility and adaptability of effector.

From analysis of the structure of the robot results effector solution mainly from point of view of: technical parameters (load capacity, positioning accuracy, kinematical and dynamical characteristics ...), structural parameters (flange of mechanical connection, mechanical interface) and the connecting mechanism.

From analysis of the influences of the chosen manufacturer and conditions for users solution of effector results mainly from technological possibilities of production, guaranteeing prescribed service and maintenance activities, level of operation and maintenance, maintenance of operational capability.

Function and properties of effector have a prominent position at the overall concept of robotic systems. They are a limiting factor but also enriching factor for functional capabilities not only robots but for interactive environment too. Effectors work as interfaces with functional connection on an object manipulation, respectively objects processing technology, space technology production equipment, machinery and work areas and additional peripheral devices.

Effectors for manipulation are called gripper heads or grippers. They can be defined as a subsystem of an industrial robot, which maintains a limited number of geometrically specified products for some time, provides the position and orientation of the product to tools and other gripping system. In practice, use gripper consist of actuators (e.g. jaws, magnetic areas, etc..) and of the effector body itself. Shapes and types of actuators differ according to the nature of the gripping operation. Nowadays, the greatest versatility of these components is demanded to allow with one type and shape of the actuator to perform the greatest number of gripping operations.

Grippers body varying by different principles applied by grasping the object manipulation, it can include electric, hydraulic or pneumatic cylinders, equipment for the manufacture of vacuum, magnets and other devices. In the body of the effector are also holes and threads for connection to industrial robot gripper.

Decomposition of gripping heads by the method of gripping is in the Table 1.

Table 1: Physical principles of various types of grippers

| Method of grip | Type | Typical model |
|-------------------|-------------------|---|
| Contact | Pressing | Jaws (outer toes, fingers inside) Pliers (parallel, angular, radial) |
| | Hold | Granulate |
| Ingressive | Penetrating | Clamps, needles |
| | Not penetrating | Hook and loop |
| Attracting | Vacuum suction | Vacuum bowl |
| | Magnetic adhesion | Permanent magnet / electromagnet |
| | Electric adhesion | Electrostatic field |
| Adhesion | The thermal | Freezing, melting |
| | Chemical | |
| | Liquid | Capillarity, surface tension |

2.1 Contact gripper

In group of contact grippers are in practice most common finger tentacles. In most cases consist of two to four fingers, which tend to run synchronously.

The principle of these tentacles is based on Newtonian mechanics and the use of friction arising between object manipulation and jaws, which are due to its propulsion system, a kinematical mechanism in the body gripper pressed together the necessary force.

Passive tentacles - tentacles mechanisms that are not equipped with software control actuators are classified as liabilities. Given the level of confinement object snaps are divided into open and closed. Open Passive tentacles are used as actuating various hooks, blades, etc.. Closed tentacles used mobile actuators whose movement is controlled by means such as springs. Passive tentacles are less used in practice.

Active gripper - Unlike passive mechanical grippers contain the active head of at least one movable end action element driven software control Power Systems. Mechanical grippers finger usually consist of fingers, jaws and effector of the body itself. The shapes and dimensions of the jaws may vary according to the nature of the grip operation. Contact between object manipulation and jaw can be divided into:

- Contact force, which is a secure grip from caring only frictional forces arising due to thrust forces caused by the control system.
- Eye shape, which is formed in the jaws somewhat negative shape gripping parts into them as if they will fit and to establish its position relative to the jaws effector.
- The combination of the shape and power relations.

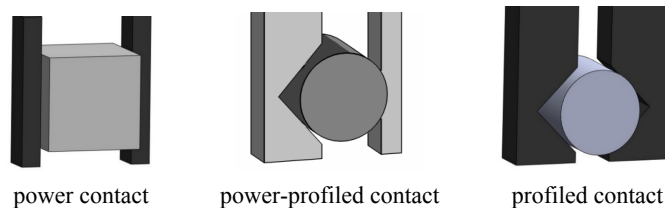


Fig. 3 Types of contact finger grippers

2.2 Ingressive gripper

Ingressive gripper is used for objects that have a fibrous structure such as textiles, carbon or glass fibers and similar materials. The principle is that the actuating gripper penetrates the surface of object manipulation in some depth. Ingressive grippers are subdivided into penetrating and not penetrating. The concept of invading includes all the principles for which the actuating shaped pins or needles can pass through the material object manipulation. The group also includes not penetrating grippers that not passing through into the material, but is it just a touch like scratchy. In Figure 4 schematically shows the possible design ingressive gripper used for grasping and separating layers of fabric.

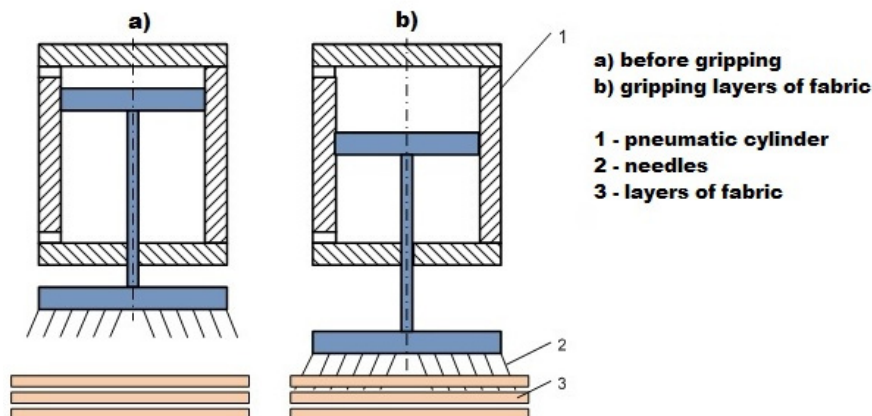


Fig.4 Gripping a separation layer of fabric

The term includes all attractive gripper effectors which parts are used to grab some effects of the force field. This field may be caused by the movement of air (Vacuum suction), magnetism or moving electrostatic charge. As the name suggests, astringent gripper have a constant gripping force without exerting pressure forces, so there is no damage to the surface due to the contact jaws or other elements. One of the oldest ways of grasping in this category is vacuum suction, which is often used in industry. In Figure 5 is a schematic representation of the principle of selection of manufacturing vacuum absorbing vacuum grippers by means of diaphragm and piston intake system.

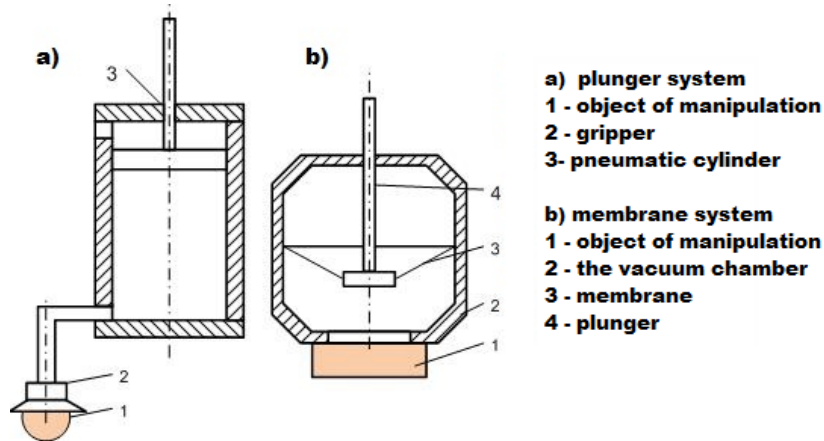


Fig. 5 Principle of suction (vacuum) gripper

2.3 Adhesive gripper

The surface of which must have direct contact with the surface of object manipulation that might have to grab is called adhesion. It includes principles such as chemical adhesion, or termoadhesion.

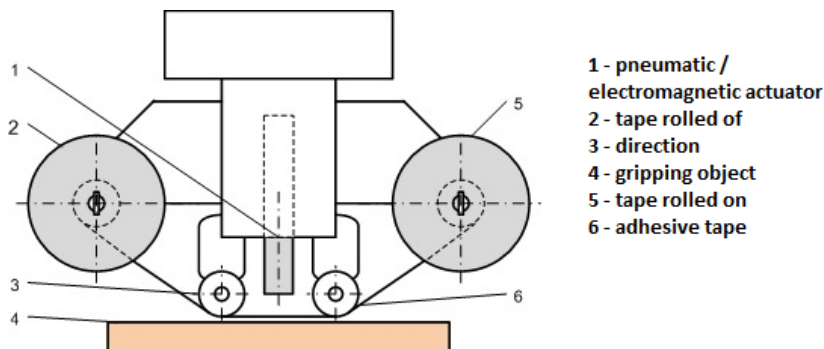


Fig. 6 Adhesive tape gripper

2.4 Universal grippers

Grasping and manipulation of objects are the key challenges in handling generally. Handling of objects with complicated shape still remains a problem. Most current approaches are based on the use wide-range or more articulated fingers or even inspired by bionics and attempting to copy the human hand, but this approach places high demands on the technical solution.

Example of more universal solution is PowerGripper inspired by a bird's beak is university project developed in collaboration Festo. This gripper has a very good force to weight ratio thanks to the lightweight construction, the extremely lightweight pneumatic muscles and the use of a titanium alloy as the material for the basic components. As a research project, the PowerGripper demonstrates numerous possibilities for the development

of new gripping systems. The lightweight yet very stable structure of the gripper means that the entire system behind it can also be lightweight and as a result operated with greater energy efficiency.



Fig. 7 Example of wide-range gripper (Universal Gripper Anchor, Honeybee Robotics) [11]

In figure 7 is example wide-range gripper that was designed mount onto the structural elements of the retired satellite's aperture (antenna) by the servicer to create a stable, secure platform for the satlet modules. The gripper named Universal Gripper Anchor provides several electromechanical mounts for a variety of modular satlets to dock and communicate.



Fig. 8 Example of adaptive multijoint gripper inspired by bionic (Robotiq) [12]

Solving complicated large number of controlled axes problematic drive solution and its management in particular, if the solution is caused by the need to handle fragile or compressible objects. From this perspective, it is an interesting approach of the universal gripper. Individual fingers are replaced by the volume of granular material, which, using a vacuum flows around the manipulated object and its shape adapts to the shape of the manipulated object. This method opens up new possibilities for designing simple but high shape-adaptive systems, which do not require sensory feedback and speed grip is comparable to conventional solutions manipulations grippers.

Individual fingers are replaced by the volume of granular material which, using a vacuum flows around the manipulated object and its shape adapts to the shape of the manipulated object. This method opens up new possibilities for designing simple but high shape-adaptive

systems, which do not require sensory feedback and speed grip is comparable to conventional solutions manipulations grippers.

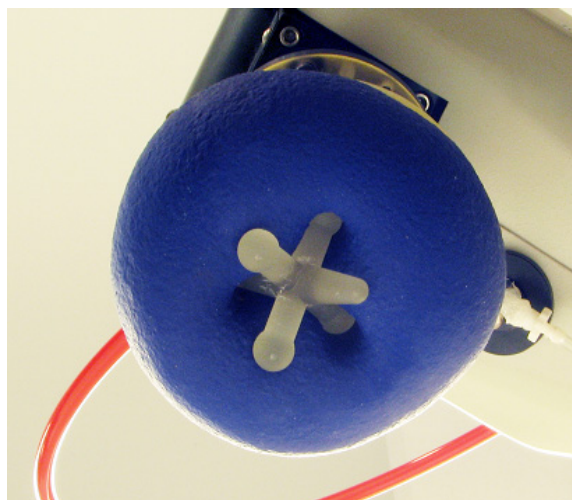


Fig. 9 Universal gripper on base of bulk material (Cornell Creative Machines Lab) [13]

3 Conclusion

Industrial robots make up an integral part of modern automated manufacturing systems today and fields of their application is continuously expanding from traditional manufacturing applications to non-traditional applicants in food industry, wood-processing industry and others. Industrial robots are designed as universal but modification by specific technology requires designing of specific end-effectors.

Although traditional robot technology applications have conventional robot gripper designs, innovation and development of new solutions gives space for growth industrial robot market in new applications. In respect of the great challenges of the future regarding automation, handling, robotics technology and gripper technology, combined with a reduction in costs and better or more innovative products, the future will produce many technical innovations in machinery by means of additive manufacturing and mechatronic engineering.

Acknowledgement

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



We are support research activities in Slovakia / Project is cofounded from sources of ES.


References

[1] JURIŠICA, L., HUBINSKÝ, P. & KARDOŠ, J.: Robotika, STU Bratislava 2005, Online: <<http://www.avir.sk/download/skripta.pdf>>

- [2] PALKO, A. & SMRČEK, J.: Robotika. Koncové efekторы pre priemyselné a servisné roboty. Navrhovanie – konštrukcia – riešenie. Edícia vedeckej a odbornej literatúry Sjf TU Košice, Košice, 2004, ISBN 80-8073-218-3
- [3] SMRČEK, J, & KÁRNÍK, L.: Robotika : servisné roboty, navrhovanie – konštrukcia - riešenia. Prešov : Vyd. Michala Vaška, - 2008. - 531 s. - ISBN 978-80-7165-713-2
- [4] KOVÁČ, J.: Efektorové jednotky montážnych a demontážnych robotov, Transfer inovácií, 2008 s. 27-31. Online: <<http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/12-2008/pdf/27-31.pdf>>
- [5] VAGAŠ, M., BALÁŽ, V., SEMJON, J. & SUKOP, M.: Návrh metodiky hodnotenia automatizovaných a robotických systémov. In: Transfer inovácií 23/2012, str. 41-43. Online: <<http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/23-2012/pdf/041-043.pdf>>
- [6] FLEKAL, L.: Koncové efekторы v prumyslové robotice. Brno 2009. Online: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15585>
- [7] SKAŘUPA, J.: Průmyslové roboty a manipulátory: učební text. Ostrava: VŠB- TU Ostrava, 2007. 260s . ISBN 978-80-248-1522-0
- [8] RUDY, V.: Techniky pre projektovanie výrobných systémov. In: Metodiky pre inovácie high-tech strojárskych produktov a výrobných systémov : vedecký zborník. - Košice : TU, 2012 S. 107-112. ISBN 978-80-553-1249-1
- [9] MARČAN, P., ROFÁR, J. & MIČIETA, B.: Aplikácia robotických co-workerov vo výrobných procesoch. Zborník ARTEP 2015. 11. 2. - 13. 2. 2015, STARÁ LESNÁ, SR, s.65/1-65/7 ISBN 978-80-553-1968-1
- [10] SCHUNK GmbH & Co. KG Spann- und Greiftechnik: Online: <<http://www.us.schunk.com/schunk/index.html?country=USA&lngCode=EN&lngCode2=EN&r=1>>
- [11] Honeybee Robotics Begins Developing Flight Systems for DARPA Phoenix On-Orbit Satellite Assembly and Servicing Program: Online: <<http://www.honeybeerobotics.com/darpa-phoenix-flight/>>
- [12] Cornell Creative Machines Lab: Online: <<http://creativemachines.cornell.edu/>>
- [13] Robotiq: Industrial Robotic Gripper Manufacturer. Online: <<http://robotiq.com/>>

Použití Kalmanova filtru pro měření otáček Use of Kalman Filter for Revolution Measurement

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 aplikací Kalmanova filtru na měření otáček hřídele vysokootáčkového motoru. NA Algoritmus Kalmanova filtru byl realizován v prostředí Matlab a aplikován na naměřená data ze zkušebního stavu.

Klíčová slova: Kalmanův filtr, motor, otáčky, simulace

1 Úvod

Úkolem Kalmanova filtru je odstranit chybu měření nějaké veličiny. Aby funkce filtru byla dokonalá, je třeba časový vývoj měřené veličiny modelovat. Na katedře ATR byla vypracována diplomová práce [4], ve které bylo předpokládáno, že se měří náhodná konstanta. Tento příspěvek řeší úlohu měření náhodné rampy, tj. lineární funkce času s náhodnou směrnicí.

Měření otáček je velmi častý úkol v nejrůznějších průmyslových aplikacích. Příkladem mohou být rychlosti otáčení motorů, ozubených kol, generátorů a jiných strojních zařízení. U měření bezkontaktními otáčkoměry vysílá snímač světelný paprsek, který se odráží od odrazky, která je umístěna na rotující součásti. Tyto pulzy jsou pak vyhodnoceny čítačem a přepočteny na otáčky. Avšak při měření může docházet ke zkreslení důsledkem nepřesnosti snímače a procesním šumům. Tímto se dostáváme k filtrům, které umožňují tuto nepřesnost zašuměného nepřesného signálu korigovat. Filtry rozeznáváme analogové nebo číslicové. Využitý Kalmanův filtr patří do dynamické filtrace. Jedná se o rekurzivní algoritmus. V tomto článku je tedy ověřena funkčnost algoritmu Kalmanova filtru na naměřených otáčkách vysokootáčkového motoru a výsledky jsou zde porovnány a zhodnoceny.

2 Kalmanův filtr

Kalmanův filtr je matematický aparát, který odstraňuje 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. Je tedy možné získat užitečnou složku signálu z naměřeného signálu ovlivněného aditivním šumem, který může být jak deterministický, tak stochastický [2], [3].

Aplikace Kalmanova filtru se snaží odhadnout stav x diskrétního procesu, který je popsán rovnicemi:

- Diferenční rovnice modelu procesu
$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{v}_1(k) \quad (1)$$

- Rovnice modelu měření
$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}_2(k) \quad (2)$$

kde \mathbf{A} stavový model přenosu systému ($n \times n$)

| | |
|----------------|---|
| \mathbf{B} | model řízení |
| \mathbf{H} | model pozorování (m x n) |
| \mathbf{x} | vektor stavových proměnných |
| \mathbf{y} | měřená veličina ovlivněná aditivním šumem |
| \mathbf{u} | vektor vstupů |
| \mathbf{v}_1 | vektor procesního šumu |
| \mathbf{v}_2 | vektor šumu měření |

Předpokládá se, že vektory \mathbf{v}_1 a \mathbf{v}_2 jsou na sobě nezávislé a pocházejí z normálního rozdělení pravděpodobnosti s nulovou střední hodnotou.

$$p(\mathbf{v}_1) \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{Q}(k)) \quad (3)$$

$$p(\mathbf{v}_2) \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{R}(k)) \quad (4)$$

kde \mathbf{Q} kovarianční matice
 \mathbf{R} kovarianční matice

Kovarianční matice \mathbf{Q} a \mathbf{R} jsou definovány pomocí korelační funkce:

$$E\{\mathbf{v}_1(n)\mathbf{v}_1^T(k)\} = \begin{cases} \mathbf{Q}(n), & n = k \\ \mathbf{0}, & n \neq k \end{cases} \quad (5)$$

$$E\{\mathbf{v}_2(n)\mathbf{v}_2^T(k)\} = \begin{cases} \mathbf{R}(n), & n = k \\ \mathbf{0}, & n \neq k \end{cases} \quad (6)$$

Vzájemná nezávislost je vyjádřena rovnicí:

$$E\{\mathbf{v}_1(n)\mathbf{v}_2^T(k)\} = \mathbf{0} \text{ pro všechna } n \text{ a } k \quad (7)$$

Samotná filtrace se skládá z predikce a korekce. Jak již tyto názvy napovídají, u predikce není nutné znát novou hodnotu. Vyhodnocení proběhne na základě naměřených dat. Když už je získán výsledek nového měření, pak se provede korekce. Fáze predikce se nazývá a priori a fáze korekce se nazývá a posteriori, viz [2], [3].

Fáze predikce:

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) = \mathbf{A}(k)\hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{P}(k-1|k-1)\mathbf{A}^T(k) + \mathbf{Q}(k) \quad (9)$$

Fáze korekce:

$$\tilde{\mathbf{y}}^-(k) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) \quad (10)$$

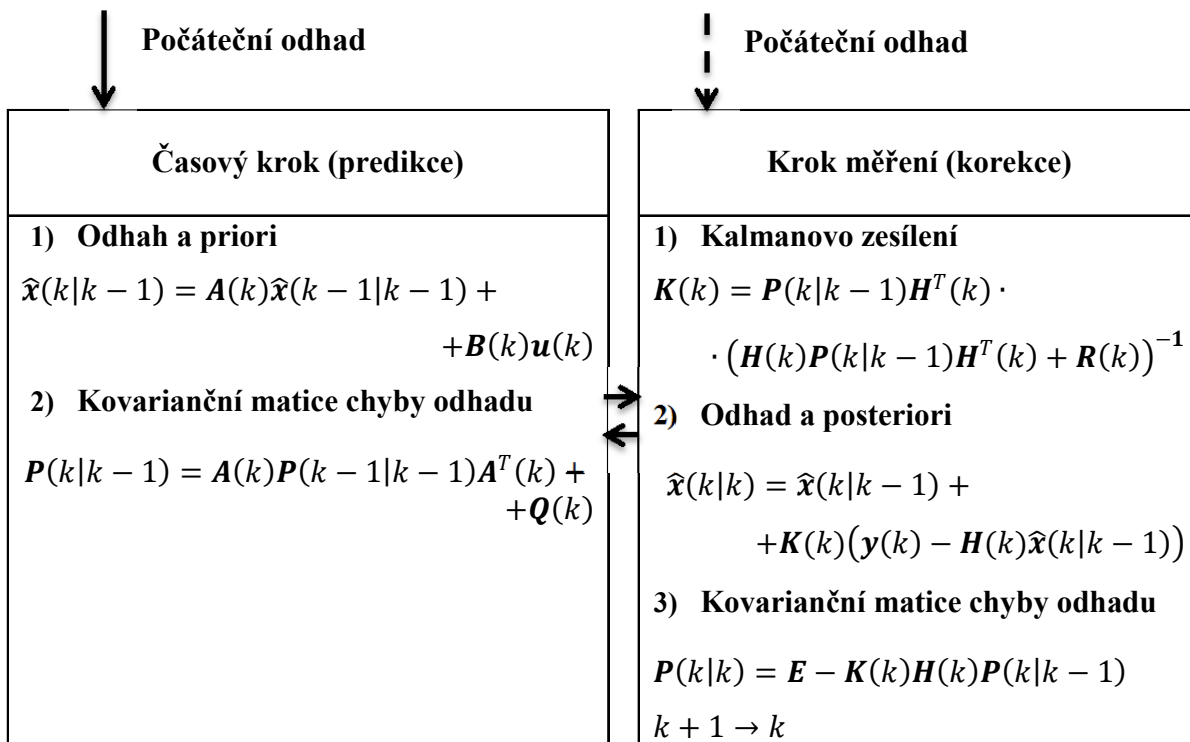
$$\mathbf{S}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k) \quad (11)$$

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k)\mathbf{S}^{-1}(k) \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k) = \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{K}(k)\tilde{\mathbf{y}}^-(k) \quad (13)$$

$$\mathbf{P}(k|k) = \mathbf{E} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k|k-1) \quad (14)$$

Rovnice (8) vyjadřuje predikci vektoru stavových proměnných (a priori) a rovnice (9) odhad matice kovariance (a priori). Ve fázi korekce vyjadřuje rovnice (10) vektor sledovaných odchylek (a posteriori), rovnice (11) odhad matice kovariance vektoru sledované odchylky (a posteriori), rovnice (12) slouží pro získání vektoru optimálního Kalmanova zesílení, (13) pro zpřesnění odhadu vektoru stavových proměnných a rovnice (14) vyjadřuje zpřesnění matice očekávané kovariance.

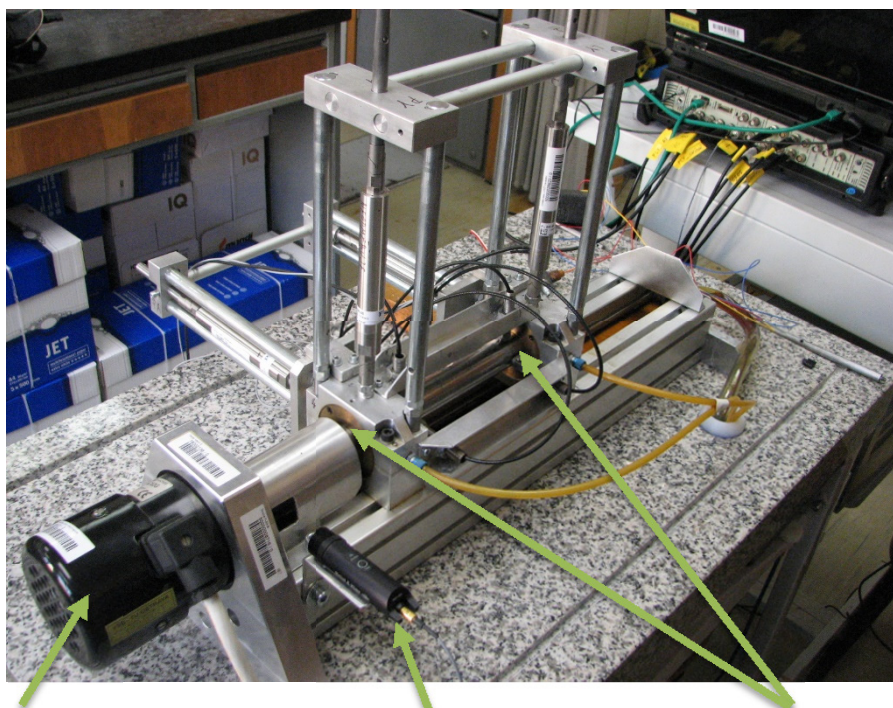


Obrázek 1 - Grafická interpretace algoritmu Kalmanova filtru

Ve fázi predikce se hledá optimální odhad stavového vektoru $\mathbf{x}(k)$ minimalizací MSE (mean square error) s použitím známých vzorků do vzorku $k-1$. V druhé fázi se odhad koriguje tím, že je známá hodnota aktuálního vzorku k .

2 Popis zkušebního stavu

Zkušební stav je složen z hřídele, která je uložena ve dvou kluzných radiálních ložiscích. Hřídele lze budit pomocí piezoaktuátorů. Motor, který hřídel pohání, je trojfázový asynchronní. Je napájen z frekvenčního měniče, 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.



Motor

Snímač otáček

Ložiska

Obrázek 2 - Zkušební stav

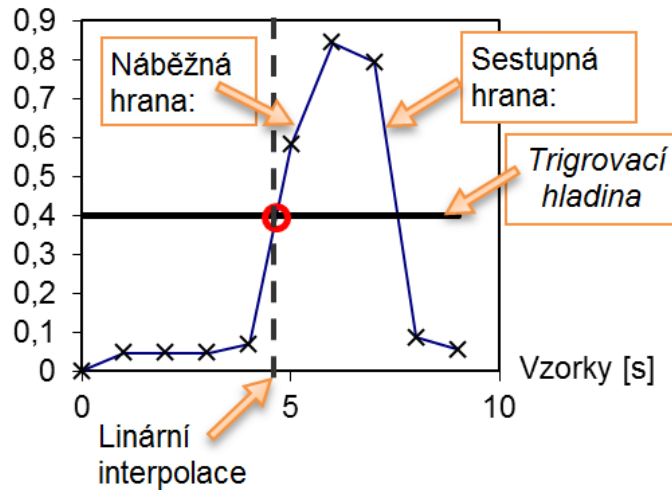
Předpokladem je, že budou otáčky regulovány na konstantní hodnotu nebo budou růst lineárně libovolnou rychlostí. Laserová sonda pro měření otáček dokáže s adaptérem pro vysoké rychlosti měřit až do 250 000 ot/min na vzdálenost 50mm až 2m.

3 Aplikace Kalmanova filtru na naměřená data

Naměřená data nárůstu otáček jsou získána při náběhu motoru až do přibližně 13 400 ot/min. Otáčky se měří z impulsů, které se vzorkují s vzorkovací frekvencí 8192 Hz. Jsou vypočteny na základě časových intervalů mezi impulsy.

$$RPM = \frac{1}{Vzorek(k) - Vzorek(k - 1)} \cdot f_{vz} \cdot 60 [ot/min] \quad (15)$$

Pro nejnižší otáčky máme skoro 2 tisíce impulsů a pro 14 tisíc otáček jen 37 impulsů. Určitým zpřesněním je interpolace hodnot mezi vzorky podle průseku spojnice mezi vzorky a trigovací hladiny.



Obrázek 3 - Využití lineární interpolace

Pro aplikaci Kalmanova filtru je nejprve zapotřebí definovat stavový vektor. První složkou vektoru je průměrná rychlost otáčení za časový přírůstek Δt_n . Další složkou je míra zvýšení nebo snížení rychlosti otáčení změnou otáček za sekundu.

$$\mathbf{x}_n = \begin{bmatrix} x_n \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

Míra zvýšení nebo snížení rychlosti otáčení stroje se mění náhodně v malém intervalu. Náhodné změny dané rychlosti jsou modelovány proměnnou u_n , která patří do normálního rozdělení pravděpodobnosti [1].

Rovnice modelu procesu a rovnice modelu měření pak vypadají takto:

$$\begin{aligned} x_n &= x_{n-1} + \dot{x}_{n-1}\Delta t_n + u_n\Delta t_n \\ \dot{x}_n &= \dot{x}_{n-1} + u_n \\ y_n &= x_n + v_{2,n} \end{aligned} \quad (17)$$

V maticovém zápisu:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_n &= \mathbf{A}\mathbf{x}_{n-1} + \mathbf{v}_{1,n} \\ y_n &= \mathbf{H}\mathbf{x}_n + v_{2,n} \end{aligned} \quad (18)$$

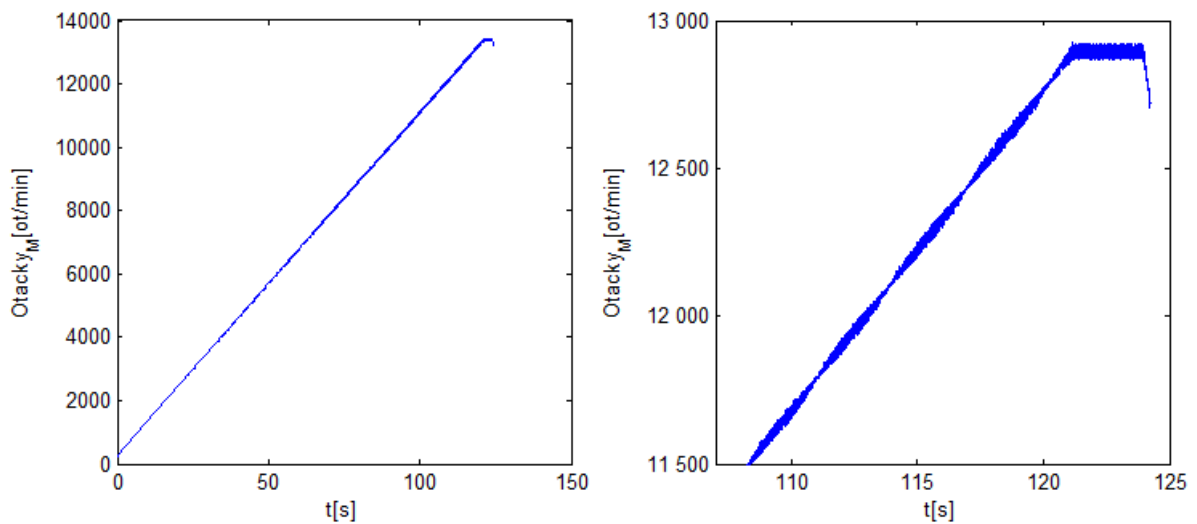
kde:

$$\mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t_n \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_n = \begin{bmatrix} \Delta t_n \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = [1 \quad 0], \quad \mathbf{v}_{1,n} = \mathbf{G}_n u_n$$

Předpokladem je, že šum $\mathbf{v}_{1,n}$ má normální rozdělení s nulovou střední hodnotou. Kovarianční matice \mathbf{Q}_n má tvar [1]:

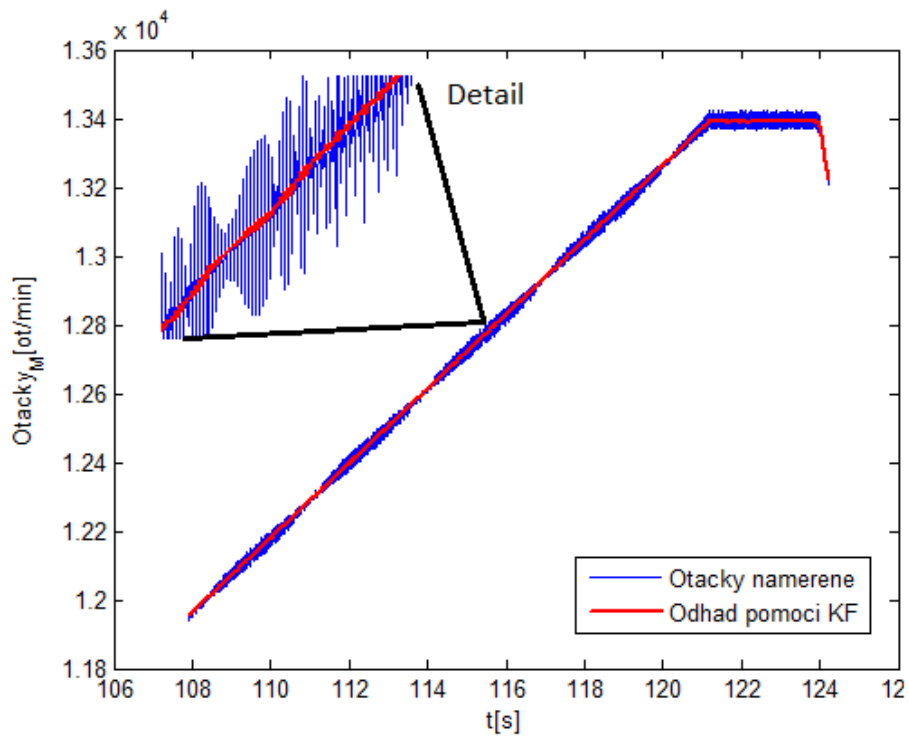
$$\mathbf{Q}_n = \begin{bmatrix} \Delta t_n^2 & \Delta t_n \\ \Delta t_n & 1 \end{bmatrix} \sigma_v^2 \quad (19)$$

Jak lze z rovnic poznat, parametry matic a vektorů budou v každém kroku upřesňovány. Nyní budou popsány výsledky algoritmu Kalmanova filtru na naměřených datech. Pro větší přehlednost jsou vykresleny jen data od 11 500 do 13 000 otáček za minutu.



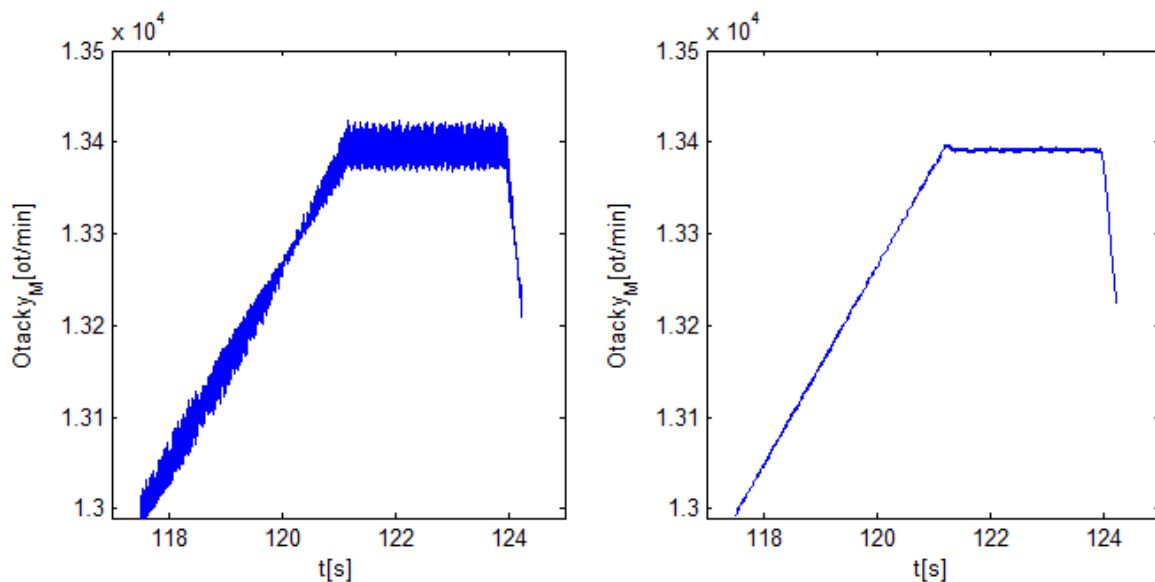
Obrázek 4 - Naměřená data (vlevo) a detail od 11 500 otáček (vpravo)

Po použití Kalmanova filtru je průběh velmi dobře vyhlazen.

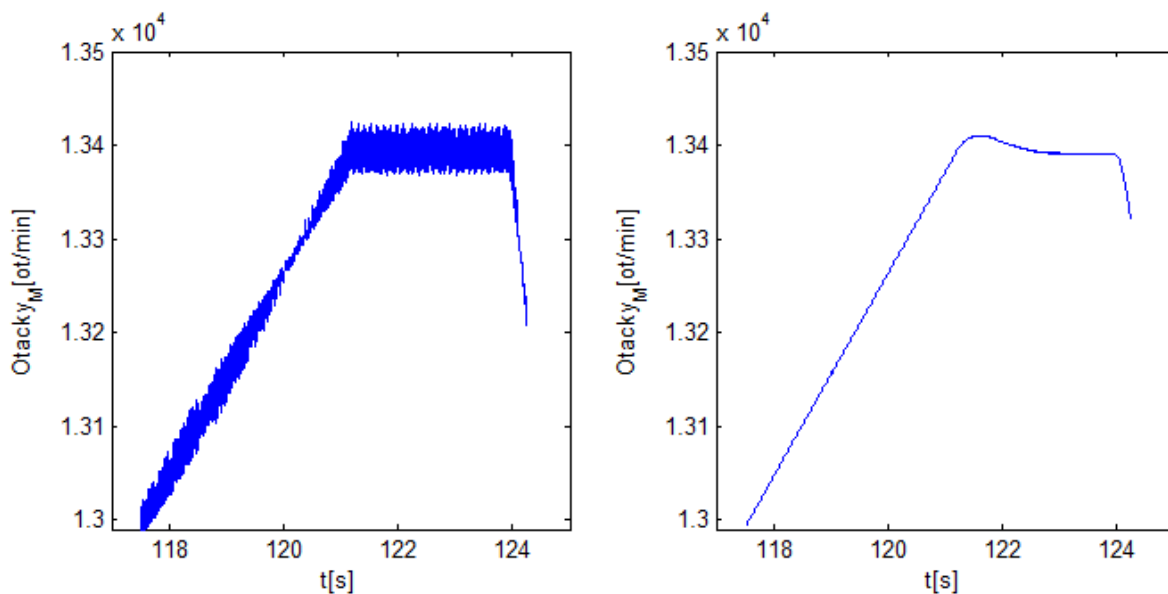


Obrázek 5 - Odhad hodnoty otáček pomocí Kalmanova filtru

Odchylka průběhu z Kalmanova filtru od naměřených dat je ovlivněna kovariančními maticemi \mathbf{R} a \mathbf{Q} . Matice \mathbf{R} v tomto případě není maticí ale skalární hodnotou. První průběh ukazuje porovnání naměřených a vyfiltrovaných otáček při hodnotách $\sigma_v^2 = 0,0001$ a $r = 0,0001$.

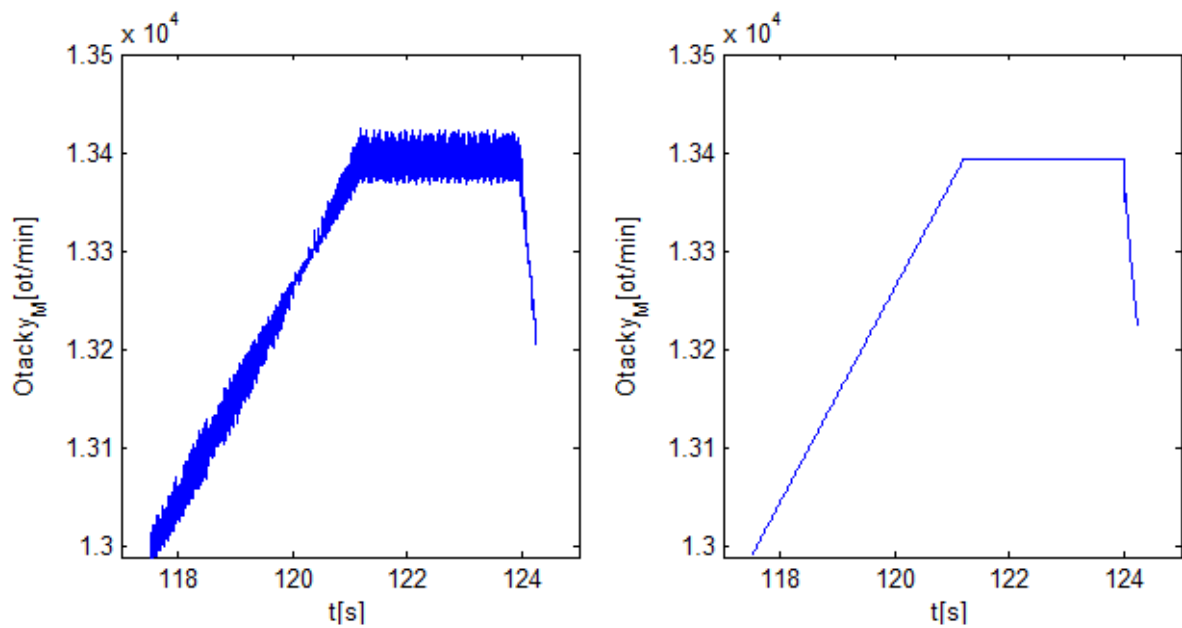


Obrázek 6 - Průběh otáček naměřených (vlevo) a výsledek z KF (vpravo), $r=0,0001$
Druhý průběh je při hodnotách $\sigma_v^2 = 0,0001$ a $r = 0,1$.



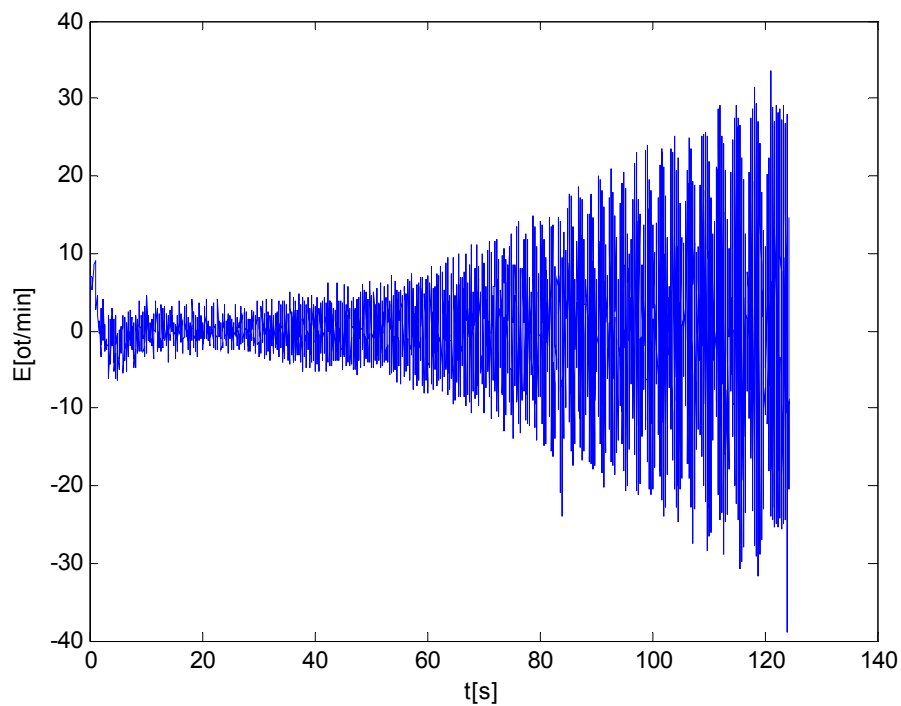
Obrázek 7 - Průběh otáček naměřených (vlevo) a výsledek z KF (vpravo), $r=0,1$

Předchozí průběhy odhadu otáček dokazují, že při použití daného algoritmu se při přechodu z lineární funkce ve tvaru rampy na konstantní hodnotu vyskytuje při určitém nastavení parametrů σ_v^2 a r vyskytuje překmit. Ten lze odstranit kombinací algoritmu pro lineární funkci s algoritmem pro náhodnou konstantu. To bylo realizováno přepnutím filtru z vnějšku, jelikož řídicí systém zkušebního stavu zadává změnu žádané hodnoty otáček.



Obrázek 8 – Výsledný průběh získaný kombinací algoritmů

Následně bude při těchto nastavených parametrech simulace vykreslena odchylka filtrovaného signálu od naměřených dat.



Obrázek 9 - Odchylka filtrovaného signálu od naměřených dat

Průběh dokazuje, že data jsou nejvíce ovlivněna aditivním šumem ve vysokých otáčkách, kde odchylka od naměřených dat dosahuje až 33 otáček za minutu.

4 Závěr

Příspěvek pojednává o využití Kalmanova filtru pro měření náběhu otáček motoru s funkcí ve tvaru rampy. Algoritmus Kalmanova filtru byl realizován v Matlabu a dostatečně vyfiltroval signál otáček ovlivněný aditivním šumem. Výsledek filtrace je ovlivněn nastavením parametrů r a σ_v^2 . Při nalezení optimálních parametrů byla vykreslena odchylka od naměřených hodnot, která potvrzuje, že nejvíce jsou data ovlivněna šumem na konci měření.

Jelikož byl filtr parametrizován na lineární funkci (rampu), tak filtrace konstantní hodnoty nebyla zcela přesná. Proto byly zkombinovány algoritmy pro konstantní hodnotu a lineární funkci. Výsledek pak byl mnohem přesnější. V budoucnu bude algoritmus místo v Matlabu realizován za použití digitálního signálového procesoru, který by spojením s danou úlohou umožňoval přesnou regulaci otáček.

5 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] WELCH, Greg a Gary BISHOP. *An Introduction to the Kalman Filter by Greg Welch and Gary Bishop*. Chapel Hill: SIGGRAPH, 2001.
- [4] VASILEV, Andrey. *Kalmanův filtr pro zpracování signálu a navigaci*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2013, Diplomová práce.

Simulácia fuzzy adaptívneho riadenia pneumatického aktuátora s umelými svalmi

Simulation of Fuzzy Adaptive Control of Pneumatic Actuator with Artificial Muscles

TÓTHOVÁ, Mária¹, VAGASKÁ, Alena², ŽIDEK, Kamil³ & MOUČKA, Michal⁴

¹ Ing., PhD., ✉ 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 PaedDr., PhD., 📧 alena.vagaska@tuke.sk

³ Ing., PhD., 📧 kamil.zidek@tuke.sk

⁴ Ing., PhD., ✉ Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojná, Katedra aplikované kybernetiky, Liberec, Česká republika, 📧 michal.moucka@tul.cz

Abstrakt: *Hlavným problémom využívania pneumatických pohonov s umelými svalmi ako pohonov manipulačných zariadení je, že riadenie takýchto pohonov je oveľa zložitejšie ako riadenie konvenčných pohonov špeciálne vzhľadom k nelineárnym vlastnostiam svalu a stlačiteľnosti média. V príspevku je prezentovaný fuzzy systém adaptívneho riadenia pneumatického aktuátora s referenčným modelom, ktorý používa multiplikatívny adaptačný signál PD regulátora v hlavnej vetve, ktorého signál je násobený signálom fuzzy regulátora z paralelnej vetvy. Tento riadiaci algoritmus by mal byť schopný riadiť dvojicu antagonisticky zapojených umelých svalov nezávisle na zmene parametrov vyplývajúcich z prevádzkových podmienok. Simulované priebehy systému boli získané z nelineárneho dynamického modelu aktuátora vytvoreného na báze pokročilého geometrického modelu svalu.*

Kľúčové slová: *pneumatický umelý sval, simulácia, fuzzy adaptívne riadenie*

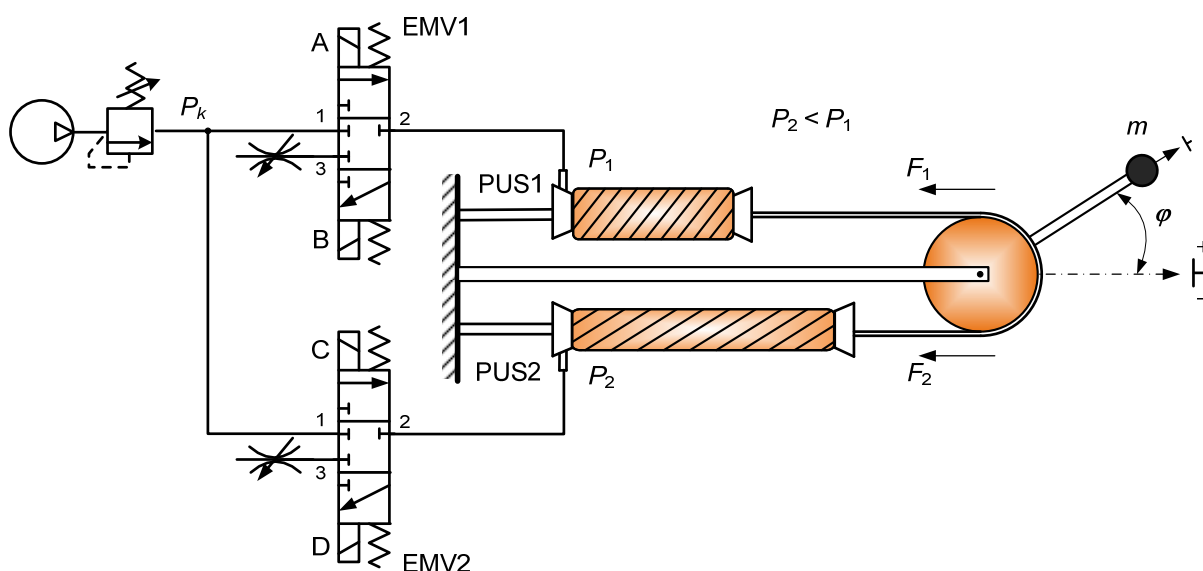
1 Úvod

Pri implementácii pneumatických umelých svalov (PUS) ako pohonov manipulačných zariadení je potrebné brať do úvahy nelineárny charakter tohto pohonu, ktorý má zásadný vplyv na riaditeľnosť celej sústavy. Nelinearita a hystéza vplyva na pohon tvorený PUS v závislosti od aktuálnej konštrukcie pohonu a od prevádzkových podmienok. Je teda potrebné vo väčšej miere využívať umelú inteligenciu pri riadení takýchto nelineárnym systémom. Pri návrhu riadiaceho algoritmu je potrebné brať do úvahy robustnosť celého systému, na ktorý vplyvajú chyby vzniknuté pri modelovaní systému rovnako, ako aj zmeny parametrov. Chyby vzniknuté pri modelovaní vyplývajú zo zjednodušenia modelu sústavy PUS kvôli zložitosti procesov, ktoré prebiehajú v takejto sústave. Zmeny parametrov sa prejavujú pri praktickej realizácii, kde treba brať do úvahy hlavne zmeny v momente zotrvačnosti. Rôzne využitia umelej inteligencie pri návrhu riadiacich algoritmov boli opísané v [Hošovský, 2009], [Wang, 2011]. Ako bolo konštatované v [Piteľ, 2008], konvenčné lineárne regulátory sú nepostačujúce na riadenie sústavy antagonisticky zapojených PUS v celom pracovnom rozsahu. Preto bol navrhnutý adaptívny riadiaci algoritmus, ktorý by bol schopný kompenzovať zmeny parametrov závislých na prevádzkových podmienkach (zmena momentu zotrvačnosti závisí od externého zaťaženia sústavy PUS). Navrhnutý riadiaci algoritmus slúži ako základ polohovacieho systému s rýchlymi zmenami stavu v referenčných pozíciách.

2 Pneumatický aktuátor s umelými svalmi

Riadenie uhlovej výchylky ramena pneumatického aktuátora s dvojicou umelých svalov si vyžaduje zvyšovanie tlaku v jednom umelom svale a súčasne znižovanie tlaku vo svale druhom. Pri takejto úvahe riadenia uhlovej výchylky ramena sú obidva svaly v tejto sústave aktívne a vyžadujú si súčasné riadenie veľkosti tlaku vstupujúceho média do jednotlivých PUS. Tento princíp je náročný na riadenie, pretože v každom časovom okamihu je potrebné udržať rovnosť síl (F_1 , F_2), ktoré vyvíjajú jednotlivé svaly. Pri porušení tejto rovnováhy dochádza k nerovnomernému a trhavému pohybu ramena k požadovanej polohe. Taktiež sa pri každej zmene tlaku vo svaloch mení aj tuhosť celého systému a aktuátor nemusí mať v požadovanej polohe maximálnu tuhosť.

Výrazné zjednodušenie riadenia takejto sústavy (Obrázok 1) spočíva v riadení iba jedného PUS jedným elektromagnetickým ventilom (EMV), pričom druhý sval v antagonistickom zapojení plní funkciu pasívnej pružiny [Piteľ, 2007]. Pri takomto princípe riadenia bude mať takáto sústava maximálne možnú tuhosť v každej uhlovej výchylke φ ramena aktuátora. Požadovanú uhlovú výchylku ramena dosiahneme znižovaním tlaku (P) iba v jednom svale pre jednu polovicu dráhy (buď kladnú alebo zápornú). Pre druhú polovicu dráhy dochádza k zámene funkcií medzi pneumatickými umelými svalmi.



Obrázok 1 – Principiálna schéma pneumatického aktuátora s umelými svalmi

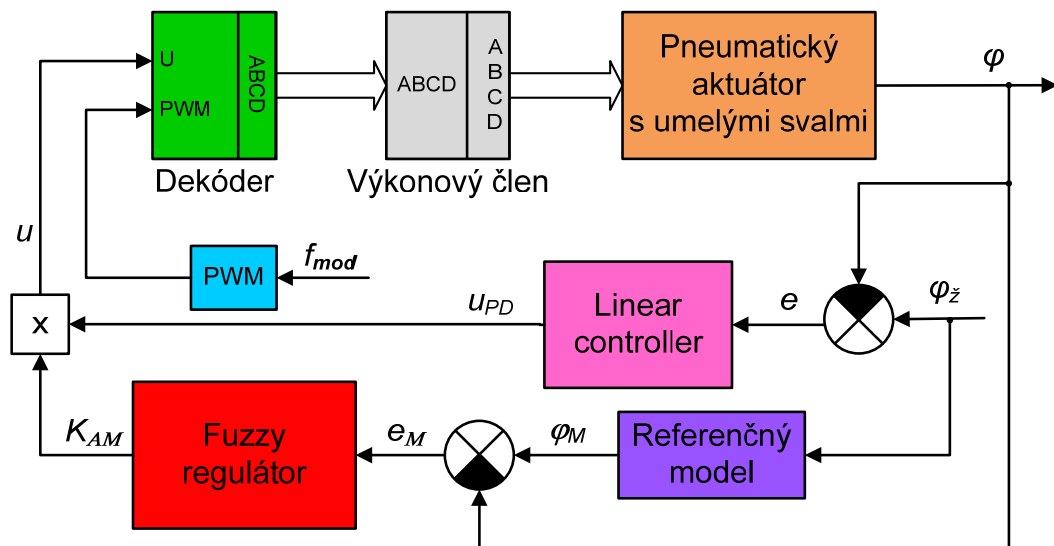
3 Návrh regulátora s adaptívnym algoritmom

Základná schéma riadiaceho algoritmu s PD regulátorom v hlavnej vetve a fuzzy regulátorom v paralelnej vetve je znázornená na Obrázku 2.

Tento systém riadenia využíva násobenie dvoch signálov, a to signálu u_{PD} z PD regulátora a signálu K_{AM} z fuzzy regulátora. Tým vznikne zosilnený akčný signál u , ktorý následne ovláda polohovací systém na báze PUS, čo zabezpečuje rýchle odozvy riadeného systému vďaka adaptačnému zosilneniu [Hošovský, 2012]. Okrem minimalizovania regulačnej odchýlky polohy e slúži referenčný model na udržanie reakcie dynamiky systému (odchýlka v dynamike je vyjadrená $e_M = \varphi_M - \varphi$).

Pri návrhu tohto algoritmu je nutné zohľadniť [Havran, 2012]:

- návrh vhodného referenčného modelu,
- zosilnenie PD regulátora,
- návrh fuzzy regulátora.



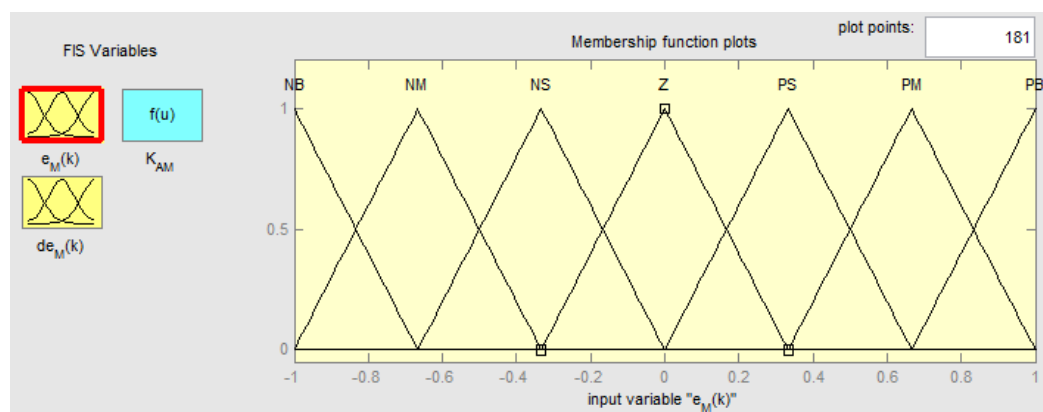
Obrázok 2 – Adaptívne riadenie s referenčným modelom a fuzzy regulátorom

Pre modelovanie pneumatického aktuátora s umelými svalmi boli použité poznatky o modelovaní antagonistického aktuátora s PUS [Pitel', 2014] a pre modelovanie jednotlivých svalov bol použitý pokročilý geometrický model svalu [Tóthová, 2013].

Tvarovač signálu tvorí základnú časť pre premenu veličiny z výstupu regulátora do vhodnej formy pre ovládanie ventilov. Keďže v sústave sa nachádzajú jednoduché uzatváracie ventily, je potrebné pre zabezpečenie plynulosti pohybu previesť signál zodpovedajúci spojitému signálu na poradie impulzov s konštantnou výškou (logická jednotka), ale premennou šírkou. Táto šírka zodpovedá dobe otvorenia, resp. uzatvorenia ventilu a je závislá od hodnoty veličiny, ktorá vystupuje z regulátora. V sústave sa teda využíva riadenie pomocou PWM (šírkovo modulovaných impulzov).

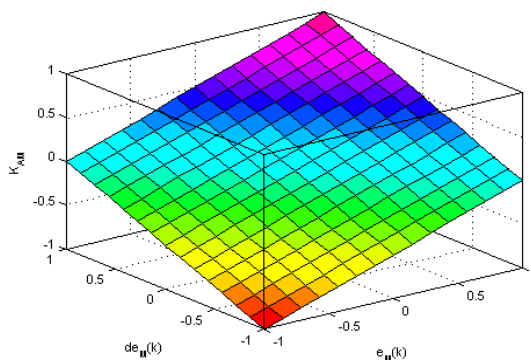
4 Návrh fuzzy regulátora v paralelnej vetve

Fuzzy regulátor typu Sugeno je typu DISO (dva vstupy, jeden výstup) s trojuholníkovou funkciou príslušnosti (*trimf*). Tieto funkcie príslušnosti sú rovnaké pre oba vstupujúce signály do fuzzy regulátora, a to pre dynamickú chybu e_M a diskretnú deriváciu dynamickej chyby Δe_M [Havran, 2012]. Jadro fuzzy regulátora tvorí sedem funkcií príslušnosti, ktoré sa prekrývajú cez príslušné univerzum (pracovný interval): NB - negative big, NM - negative medium, NS - negative small, Z - zero, PS - positive small, PM - positive medium, PB - positive big (Obrázok 3). Výstup z fuzzy regulátora tvorili číselné hodnoty pre jednotlivé kombinácie dynamickej chyby e_M a diskretné derivácie dynamickej chyby Δe_M . Vstupné a výstupné premenné boli normalizované na pracovnom intervale v rozsahu $\langle -1;1 \rangle$.



Obrázok 3 – Rozloženie funkcií príslušnosti *trimf*

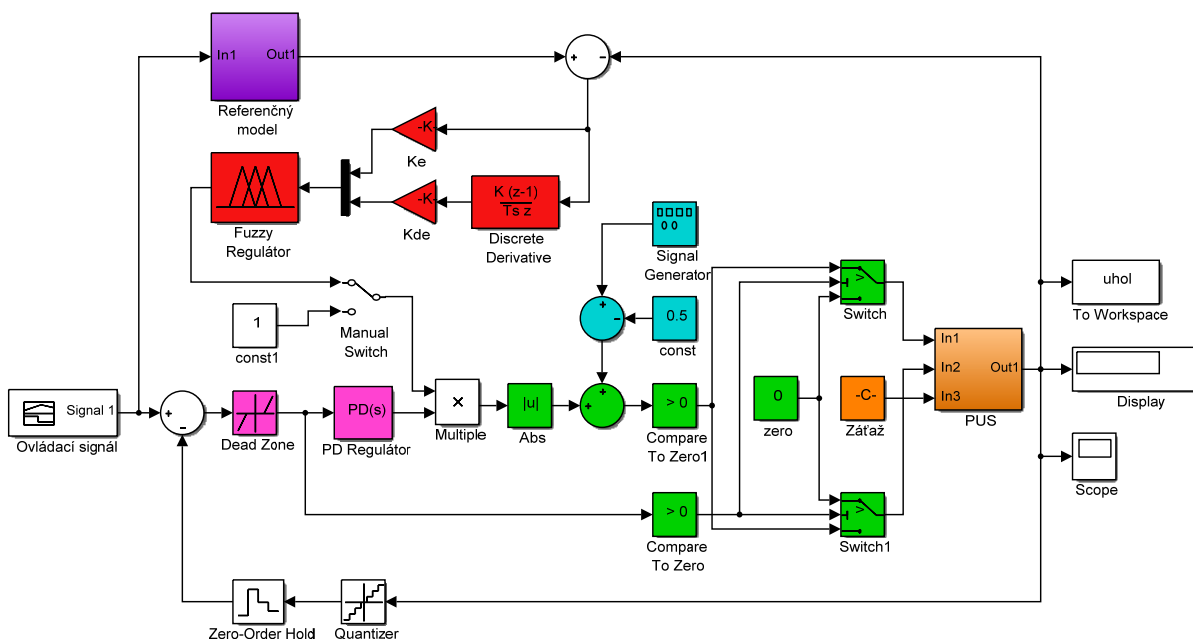
Výsledná fuzzy plocha regulátora vyplývajúca z pravidiel fuzzy systému má lineárny charakter a je zobrazená na Obrázku 4, kde na osi x sa nachádza dynamická chyba systému, na osi y sú vynesené hodnoty diskrétny derivácie dynamickej chyby a os z znázorňuje výstup z fuzzy regulátora vo forme signálu K_{AM} .



Obrázok 4 – Výsledná fuzzy plocha regulátora typu Sugeno

5 Simulačný model riadenia pneumatického aktuátora s umelými svalmi a výsledky simulácie

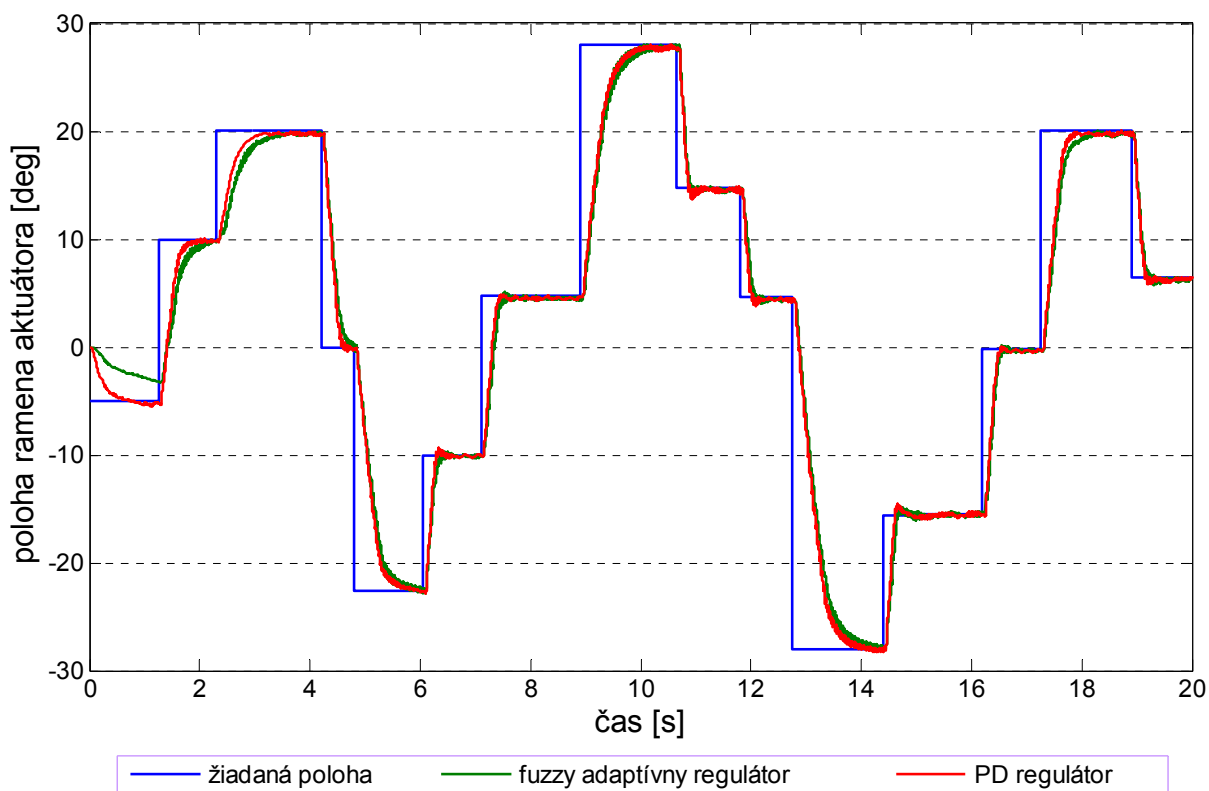
Na Obrázku 5 je zobrazená simulačná schéma adaptívneho riadenia pneumatického aktuátora s dvojicou umelých svalov vytvorená v programovom prostredí Matlab/Simulink určená pre simuláciu riadenia uhlovej výchylky ramena aktuátora. Riadiacu časť tvorí namodelovaný PD regulátor, ktorého signál je násobený signálom z regulátora z paralelnej vetvy s referenčným modelom. Signál vystupujúci z tohto regulátora ovláda ventily pre príslušný sval pomocou šírko modulovaných impulzov (PWM).



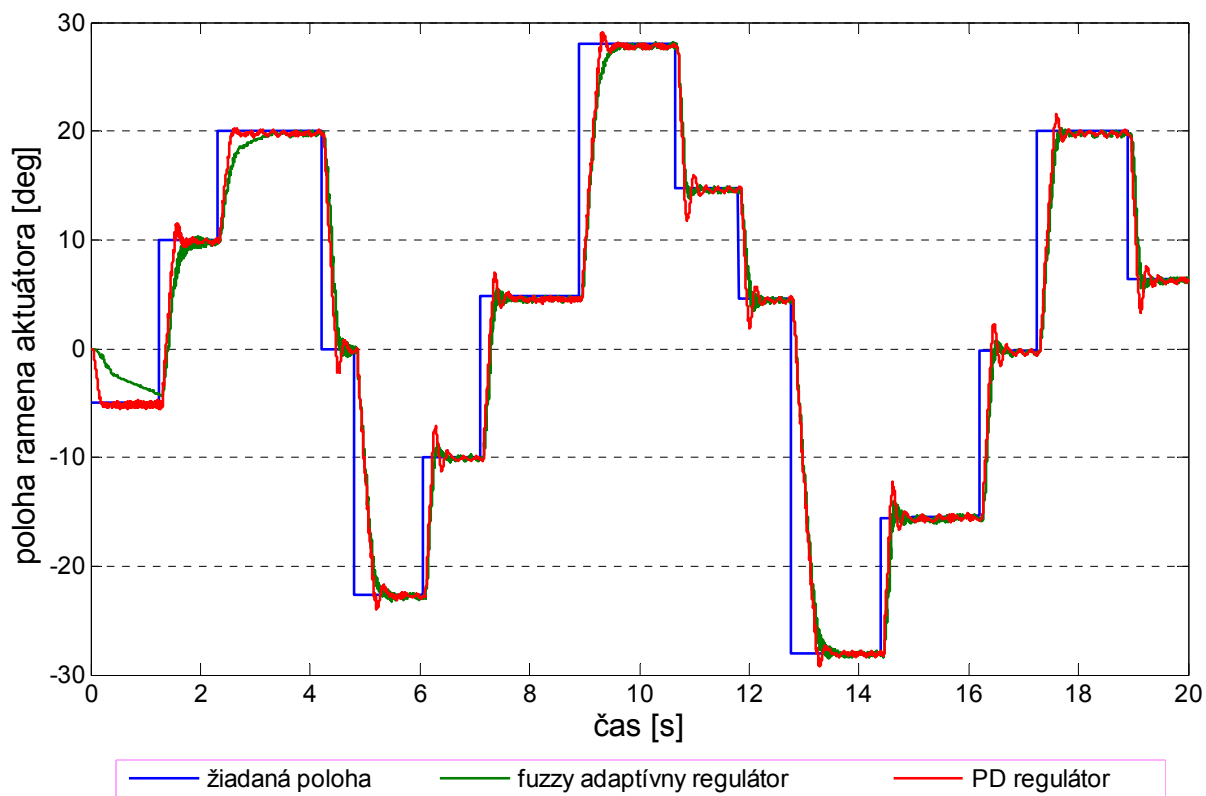
Obrázok 5 – Simulačná schéma adaptívneho riadenia pneumatického aktuátora s dvojicou umelých svalov

Simulačný model v paralelnej vetve obsahuje blok s názvom „Fuzzy Logic“, do ktorého bol z pracovného prostredia (*workspace*) importovaný navrhnutý fuzzy regulátor typu Sugeno. Hodnota zosilnenia dynamickej chyby K_e bola 0,0057 a pre zosilnenie diskrétny derivácie dynamickej chyby $K_{\Delta e}$ bola 0,027 [Hošovský, 2012]. Zosilnenia pre PD regulátor boli nastavené na hodnoty $K_P = 0,25$ a $K_D = 0,0001$. Referenčný signál sa menil v intervale $\langle -28^\circ; +28^\circ \rangle$ a dĺžka simulácie bola 20 s, počas ktorej muselo rameno aktuátora dosiahnuť 15 žiadaných polôh.

Výsledky simulácie modelu fuzzy adaptívneho riadenia pneumatického aktuátora s umelými svalmi uvedeného na Obrázku 5 sú zobrazené na Obrázku 6 a Obrázku 7.



Obrázok 6 – Simulované priebehy bez zaťaženia ramena aktuátora



Obrázok 7 – Simulované priebehy so záťažou o veľkosti 3,44 kg upevnenou na konci ramena aktuátora

6 Záver

V príspevku boli vykonané simulácie riadenia pneumatického aktuátora s umelými svalmi bez zaťaženia a so záťažou o veľkosti 3,44 kg upevnenou na konci ramena aktuátora použitím fuzzy adaptívneho regulátora a iba PD regulátora. So zvýšenou záťažou na konci ramena sa objavujú oscilácie okolo žiadanej polohy pri riadení iba PD regulátorom, čo je neprijateľné z hľadiska praktického využitia manipulačného zariadenia poháňaného takýmto aktuátorom. Použitie adaptívneho riadenia s relatívne jednoduchým fuzzy regulátorom typu Sugeno nultého rádu s trojuholníkovými funkciami príslušnosti tieto nežiaduce oscilácie potlačuje. Na výslednú presnosť regulácie má vplyv aj dynamika referenčného modelu, ktorého trajektóriu sa snaží fuzzy regulátor sledovať.

V ďalšej práci je možné testovať pre riadenie fuzzy regulátor typu Mamdami v paralelnej vetve riadiaceho fuzzy adaptívneho systému, pričom je možné zvoliť aj iný typ funkcie príslušnosti. Optimalizovať fuzzy regulátor môžeme aj využitím ďalších optimalizačných metód nachádzajúcich sa vo forme toolboxov v programovom prostredí Matlab, a to napr. genetickými algoritmami, simulovaným žíhaním atď.

Príspevok bol spracovaný s podporou projektu APVV, názov projektu „Modelovanie a simulácia elektropneumatických mechatronických sústav na báze umelých svalov“, evidenčné číslo projektu SK-CZ-2013-0138.

7 Použitá literatúra

HAVRAN, M. *Počítačová podpora riadenia nekonvenčného pohonu manipulačného zariadenia*. Dizertačná práca, Prešov: TUKE FVT v PO, 2012. 136 s.

HOŠOVSKÝ, A. Fuzzy adaptive controller for one-DOF PAM-based actuator with reference model. *Applied Science in Thermodynamics and Fluid Mechanics*, Vol. 3, No. 2, 2009. p.1-7, ISSN 1802-9388.

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

PITEĽ, J. *Automatizácia výrobných technológií využitím manipulačných zariadení poháňaných umelými svalmi*. Habilitačná práca, Prešov: TUKE FVT v PO, 2008. 99 s.

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

PITEĽ, J., 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)*, 17.-18.1 2015, Paris, China : Bosi Edu, 2015. pp. 1-5.

PITEĽ, J., TÓTHOVÁ, M. Dynamics of pneumatic muscle actuator: measurement and modeling. In: *Proceedings of the 15th International Carpathian Control Conference (ICCC 2014)*, Velké Karlovice, 28.–30.05.2014. Danvers: IEEE, 2014. pp. 432-436, ISBN 978-1-4799-3527-7.

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

WANG, Y. et al. Study od Smooth and Accurate Position Controls of Pneumatic Artificial Muscle Actuators for Robotic Arms. *Advanced Materials Research*, Vol. 317-319, 2011. pp. 799-806.

Analysing Alarm and Event Data From a Process and Control System

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 paper describes the project work and engineering done on the marine automation control system and its integration with energy and safety control systems. The significance of integrating process control systems with automation control systems into one integrated control and safety system is described. The project work is based on state-of-the art technology and corresponding standards, the engineering part of the work is analysing data from a safety control system, which is integrated to the marine technology control. The conclusions summarize the project and engineering experience and knowledge and lead to the recommendations for the design of the operator workstations.*

Keywords: *system integration, marine technology, control, alarm, event*

1 Introduction - the significance of integration of process and power control systems

Traditionally, the systems that serve process automation and power automation within the same plant are separate and much of today's substation automation communication is still hard-wired. Most of the serial communication protocols are incompatible with each other. Due to extensive cabling and a large number of available protocols, the bandwidth and cost efficiency of this approach is very limited, and could result in solutions having to be implemented on a project-by-project or even device-by-device basis. Furthermore, multiple systems means multiple databases, additional engineering tools, different operator stations, and more system administration and maintenance.

At the present time, the significance of integration is not only a matter of saving costs, but also equipment integrity, availability and overall safety. Integrated are both the electric power and the automation control systems enabling:

- single operator environment with personalized workplaces for a timely response to abnormal conditions, to consolidated alarms and events for Integrated Control and Safety System (ICSS),
- single screen access from the operator workstation to all electric power information simplifying daily operations, emergency shut-downs, post-incident analysis and root cause identification.

Traditional process and power control systems do not offer built-in support for proprietary communication protocols and data models, as can be seen in Figure 1.

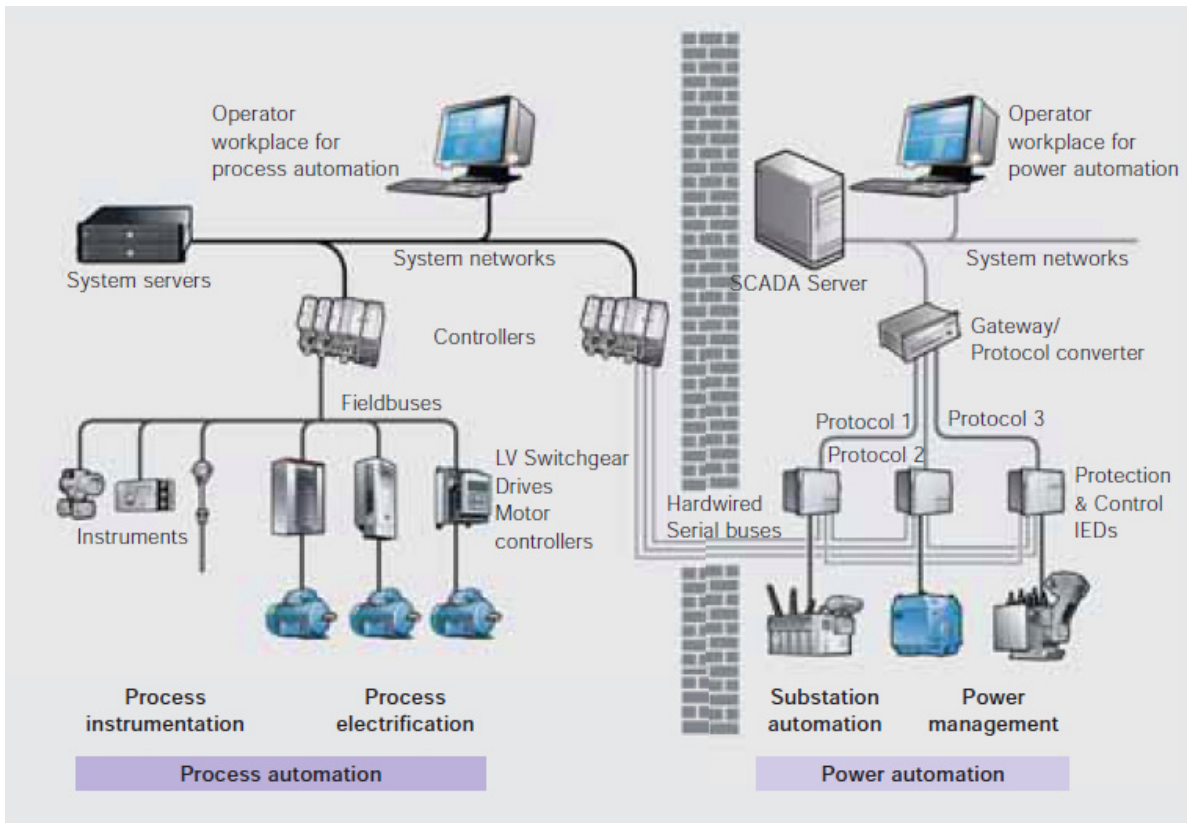


Figure 1 – Process and power control systems using different communication protocols

New communication technology based on standards, such as IEC61850, ensures very fast communication between the power and process control systems and provides diagnostic information across the integrated devices.

The IEC 61850 standard was introduced as a global standard to meet the needs of the substation automation community for interoperability between devices, an open and flexible architecture, and a future-proof solution based on state-of-the-art communication technology.

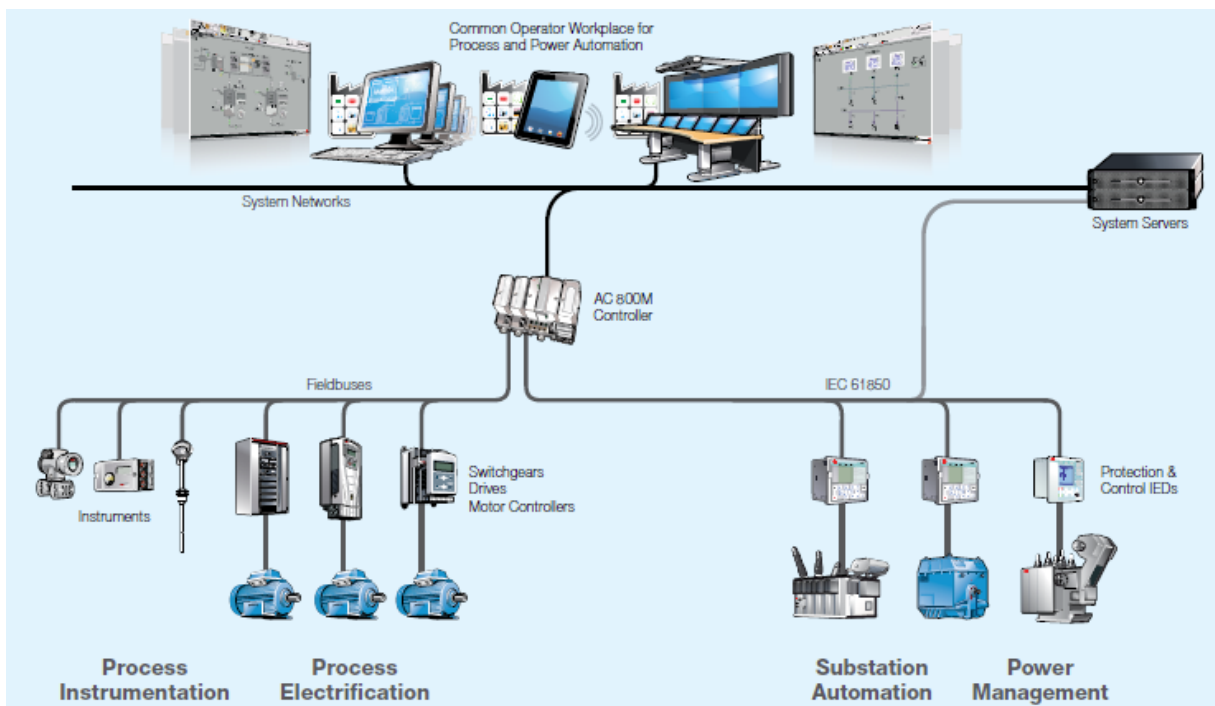


Figure 2 – The scheme of process and power control system integration with IEC 61850

IEC 61850 uses MMS (Manufacturing Message Specification) communication technology over Ethernet. This standard specifies two main types of communication:

- Vertical communication between the control system and the IEDs (Intelligent Electronic Devices), which utilizes the full MMS (Manufacturing Message Specification) stack and is intended for the vast amount of data shared between the control system and the IEDs. Via an OPC interface the automation system has direct access to all IED data such as current and voltage measurements, status, interlocking, time-stamped alarms and events. The system can also send open and close commands to IEDs. Logical nodes (LNs) of IEDs are modelled as objects in the automation system, and therefore all system features, such as freely configurable graphics, faceplates, alarms and event lists, and historian capabilities are available for IED data,
- Horizontal communication from IED to IED, using the special GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events) messaging, is intended for high-priority data to be shared between the IEDs, replacing the traditionally hard-wired signals and is directly connecting them to the controller on the same network in real time.

One of the most significant differences of the IEC 61850 standard from other communication standards is the introduction of the substation configuration language (SCL) [Kirman, 2012]. SCL makes it possible to create files that are used for the exchange of configuration data (eg, standardized object models and data flow configurations of devices in a system) between engineering tools. The content of different file types defined in IEC 61850 depends on the role of a specific tool – a system configuration tool or a device configuration tool - that it is created for, and the different evolution phases of the system integration process.

```
<?xml version="1.0"?>
<SCL xmlns:sxy="http://www.iec.ch/61850/sclcoordinates001" xmlns="http://www.iec.ch/61850/2003/SCL">
  <Header id="svc" toolID="SSI-Tool" nameStructure="IEDName" />
  <Substation name="AA1" desc="Substation">
    <VoltageLevel name="A1" desc="Voltage Level">
      <Bay name="A01" desc="Bay" sxy:dir="horizontal">
        <LNNode iedName="AA1TH1" ldInst="LD0" lnClass="LPHD" lnInst="1" />
        <LNNode iedName="AA1TH1" ldInst="LD0" lnClass="ITCI" lnInst="1" />
        <LNNode iedName="AA1TH1" ldInst="LD0" lnClass="LLN0" lnInst="" />
      </Bay>
    </VoltageLevel>
    <VoltageLevel name="C1" desc="Voltage Level">
      <Voltage multiplier="k" unit="V">380</Voltage>
    </VoltageLevel>
    <VoltageLevel name="H1" desc="Voltage Level">
      <Voltage multiplier="k" unit="V">33</Voltage>
      <Bay name="Q03" desc="Trafo LV" sxy:x="54" sxy:y="33" sxy:dir="vertical">
        <ConductingEquipment name="QA1" desc="Circuit Breaker" type="CBR" sxy:x="7" sxy:y="8" sxy:dir="vertical">
          <Terminal connectivityNode="AA1/H1/Q03/N1" substationName="AA1" voltageLevelName="H1" bayName="Q03" cNodeName="N1" />
          <Terminal connectivityNode="AA1/H1/Q03/N5" substationName="AA1" voltageLevelName="H1" bayName="Q03" cNodeName="N5" />
        </ConductingEquipment>
        <ConductingEquipment name="BU1" desc="Voltage Transformer 2 Sec. 3 Phase" type="VTR" sxy:x="4" sxy:y="24">
          <Terminal connectivityNode="AA1/H1/Q03/N6" substationName="AA1" voltageLevelName="H1" bayName="Q03" cNodeName="N6" />
        </ConductingEquipment>
        <ConductingEquipment name="TrafoLV" desc="Line In/Out" type="IFL" sxy:x="7" sxy:y="26" sxy:dir="vertical">
          <Terminal connectivityNode="AA1/H1/Q03/N6" substationName="AA1" voltageLevelName="H1" bayName="Q03" cNodeName="N6" />
        </ConductingEquipment>
        <ConductingEquipment name="BI1.2" desc="Current Transformer" type="CTR" sxy:x="7" sxy:y="12" sxy:dir="vertical">
          <Terminal connectivityNode="AA1/H1/Q03/N3" substationName="AA1" voltageLevelName="H1" bayName="Q03" cNodeName="N3" />
          <Terminal connectivityNode="AA1/H1/Q03/N4" substationName="AA1" voltageLevelName="H1" bayName="Q03" cNodeName="N4" />
        </ConductingEquipment>
      </Bay>
    </VoltageLevel>
  </Substation>
</SCL>
```

Figure 3 –The Single Line Diagram type of file in SCL

To engineer IEC 61850 integration, the automation system uses the information contained in the Substation Configuration Description (SCD) file, which describes the complete substation configuration. The system processes the Extensible Markup Language (XML) based substation configuration file to create all data items for vertical integration as well as the connections for horizontal communication.

2 The power and process control systems integration in marine

The power system for marine technology is the system for production of electricity on a vessel and for control of all machines producing the power and making the vessel live. It also ensures the optimal use of energy resources in a secured, economic and environmental way. The power system is closely integrated with the production of electricity via high-speed communication, and with switchgear systems, protection devices and controllers. It is an integrated solution that provides the vessel with complete control over the electricity, whether for system drives, or other on-board

processes. In addition, to ensure the stability of the electrical network, it also optimizes available resources to provide maximum performance and energy efficiency. Monitoring of the power system provides another layer of protection against power installations at sea and on oceans. Supervision systems oversee the entire plant, take action and notify operators, if there are failures in other subsystems, thereby preventing cascading series of failures.

The process control in the field of marine includes system solutions for specific types of vessels, such as process control for tankers transporting natural gas, vessels for drilling and extraction of oil and gas, floating dredging mechanisms, but also large vessels for passengers with extensive requirements for heating, ventilation, and air conditioning (HVAC). An integral part of the vessel control systems with passenger are safety systems, technical systems and equipment, approved in accordance with the standards and a level up to SIL3 (Safety Integrity Level). They are the basis for marine fire systems to provide early fire detection and gas danger warning to the operator's workstation and again take action and notify operators to avoid dangerous situations. The system for Marine ESD (Emergency Shut Down) to prevent or minimize the consequences of emergency situations helps preventing loss of human life, environmental damage and / or plant and equipment.

3 Evaluation of alarms and events from the operator workstation

Alarm system capabilities allow us to evaluate the operation of a controlled process or system from several points of view. The control systems provide the alarm processing and alarm display functionalities.

The alarm processing functionality includes alarm logging according to types of alarms, control algorithm logics, alarm suppression and shelving, alarm prioritization and categorization [Urban, P., 2014].

Alarm display functionality provides us with alarm message format options linked to the operators workstations equipped with HMI of the control systems.

The problems occurring during implementing control systems into operation will show and can be identified based on looking into data from the control system during the commissioning phase of a project. Talking to operators during the implementation and performing alarm analysis from the real time operation can be done using methodology from an approved standard, such as the EEMUA 191.

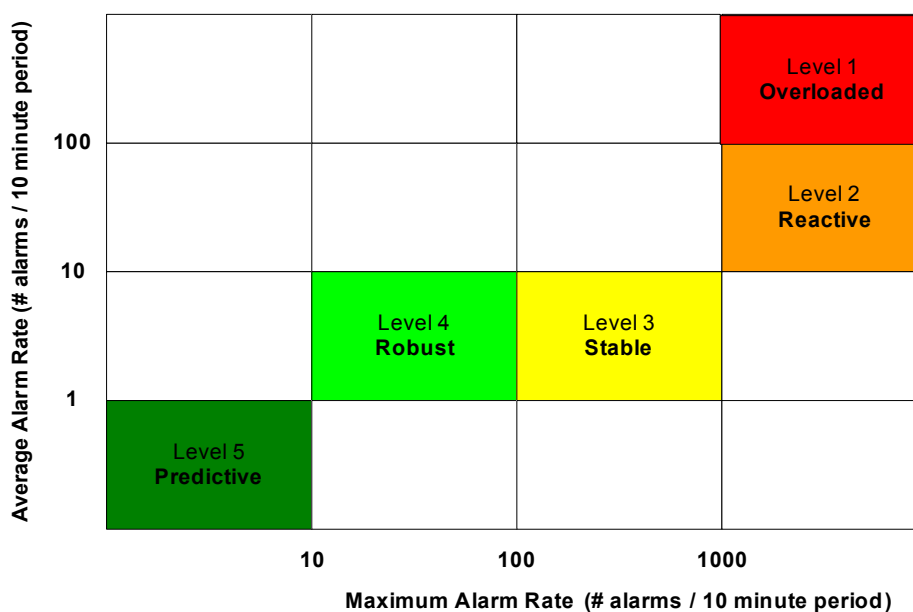


Figure 4 – Defining performance levels for operators [EEMUA, 2014]

Figure 4 shows the definition for the performance levels of an operator based on the best practice of this standard. It evaluates the predictive type of behaviour for an average of less than 1

alarm per 10 minute period of operation and the maximum of less than 10 alarms for the same period of time. Conditions with an average of more than 10 alarms in a 10 minute period resulting into a maximum of more than 1000 alarms for a 10 minute time period indicate a reactive response, which can lead to serious consequences.

During our project work the data were evaluated from different process subsystems of a control system implemented into marine technology. Data were analyzed from exported files given to us from the operation staff and process engineers in order to find issues leading to actions to minimize the number of alarms consistent with the proper protection of people, plant and environment.

The analysis started with an alarm database divided into smaller groups of data according to the alarm category and alarm area as the methodology given by the EEMUA 191 standard recommends.

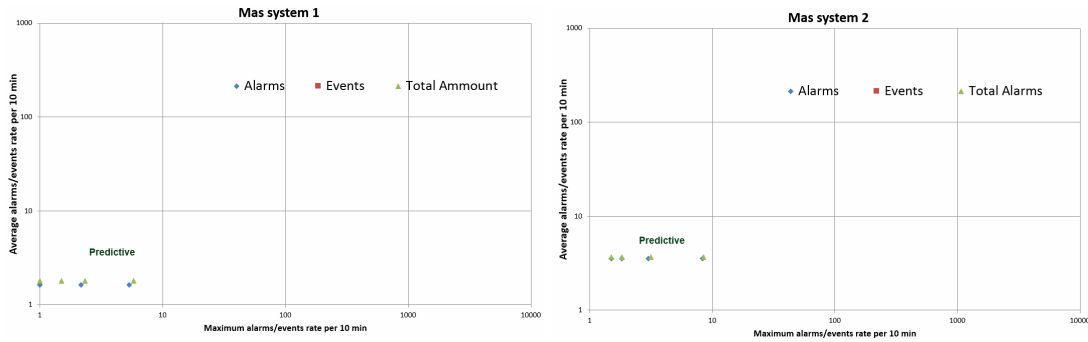


Figure 5 – Performance level found on MAS

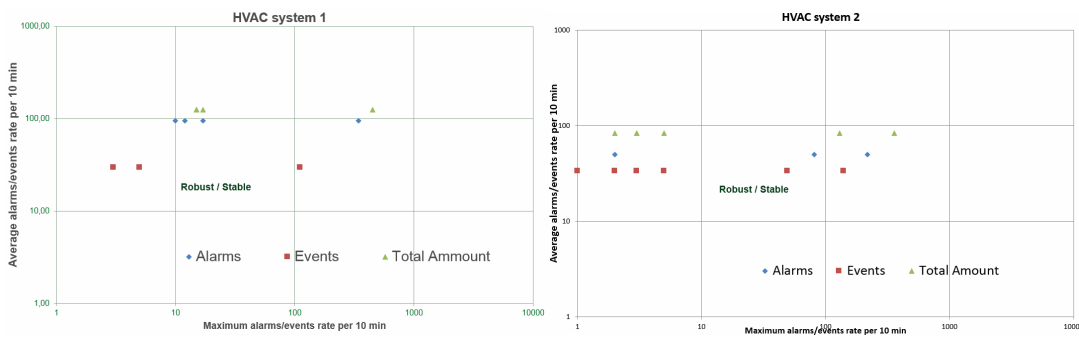


Figure 6 – Performance level found on HVAC

Figure 5 shows that the power systems MAS 1 and MAS2 (machinery automation systems) were well-tuned for the analyzed time period, and therefore it indicates the predictable type for the operator performance level. On the other hand, Figure 6 shows the increased number of alarms and events logged from the heat, ventilation and air conditioning subsystems (HVAC1 and HVAC2) during the analyzed time period suggesting to continue the observations with a closer look into them and paying attention to all issues in the control system settings in case the stable type of performance level changes into the reactive type.

4 Conclusion

The integration of a power system and a control system in marine technology brings several advantages, among them are a single operator environment with personalized workplaces for timely response to abnormal conditions in order to consolidate alarms and events, single screen access from the operator workstation to all electric power information simplifying daily operations, emergency shut-downs, post-incident analysis and root cause identification, and similar areas. This is made possible by implementing the standardized technology configuration based on IEC 61850 standard. The marine technology is a highly sophisticated field and involves design, engineering, and team know-how and experience cooperation during commissioning. The work during the implementation phase of control systems into operation of the vessels requires feedback about how the systems are set, problems can be identified based on looking into data from the control system, as well as talking to operators during the implementation. Performing alarm analysis from the real time operation data using the EEMUA 191 methodology found out issues in HVAC system settings, as shown in Figure 7, leading to several actions: to minimize the number of alarms consistent with the proper protection of people, plant and environment, to ensure all alarms are relevant, understandable and manageable at all times.

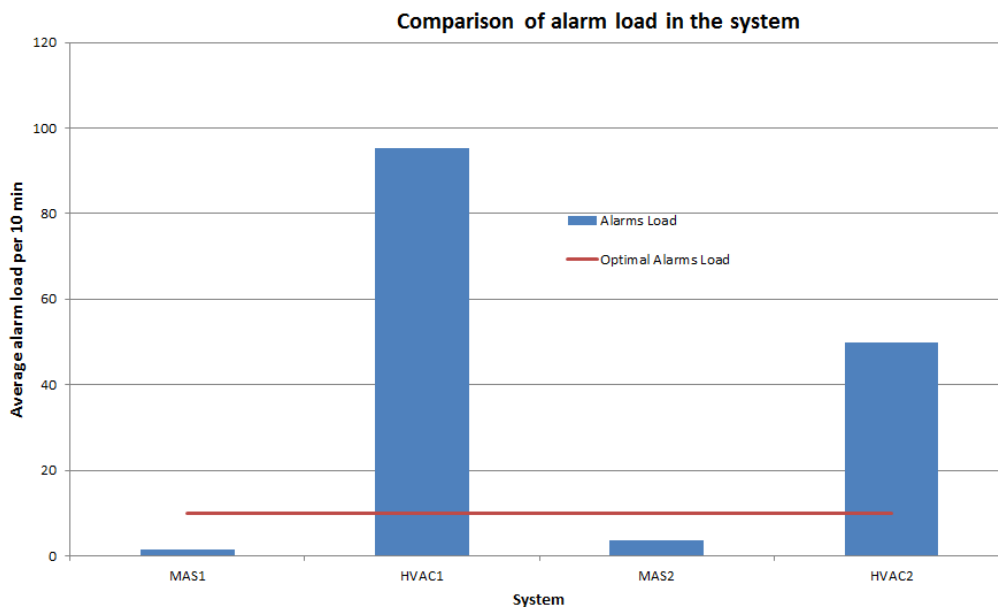


Figure 7 – Alarm load comparison

5 Acknowledgment

This paper was prepared within the project SP2015/83 of VSB-TU Ostrava.

6 References

- EEMUA. Publication 191 Alarm systems - a guide to design, management and procurement. [online]. [cit. 2014-12-01]. Available from: <http://www.eemua.org/Products/Publications/Print/EEMUA-Publication-191.aspx>.
- Kirrman, H.: Introduction to the IEC 61850 electrical utility communication standard, 2012 [online]. [cit. 2015-02-04]. Available from: http://lamspeople.epfl.ch/kirrmann/Slides/AI_421_IEC61850.pdf
- Urban, P., Landryova, L. Alarm Management at Operators Workstations. In: *IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2014, Ajaccio, France, September 20-24, 2014, Proceedings, Part I*. DOI: 1007/978-3-662-44739-0_38. ISBN 978-3-662-44738-3. ISSN 978-3-662-44739-0. Dostupné také z: http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-662-44739-0_38

Linear Control of the Inverted Pendulum Mechanism

VASILEV, Andrey¹ & WAGNEROVÁ, Renata²

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

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

Abstract: *This contribution deals with control of multidimensional system. State space model used is of mechanism incorporating inverse pendulum principle. Linear Quadratic Regulator (LQR) is used for control of mechanism's model. To acquire parameters of nonlinear model are used Euler-Lagrangian equations. Equations specify difference between kinetic energy and potential energy of every mechanism part, and thus energy distribution for defined motion. Results of simulation were obtained using MATLAB.*

Keywords: *Inverted Pendulum; Nonlinear; LQR; State space; Lagrangian*

1 Introduction

Task of controlling inverted pendulum is well-known and often used. This system is used to learn or test control theories. Considered system is nonlinear and unstable. Best controller could do is stabilizing pendulum in upright position of unstable equilibrium for a moment. How big difference of set point and evaluated or measured position points to optimal control parameters. Control of inverted pendulum is possible by more than one method. There are methods using linearized model of system and methods that do not need to know system model. Into considered methods for control apply PID controller, fuzzy logic controller or use of neural network etc.

For this paper was chosen control with Linear Quadratic Regulator (LQR). To acquire system non-linear model every part of mechanism is described by energy equations. Those are base corner stone for use of Lagrangian equations, which allows obtaining energy distribution equations in system based on set movement parameters (coordinates). Lagrangian solves difference of kinetic energy and potential energy of system unitary parts with considerations to external influence on energy balance. Thus non-linear model is available. Chosen method requires linearized model of system. To obtain linearized model is needed use of Jacobian. That allows seeing influence of every coordinate change on system behavior. Those changes are considered to be from known or estimated on initial conditions. Thus model of linearized model is secured based on operation set point. To obtain optimal controller parameter Riccati equation need to be solved. Results of this equation lead to minimal values of cost function, which means difference of observed and estimated system behavior squared.

Principle of inverted pendulum can be found in many forms. One is considered to be stabilizing a space multistage rocket during launch or during transport from depot to launching pad. Other possible comparison is stabilizing human body in upright position while considering tendon and muscle tension as spring and damper. Principle is often used for recreating of human movements by robots, like hand movement or walking. Model of mechanism used for LQR control consists of double inverted pendulum and ordinary pendulum in horizontal or semi horizontal position. Both pendulums are connected. Base of

inverted pendulum is in fixed position. Main goal of mechanism is to move lever representing ordinary pendulum from initial position to set position and there.

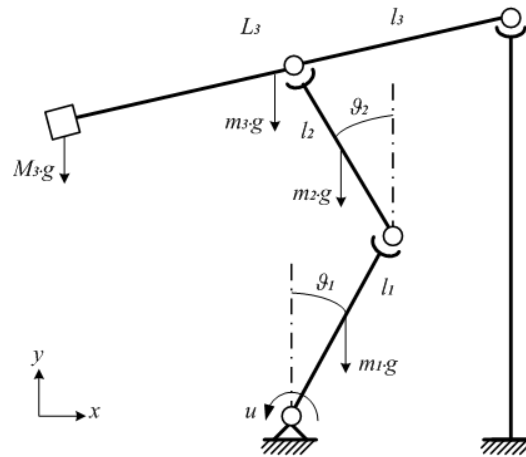


Figure 1 – Mechanism with inverted pendulum

2 System model

Acquiring mathematical model is matter of solving energy balance of mechanism. Result of solving set Lagrangian equations is nonlinear system model. Model shows change of system behavior based on arbitrary coordinates, vector. Evolution of mechanism movement is described by obtained model.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = F, \quad (1)$$

$$L = E_K - E_P, \quad (2)$$

$$E_{K1} = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot \frac{l_1^2}{4} \cdot \dot{\theta}_1^2, \quad (3)$$

$$E_{K2} = \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot l_1^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot \frac{l_2^2}{4} \cdot \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2, \quad (4)$$

$$E_{K3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_3^2}{l_3^2} \cdot \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \left[l_1^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 + l_2^2 \cdot \dot{\theta}_2^2 + 2 \cdot m_2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 \right], \quad (5)$$

$$E_{P1} = m_1 \cdot \frac{l_1}{2} \cdot \cos \theta_1 \cdot g, \quad (6)$$

$$E_{P2} = m_2 \cdot \left(l_1 \cdot \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \cdot \cos \theta_2 \right) \cdot g, \quad (7)$$

$$E_{P3} = \left(\frac{m_3}{2} + M_3 \right) \cdot \left(l_1 \cdot \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \cdot \cos \theta_2 \right) \cdot g, \quad (8)$$

where L – means Lagrangian,
 F – means general force or summation of partial forces,
 θ – means arbitral coordinate,
 E_K – means kinetic energy,
 E_P – means potential energy,
 m_i – means relevant lever mass indexed from 1 to 3,
 l_i – means relevant lever length indexed from 1 to 3,
 L_3 – means whole length of supported lever 3,
 M_3 – means mass at the end of supported lever 3,
 g – means gravitational acceleration.

Kinetic energy of first pendulums is added to kinetic energy of ordinary pendulum. Potential energies for said parts are similarly added to energy balance equation. Lagrangian equation then looks as follows.

$$\begin{aligned}
L = & \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot \frac{l_1^2}{4} \cdot \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot l_1^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot \frac{l_2^2}{4} \cdot \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 \\
& + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_3^2}{l_3^2} \cdot \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \left[l_1^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 + l_2^2 \cdot \dot{\theta}_2^2 + 2 \cdot m_2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 \right] \\
& + m_1 \cdot \frac{l_1}{2} \cdot \cos \theta_1 \cdot g + m_2 \cdot \left(l_1 \cdot \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \cdot \cos \theta_2 \right) \cdot g \\
& + E_{p_3} = \left(\frac{m_3}{2} + M_3 \right) \cdot \left(l_1 \cdot \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \cdot \cos \theta_2 \right) \cdot g
\end{aligned} \tag{9}$$

Energies of ordinary pendulum are by definition function of coordinates of inverted pendulum. Energy equations were augmented accordingly. Obtained energy distribution equations are described below.

$$\begin{aligned}
u = & \left[m_1 \cdot \frac{l_1^2}{4} + m_2 \cdot l_1^2 + \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3^2 \cdot l_1^2}{l_3^2} \right] \cdot \ddot{\theta}_1 \\
& + \left[m_2 \cdot \frac{l_1 \cdot l_2}{4} + \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3^2 \cdot l_1 \cdot l_2}{l_3^2} \right] \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot \ddot{\theta}_2 \\
& - \left[m_2 \cdot \frac{l_1 \cdot l_2}{4} + \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3^2 \cdot l_1 \cdot l_2}{l_3^2} \right] \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
0 = & \left[m_2 \cdot \frac{l_1 \cdot l_2}{4} + \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3^2 \cdot l_1 \cdot l_2}{l_3^2} \right] \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_2^2 \\
& - \left[m_2 \cdot \frac{l_1 \cdot l_2}{4} + \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3^2 \cdot l_1 \cdot l_2}{l_3^2} \right] \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1^2 \\
& + \left[m_2 \cdot \frac{l_2^2}{4} + m_2 \cdot l_1^2 + \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3^2 \cdot l_1^2}{l_3^2} \right] \cdot \ddot{\theta}_2 \\
& - \left[m_2 \cdot \frac{l_1 \cdot l_2}{4} + \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3^2 \cdot l_1 \cdot l_2}{l_3^2} \right] \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1^2 \\
& - \left[m_2 \cdot \frac{l_1 \cdot l_2}{4} + \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3^2 \cdot l_1 \cdot l_2}{l_3^2} \right] \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2
\end{aligned} \tag{11}$$

where u – means external force applied on first stage of inverted pendulum.

Last two acquired equations describe force balance of every coordinate relevant and its physical counterpart, levers of inverted pendulum. To add or remove other variable elements representing external sources of error it is suffices to add those to left side of equations 10 and 11. Effect of supported lever can be imagined as reduced variable force applied to tip of inverted pendulum. Thus all needed information to advance control design is acquired. Nonlinear model can be written as is shown in following equations. Nonlinear system equations are considered as according to basic description of mechanism with consideration to its dynamic properties.

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \cdot \dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{H} \cdot u, \quad (12)$$

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{pmatrix} K_1 & K_4 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ K_4 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) & K_3 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \begin{pmatrix} -K_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_2 & -K_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_2 \\ -K_4 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 & -K_4 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{pmatrix} K_5 \cdot \sin \theta_1 \\ K_6 \cdot \sin \theta_2 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{H} = (1 \ 0)^T, \quad (16)$$

$$K_1 = m_1 \cdot \frac{l_1^2}{4} + m_2 \cdot l_1^2 + \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3^2 \cdot l_1^2}{l_3^2}, \quad (17)$$

$$K_2 = m_2 \cdot \frac{l_1 \cdot l_2}{4} + \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3^2 \cdot l_1 \cdot l_2}{l_3^2}, \quad (18)$$

$$K_3 = m_2 \cdot \frac{l_2^2}{4} + m_2 \cdot l_1^2 + \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3^2 \cdot l_1^2}{l_3^2}, \quad (19)$$

$$K_4 = m_2 \cdot \frac{l_1 \cdot l_2}{4} + \left(\frac{m_3}{4} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3^2 \cdot l_1 \cdot l_2}{l_3^2}, \quad (20)$$

$$K_5 = \left(\left(\frac{m_3}{2} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3}{l_3} - m_1 \cdot \frac{l_1}{2} - m_2 \cdot l_2 \right) \cdot g, \quad (21)$$

$$K_6 = \left(\left(\frac{m_3}{2} + M_3 \right) \cdot \frac{L_3}{l_3} - m_2 \cdot \frac{l_2}{2} \right) \cdot g, \quad (22)$$

where \mathbf{M} – means symmetrical matrix of system inertia distribution,
 \mathbf{C} – means matrix of centrifugal and coriolis effects,
 \mathbf{G} – means matrix of system initial potential energy,
 \mathbf{H} – means matrix of external effects on system.

3 Control design

Model of the system acquired thus far is clearly non-linear. To design linear control via Linear Quadratic Regulator, it is necessary to perform linearization. For that state space model based on differential equations can be used. System state space model is described as follows.

$$\mathbf{x} = (\boldsymbol{\theta} \ \dot{\boldsymbol{\theta}})^T, \quad (23)$$

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = -\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{G} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{H} \cdot u, \quad (24)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{C} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{x} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{G} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{H} \end{pmatrix} \cdot u, \quad (25)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \cdot u, \quad (26)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{C} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{x} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{G} \end{pmatrix}, \quad (27)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{H} \end{pmatrix}, \quad (28)$$

where \mathbf{x} – means system state vector,
 \mathbf{I} – means identity matrix of 2 by 2,
 $\mathbf{0}$ – means zero matrix of 2 by 2,
 \mathbf{f} – means ,
 \mathbf{g} – means .

Linearization of state space model acquired is done by Jacobian, thus to follow effect of every considered coordinate on problem at hand. Linearization is approximated to equilibrium point, which is unstable. Jacobian was used to obtain matrices \mathbf{A} and \mathbf{B} .

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot u, \quad (29)$$

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}(0)^{-1} \cdot \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \quad (30)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}(0)^{-1} \cdot \mathbf{H} \end{pmatrix}, \quad (31)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{H} \end{pmatrix}, \quad (32)$$

where \mathbf{A} – means state transition model,
 \mathbf{B} – means control-input model.

To finish design of linear regulator it is necessary to obtain it control matrix. To obtain last mentioned matrix Riccati equation is solved for estimated quadratic variation of state variables or in other words cost function. Variation matrices for calculation of cost function need to positive semi-definitive and semi-definitive in infinte-horizon case. Those limits are set for keeping positive cost function. Furthermore now linear differential system model have to be controllable. Equations for Linear Quadratic Regulator are as follows.

$$\mathbf{J} = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{u}) \cdot dt, \quad (33)$$

$$\mathbf{U} = -\mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{x} = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}, \quad (34)$$

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} - \mathbf{P} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0}, \quad (35)$$

where \mathbf{J} – means cost function,
 \mathbf{Q} – means matrix of state variables covariance,
 \mathbf{R} – means matrix of observed output covariance,
 \mathbf{U} – means function of linear-quadratic regulator,
 \mathbf{P} – means solution of standard Riccati equation,
 \mathbf{K} – means linear control feedback matrix.

4 Simulation results

System is assumed at rest at the beginning of the simulation hence was set not stable and not non-stable equilibrium point as initial parameters. Matrices of observation of state space linear model follows only position not speed of inverted pendulum levers movements.

Simulation set parameters:

```
m1= 0.5;      % [kg]
m2= 0.5;      % [kg]
m3= 1.4;      % [kg]
M3= 3.0;      % [kg]
l1= 0.5;      % [m]
l2= 0.5;      % [m]
l3= 0.7;      % [m]
L3= 1.4;      % [m]
g= 9.81;      % [m/s^2]
```

```
C=[1 1 0 0];  % [Theta1 Theta2 Omega1 Omega2]
D=[0];        % positive feedback effect
```

Simulation set initial conditions (state vector):

```
Th10=-0.1;    % [rad]
Th20= 0.05;   % [rad]
W10= 0;       % [rad/s]
W20= 0;       % [rad/s]
```

Acquired model parameters:

```
A= [0      0      1      0;
     0      0      0      1;
     291,17 -257,99 0      0;
     -306,29 194,28 0      0];
B=[0 0 -3,58 -3,61]';
```

Set quadratic linear controller parameters:

```
Q=[10 0 0 0;
   0 10 0 0;
   0 0 10 0;
   0 0 0 10];
R=[1];
```

Acquired quadratic linear controller parameters:

```
K=[-2225.89, 1707.70, -94.71, 76.72]';
```

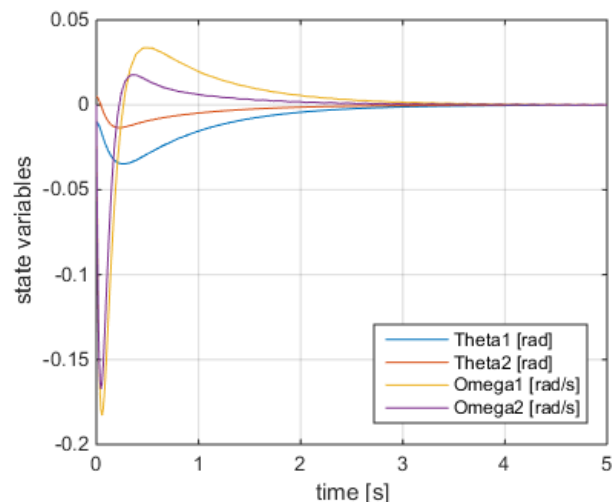


Figure 2 – Response of state variables

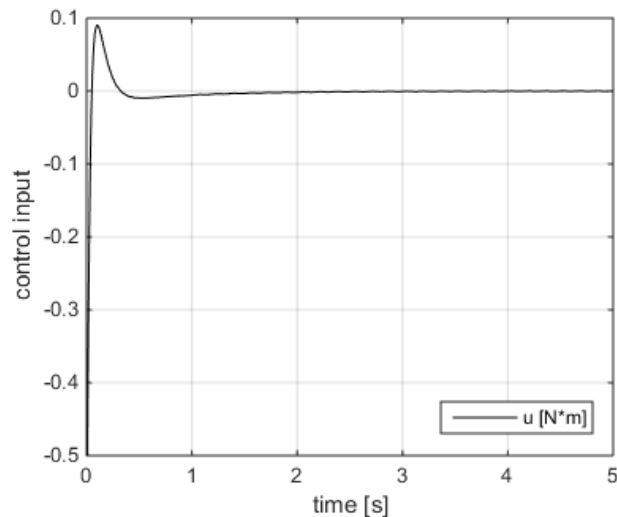


Figure 3 – Control input

5 Conclusion

Goal of this paper was designing form of control for nonlinear non stable system. Model of considered system is of mechanism incorporating principle of inverted pendulum. Method chosen was Linear Quadratic Regulator, which is able to stabilize system around non stable equilibrium point. Before using chosen method linearization of system model was necessary. Acquiring linear model of the mechanism was performed through Lagrangian equations and Jacobian. Parameters of chosen control method is possible to acquire through solving Riccati equation. Designed control was tested through simulation of mechanism in Simulink/MATLAB.

Described mechanism, as nonlinear system is possible to control through use of Linear Quadratic Control. Functionality of chosen control method is described thoroughly in the sources mentioned in references.

6 References

- BOGDANOV, A. *Optimal Control of a Double Inverted Pendulum on a Cart*. OGI School of Science & Engineering, Department of Computer Science & Electrical Engineering, OHSU Report CSE-04-006, Dec. 2004. Available from www [cit. 2015-04-24].:
<URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc>>
- BARTON, T. W. *Stabilization the Dual Inverted Pendulum: A practical Approach*. Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Feb. 2008. Available from www [cit. 2015-04-24].:
<URL: <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/45611/319175708-MIT.pdf>>
- ZHANG, J., ZHANG, W. 2012. *LQR self-adjusting based control for the planar double inverted pendulum*. Physics Procedia, vol. 24, part C, 2012, p. 1669–1676. Available from www [cit. 2015-04-24].:
<URL: <http://www.sciencedirect.com/science>>

Návrh robustního řízení mechanických systémů Robust Control Design for Mechanical 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 mechanických systémů. Novým způsobem je odvozeno robustní řízení s vysokým zesílením a na jeho základě jsou navržena řízení pracující v klouzavých režimech. Veliká pozornost je věnována stabilitě uzavřeného systému řízení. Použití je ukázáno na příkladu.

Klíčová slova: mechanický systém, robustní řízení, řízení v klouzavých režimech, stabilita

1 Úvod

V současné době existuje poměrně mnoho metod umožňujících návrh řízení mechanických systémů [Bullo, Lewis 2005; Cedro 2012a,b; Choi, Chung 2004; Kelly, Santibanez, Loria 2005; Lewis, Dawson, Abdallah 2006; Slotine, Li 1991; Utkin 1992; Utkin Guldner Shi 1999; Zítek, Víteček 1999]. Matematické modely mechanických systémů jsou většinou nelineární s neurčitostmi, což významným způsobem znesnadňuje jejich řízení [Bullo, Lewis 2005; Cedro 2014; Choi Chung 2004; Lewis, Dawson, Abdallah 2006; Nwokah, Hurmuzlu 2001; Stadler 1995].

V příspěvku jsou uvažovány matematické modely mechanických systémů, které jsou typické pro roboty, manipulátory a jim podobné mechanické stroje a zařízení [Lewis, Dawson, Abdallah 2006; Stadler 1995]. Novým postupem je navrženo robustní řízení pro požadovaný matematický model uzavřeného systému řízení [Zítek, Víteček 1999]. Pro lineární požadovaný matematický model uzavřeného systému řízení decentralizované robustní řízení vede na algoritmy regulace PID [Vítečková, Víteček 2011].

2 Matematický model mechanického systému

Typický mechanický systém včetně pohonů (akčních členů) s n stupni volnosti může být popsán matematickým modelem [Lewis, Dawson, Abdallah 2006; Choi, Chung 2004; Kelly, Santibanez, Loria 2005; Stadler 1995]

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = u, \quad (1)$$

kde $M(q)$ je čtvercová symetrická kladně definitní matice setrvačnosti řádu n , $C(q, \dot{q})$ – čtvercová matice Coriolisových, odstředivých a viskózních sil řádu n , $g(q)$ – vektor tíhových sil dimenze n , q – vektor zobecněných proměnných dimenze n , u – vektor zobecněných sil (řídících proměnných) dimenze n .

Matematický model (1) je vhodné zapsat ve tvaru

$$\ddot{q} = f(q, \dot{q}) + M^{-1}(q)u, \quad (2a)$$

kde

$$f(q, \dot{q}) = -M^{-1}(q)[C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)]. \quad (2b)$$

3 Formulace úlohy řízení

U mechanického systému (2), resp. (1) je třeba navrhnout takové zpětnovazební řízení $\mathbf{u}^*(t)$, které zajistí sledování zadané trajektorie $\mathbf{q}^d(t)$ pro $t \geq 0$ tak, aby uzavřený systém řízení byl popsán matematickým modelem

$$\ddot{\mathbf{e}} = \mathbf{f}^d(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}), \quad \mathbf{e}(0) = \mathbf{e}_0, \quad \dot{\mathbf{e}}(0) = \mathbf{0}, \quad (3a)$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{q}^d - \mathbf{q}, \quad \dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{q}}^d - \dot{\mathbf{q}}, \quad \ddot{\mathbf{e}} = \ddot{\mathbf{q}}^d - \ddot{\mathbf{q}}, \quad (3b)$$

kde $\mathbf{f}^d(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}})$ je obecně nelineární funkce dimenze n .

Funkce \mathbf{f}^d je daná a musí splňovat podmínku

$$\mathbf{f}^d(\mathbf{0}, \mathbf{0}) = \mathbf{0} \quad (4)$$

a uzavřený systém řízení (3) musí být v jediném rovnovážném stavu

$$\mathbf{e} = \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{0},$$

tj.

$$[e_1, \dot{e}_1, e_2, \dot{e}_2, \dots, e_n, \dot{e}_n] = 0, \quad (5)$$

globálně asymptoticky stabilní.

4 Řešení úlohy řízení

V případě znalosti přesného matematického modelu (2) zpětnovazební řízení \mathbf{u}^* lze snadno určit dosazením (2) do (3), tj.

$$\overbrace{\ddot{\mathbf{q}}^d - \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{u}}^{\ddot{\mathbf{e}}} = \mathbf{f}^d(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) \Rightarrow \quad (6)$$

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{M}(\mathbf{q})[\ddot{\mathbf{q}}^d - \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{f}^d(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}})]. \quad (7)$$

Toto řízení je nerobustní, protože vyžaduje znalost matematického modelu (2) a nepůsobení poruchových veličin. Bohužel u složitějších mechanických systémů přesný matematický model není známý a poruchy jsou většinou neměřitelné. Proto vzniká problém, jak určit řízení \mathbf{u}^* při nepřesné znalosti matematického modelu (2) a neměřitelných poruchách.

Požadovaný matematický model uzavřeného systému řízení (3) může být zapsán ve tvaru [viz také (6)]

$$\mathbf{m}^d(\mathbf{u}) = \mathbf{0}, \quad (8a)$$

kde

$$\mathbf{m}^d(\mathbf{u}) = \ddot{\mathbf{e}}(\mathbf{u}) - \mathbf{f}^d(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}). \quad (8b)$$

Řízení \mathbf{u}^* lze např. určit iterační metodou pevného bodu [Zítek, Víteček 1999]. K oběma stranám rovnice (8a) se přičte výraz $\mathbf{K}^{-1}\mathbf{u}$ a po úpravě se dostane

$$\begin{aligned} \mathbf{K}^{-1}\mathbf{u} + \mathbf{m}^d(\mathbf{u}) = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{u} &\Rightarrow \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{K}\mathbf{m}^d(\mathbf{u}) \Rightarrow \\ \mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{u}_k - \mathbf{K}\mathbf{m}^d(\mathbf{u}_k), \quad \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (9)$$

kde \mathbf{K} je vhodně zvolená čtvercová matice dimenze n .

Např. pro

$$\mathbf{K} = \left[\frac{\partial \mathbf{m}^d(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right]^{-1} = -\mathbf{M}(\mathbf{q}) \quad (10)$$

se obdrží známá iterační Newtonova-Raphsonova metoda. V tomto případě řešení \mathbf{u}^* se dostane v jednom kroku pro libovolné \mathbf{u}_0 , tj. $\mathbf{u}^* = \mathbf{u}_1$. Je to dáno tím, že matematický model (2) [a tedy i (1)] je afinní (lineární) vzhledem k řízení.

Obecně při nepřesné matici (10), případně při jinak vhodně zvolené matici \mathbf{K} , platí

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{u}_k = \mathbf{u}^*, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

Samozřejmě se předpokládá, že matice \mathbf{M} , funkce \mathbf{f} , \mathbf{f}^d a $\ddot{\mathbf{q}}^d$ se během výpočtu nemění.

Vztah pro iterační výpočet (9) je vhodné zastoupit diferenciální rovnicí

$$\frac{d\mathbf{u}(\tau)}{d\tau} = \Theta \mathbf{m}^d[\mathbf{u}(\tau)], \quad \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0, \quad (12a)$$

$$\Theta = -\lambda \mathbf{K}, \quad \lambda \rightarrow \infty \quad (12b)$$

kde pro vhodně zvolenou čtvercovou matici \mathbf{K} platí

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \mathbf{u}(\tau) = \mathbf{u}^*. \quad (13)$$

Vzhledem k tomu, že řešení diferenciální rovnice (12) musí probíhat značně rychleji než časové změny \mathbf{M} , \mathbf{f} , \mathbf{f}^d a $\ddot{\mathbf{q}}^d$, je vhodné zavést dva časy. Skutečný čas t a „rychlý“ čas

$$\tau = \beta t, \quad \beta \gg 1. \quad (14)$$

Průběh času τ je dán parametrem β , jehož velikost je úměrná velikosti λ ve vztahu (12b), tj. absolutní velikosti prvků v matici Θ . Pak rovnice (12) po uvažování (8b), dosazení (2) a úpravě bude mít tvar

$$\frac{d\mathbf{u}(\tau)}{d\tau} = -\Theta \mathbf{M}^{-1}[\mathbf{q}(t)]\mathbf{u}(\tau) + \Theta \left\{ \ddot{\mathbf{q}}(t) - \mathbf{f}[\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)] - \mathbf{f}^d[\mathbf{e}(t), \dot{\mathbf{e}}(t)] \right\} \quad (15)$$

Protože čas τ probíhá podstatně rychleji než skutečný čas t , lze výrazy závislé na čase t při výpočtu považovat za přibližně konstantní, tj.

$$\frac{d\mathbf{u}(\tau)}{d\tau} = -\Theta \mathbf{M}^{-1}\mathbf{u}(\tau) + \Theta(\ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{f} - \mathbf{f}^d). \quad (16)$$

Diferenciální rovnice (16) je lineární, a proto o stabilitě řešení rozhoduje její charakteristický mnohočlen

$$N(s) = \det(s\mathbf{I} + \Theta \mathbf{M}^{-1}), \quad (17)$$

kde \det je determinant, s – komplexní proměnná.

Matice \mathbf{M} je symetrická kladně definitní, a proto matice \mathbf{M}^{-1} bude rovněž symetrická kladně definitní a její charakteristická čísla budou reálná a kladná [Horn, Johnson 1986; Petersen, Pedersen 2012]. Bude-li matice Θ symetrická kladně definitní, pak charakteristická čísla součinu $\Theta \mathbf{M}^{-1}$ budou reálná kladná [Horn, Johnson 1986], tj. charakteristický mnohočlen (17) bude mít reálné záporné (stabilní) kořeny.

Pro účely řízení je vhodné diferenciální rovnici (12) zastoupit integrální rovnicí

$$\mathbf{u}(t) = \Theta \int_0^t \mathbf{m}^d[\mathbf{u}(\tau)] d\mathbf{u}(\tau) + \mathbf{u}_0,$$

resp.

$$\mathbf{u}(t) = \Theta \mathbf{s}(t) + \mathbf{u}_0, \quad (18a)$$

kde [viz (8b) a (3a)]

$$\mathbf{s}(t) = \int_0^t \mathbf{m}^d[\mathbf{u}(\tau)] d\tau = \dot{\mathbf{e}}(t) - \int_0^t \mathbf{f}^d[\mathbf{e}(\tau), \dot{\mathbf{e}}(\tau)] d\tau. \quad (18b)$$

Řízení (18) bude tím bližší řízení $\mathbf{u}^*(t)$, čím vyšší hodnotu bude mít parametr λ , viz (12b). Protože ve vztazích (18) nevystupuje explicitně matematický model řízeného mechanického systému (2), proto jde o robustní řízení s vysokým zesílením.

Počáteční řízení \mathbf{u}_0 zajišťuje počáteční rovnováhu a lze ho určit experimentálně, případně odhadnout na základě vztahu (1) [resp. (2)]

$$\mathbf{u}_0 = \mathbf{g}(\mathbf{q}_0). \quad (19)$$

Počáteční řízení \mathbf{u}_0 často nemusí být uvažováno, ale v některých případech jeho neuvažování může způsobit nepřijatelné rázy.

Při decentralizovaném řízení matice \mathbf{K} [viz (12b)] je diagonální s reálnými zápornými prvky, a proto v tomto případě matice Θ bude diagonální s reálnými kladnými prvky

$$\Theta = \text{diag}[\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n], \quad \Theta_i > 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (20)$$

kde diag je diagonální matice.

Bude-li matematický model uzavřeného systému řízení (3) [resp. (8)] lineární, pak i robustní řízení s vysokým zesílením (18) bude lineární.

Při číslicové simulaci je třeba věnovat zvýšenou pozornost volbě vhodného kroku řešení, protože může vzniknout problém „stiff“ systémů. Prakticky velikost prvků Θ_i je omezena ztrátou stability uzavřeného systému řízení způsobenou nemodelovanou dynamikou a v praxi vždy přítomným reálným omezením řídicích proměnných (jsou uvažována pouze symetrické omezení)

$$|u_i(t)| \leq u_i^m, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (21)$$

Tento problém lze řešit uvažováním nekonečně vysokých hodnot $\Theta_i \rightarrow \infty$ a omezením (21). Pak řízení (18) může být vyjádřeno vztahem

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{U} \mathbf{sign}[\mathbf{s}(t)] + \mathbf{u}_0, \quad (22a)$$

$$\mathbf{U} = \text{diag}[u_1^m, u_2^m, \dots, u_n^m], \quad (22b)$$

$$\mathbf{sign}(\mathbf{s}) = [\text{sign}(s_1), \text{sign}(s_2), \dots, \text{sign}(s_n)]^T, \quad (22c)$$

$$\text{sign}(s_i) = \begin{cases} 1 & s_i > 0 \\ 0 & s_i = 0 \\ -1 & s_i < 0 \end{cases}. \quad (22d)$$

Robustní řízení (22) pracuje v klouzavém režimu a vztah

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{0} \quad (23)$$

popisuje klouzavou plochu (varietu) [Slotine, Li 1991; Utkin 1992; Utkin Guldner Shi 1999; Zítek, Víteček 1999].

Řízení (22) je vysoce robustní, ale také vysoce aktivní, co způsobuje neustálé přepínání mezi hodnotami u_i^m a $-u_i^m$.

Aktivitu řízení (22) lze podstatně snížit zastoupením nespojitě funkce (22d) spojitou nehladkou funkcí nasycení

$$\text{sat}\left(\frac{s_i}{\varepsilon_i}\right) = \begin{cases} \frac{s_i}{\varepsilon_i} & \frac{|s_i|}{\varepsilon_i} \leq 1 \\ \text{sign}\left(\frac{s_i}{\varepsilon_i}\right) & \frac{|s_i|}{\varepsilon_i} > 1 \end{cases} \quad (24)$$

nebo spojitou hladkou funkcí

$$\text{asign}(s_i) = \frac{s_i}{\varepsilon_i + |s_i|}, \quad (25)$$

kde ε_i je vhodně zvolené malé kladné číslo.

Je zřejmé, že pro $\varepsilon_i \rightarrow 0$ obě funkce (24) a (25) konvergují k funkci (22d).

Robustní řízení (22) i jeho aproximace pomocí funkcí (24) nebo (25) vyžadují poměrně vysoké hodnoty u_i^m , proto pokud je známá matice \mathbf{M} (znalost může být pouze přibližná), je možné použít robustní klouzavé řízení

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{M}(\mathbf{q}) \mathbf{U} \mathbf{sign}[\mathbf{s}(t)] + \mathbf{u}_0, \quad (26)$$

kde funkce $\text{sign}(s_i)$ mohou být zastoupeny aproximacemi (24) nebo (25). Dále pro zjednodušení počáteční řízení \mathbf{u}_0 není uvažováno.

Minimální hodnoty omezení u_i^m zajišťující stabilitu uzavřeného systému řízení mohou být určeny analyticky.

Předpokládá se, že matematický model řízeného mechanického systému (2) obsahuje neurčitosti, tj.

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \Delta \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + [\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) + \Delta \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})] \mathbf{u} \quad (27)$$

Neurčitosti Δf a ΔM^{-1} mohou vyjadřovat nepřesnosti matematického modelu, změny vlastností mechanického systému a působení poruch.

V tomto případě pro matematický model uzavřeného systému řízení (8)

$$\mathbf{m}^d = \mathbf{0}$$

platí

$$\mathbf{m}^d = \ddot{\mathbf{q}}^d - \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}, \mathbf{u}) - \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{u} \quad (28)$$

kde funkce

$$\mathbf{h} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \Delta \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \Delta \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{u} + \mathbf{f}^d(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) \quad (29)$$

vyhovuje omezení

$$\|\ddot{\mathbf{q}}^d - \mathbf{h}\|_{\infty} < \kappa \quad (30)$$

ve smyslu normy

$$\|\mathbf{x}\|_{\infty} = \max\{|x_1|, |x_2|, \dots, |x_n|\}. \quad (31)$$

Pro Ljapunovovu funkci [Slotine, Li 1991]

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{s}, \quad \mathbf{s} = \int_0^t \mathbf{m}^d d\tau \quad (32)$$

lze po uvažování (28) a (26) psát

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} = \mathbf{s}^T \mathbf{m}^d = \mathbf{s}^T [\ddot{\mathbf{q}}^d - \mathbf{h} - \mathbf{U} \text{sign}(\mathbf{s})] = \sum_{i=0}^n \dot{V}_i < 0. \quad (33)$$

Nerovnost (33) bude splněna, když každá složka \dot{V}_i bude pro nejhorší možný případ záporná, tj.

$$\dot{V}_i = s_i [\kappa - u_i^m \text{sign}(s_i)] < 0 \Rightarrow |s_i| \kappa - s_i u_i^m \text{sign}(s_i) < 0.$$

Protože platí

$$\text{sign}(s_i) = \frac{s_i}{|s_i|} = \frac{|s_i|}{s_i},$$

lze psát

$$\begin{aligned} |s_i|(\kappa - u_i^m) < 0 \Rightarrow \\ u_i^m > \kappa. \end{aligned} \quad (34)$$

Z této nerovnosti vyplývá, že pro dostatečně vysoké hodnoty u_i^m robustní klouzavé řízení (26) zajistí stabilitu uzavřeného systému řízení.

Dalšího zkvalitnění řízení lze dosáhnout pomocí lineární kombinace [Zítek, Víteček 1999]

$$\mathbf{u}^c(t) = \alpha(t)\mathbf{u}^*(t) + [1 - \alpha(t)]\mathbf{u}(t), \quad 0 \leq \alpha(t) \leq 1, \quad (35)$$

kde nerobustní řízení \mathbf{u}^* je dáno vztahem (7) a robustní řízení \mathbf{u} je dáno některým ze vztahů (18) nebo (26) a koeficient α může být obecně funkcí času t . Např. na začátku řízení matematický model mechanického systému je známý, tj. $\alpha(0) = 1$ a později se mění, proto je vhodné hodnotu $\alpha(t)$ pro $t > 0$ postupně snižovat. Je zřejmé, že v tomto případě počáteční řízení \mathbf{u}_0 nemusí být uvažováno.

Velmi výhodné je kombinované řízení

$$\mathbf{u}^c(t) = \mathbf{u}^*(t) + \mathbf{u}(t), \quad (36)$$

kde podobně jako v předchozím případě jsou použita řízení (7) a (18) nebo (26). V tomto případě lze podstatně snížit hodnoty omezení u_i^m a také není třeba uvažovat počáteční řízení \mathbf{u}_0 . Např. pro robustní řízení (26) pro

$$\begin{aligned} \mathbf{m}^d &= \ddot{\mathbf{q}}^d - \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{f}^d(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) - \mathbf{h}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{u}^c) - \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{u}^c, \\ \mathbf{h}_1 &= \Delta \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \Delta \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{u}^c, \end{aligned} \quad (37)$$

$$\|-\mathbf{h}_1\|_\infty < \kappa_1 < \kappa \quad (38)$$

Ize pro derivaci Ljapunovovy funkce podle času t podobně jako v předchozím případě psát

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{s}^T [-\mathbf{h}_1 - \mathbf{U} \text{sign}(\mathbf{s})] = \sum_{i=0}^n \dot{V}_i < 0, \\ \dot{V}_i &= s_i [\kappa_1 - u_i^m \text{sign}(s_i)] < 0 \Rightarrow \\ u_i^m &> \kappa_1. \end{aligned} \quad (39)$$

Požadovaný matematický model uzavřeného systému řízení je často lineární

$$\ddot{\mathbf{e}} = -\mathbf{A}_2 \dot{\mathbf{e}} - \mathbf{A}_1 \mathbf{e} \Rightarrow \mathbf{m}^d = \ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{A}_2 \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{A}_1 \mathbf{e} \quad (40a)$$

$$\mathbf{A}_1 = \text{diag} \left[\frac{1}{T_1^2}, \frac{1}{T_2^2}, \dots, \frac{1}{T_n^2} \right], \quad \mathbf{A}_2 = \text{diag} \left[\frac{2\xi_1}{T_1}, \frac{2\xi_2}{T_2}, \dots, \frac{2\xi_n}{T_n} \right], \quad (40b)$$

kde T_i jsou časové konstanty, ξ_i – koeficienty relativního tlumení.

Po dosazení (40) do (18b) a úpravě se dostane

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{A}_2 \mathbf{e}(t) + \mathbf{A}_1 \int_0^t \mathbf{e}(\tau) d\tau + \dot{\mathbf{e}}(t). \quad (41)$$

Počáteční podmínka \mathbf{e}_0 není uvažována. Ze vztahů (18a) a (41) vyplývá, že při lineárním požadovaném matematickém modelu uzavřeného systému řízení, decentralizované robustní řízení s vysokým zesílením vede na použití PID regulátorů [Vítečková, Víteček 2011]. Hodnoty jejich stavitelných parametrů jsou dány prvky diagonálních matic (40b).

5 Příklad

Pro zjednodušený matematický model manipulátoru RP (R – rotační, P – posuvný)

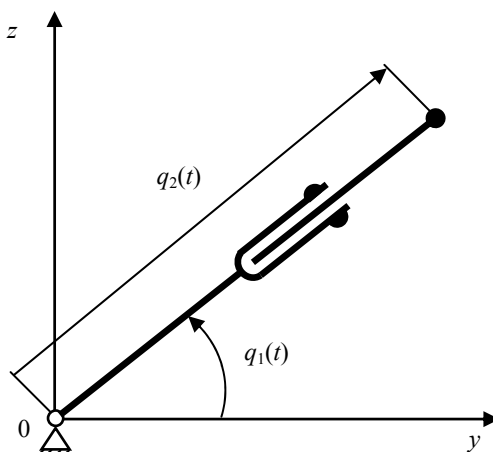
$$\begin{bmatrix} 1+q_2^2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_2 \dot{q}_2 & 0 \\ -\dot{q}_1 q_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1+q_2) \cos(q_1) \\ \text{sign}(q_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (42)$$

je třeba navrhnout robustní řízení, které zajistí matematický model uzavřeného systému řízení ve tvaru (40). Předpokládá se, že model (42) uvažuje dynamiku obou pohonů a dále, že

$$q_1 \in \left\langle -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right\rangle, \quad q_2 \in \langle 0,75; 1,25 \rangle, \quad q_1(0) = 0, \quad \dot{q}_1(0) = 0, \quad q_2(0) = 1, \quad \dot{q}_2(0) = 0.$$

Na základě vztahů (42), (40b) a (41) lze přímo psát

$$\begin{aligned} s_1(t) &= \frac{2\xi_1}{T_1} e_1 + \frac{1}{T_1^2} \int_0^t e_1 d\tau + \dot{e}_1, \\ s_2(t) &= \frac{2\xi_2}{T_2} e_2 + \frac{1}{T_2^2} \int_0^t e_2 d\tau + \dot{e}_2. \end{aligned} \quad (43)$$



Obr. 1 Zjednodušené schéma manipulátoru RP

Počáteční řízení u_0 se určí z počátečního ustáleného stavu $q_1(0)$ ze vztahu (19), tj.

$$u_{10} = [1 + q_2(0)] \cos[q_1(0)] = 2, \quad (44)$$

$$u_{20} = \sin[q_1(0)] = 0.$$

Pro ověření robustního řízení je uvažováno řízení s vysokým zesílením (18)

$$u_1(t) = \Theta_1 s_1(t) + u_{10}, \quad (45)$$

$$u_2(t) = \Theta_2 s_2(t)$$

a klouzavé řízení aproximované funkcí nasycení (24)

$$u_1(t) = u_1^m \operatorname{sat} \left[\frac{s_1(t)}{\varepsilon_1} \right] + u_{10}, \quad (46)$$

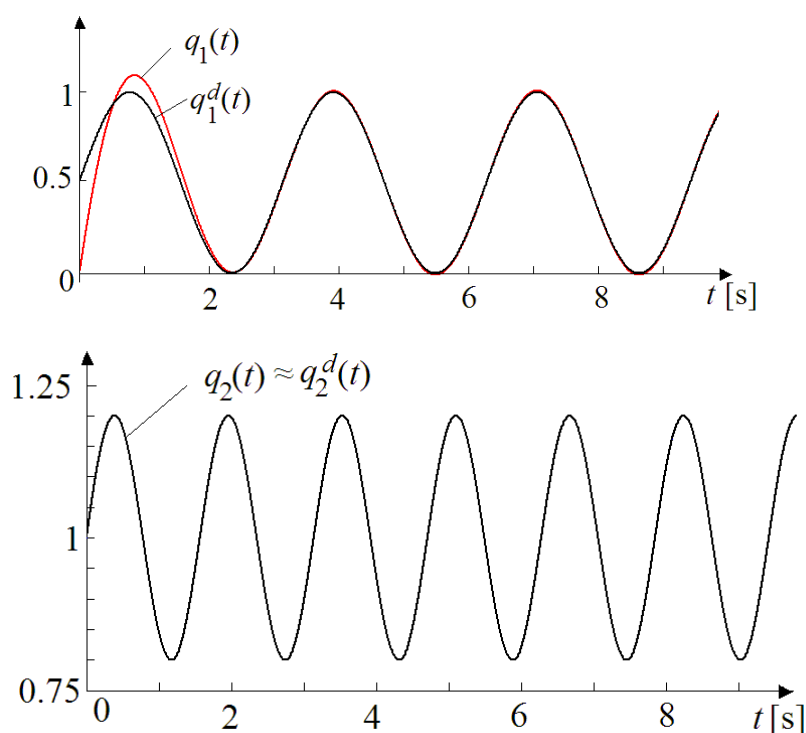
$$u_2(t) = u_2^m \operatorname{sat} \left[\frac{s_2(t)}{\varepsilon_2} \right].$$

Při simulaci robustního řízení byly použity hodnoty stavitelných parametrů: $\xi_1 = \xi_2 = 1/\sqrt{2}$; $T_1 = 0,5$; $T_2 = 0,1$; $\Theta_1 = \Theta_2 = 50$; $u_1^m = u_2^m = 10$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,05$. Požadované trajektorie byly dány vztahy

$$q_1^d(t) = 0.5 \sin(2t) + 0.5,$$

$$q_2^d(t) = 0.2 \sin(4t) + 1.$$

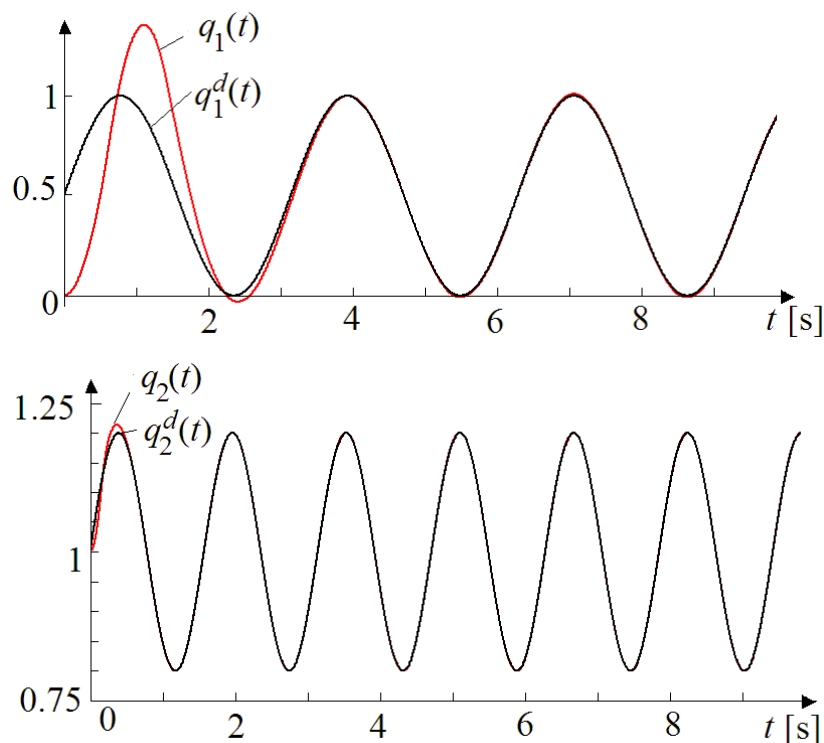
Průběhy žádaných a skutečných trajektorií pro robustní řízení s vysokým zesílením jsou na obr. 2 a pro robustní klouzavé řízení aproximované funkcí nasycení jsou na obr. 3. Z průběhů žádaných a skutečných trajektorií vyplývá, že oba algoritmy robustního řízení poměrně dobře dovedou zajistit sledování zadaných trajektorií.



Obr. 2 Robustní řízení s vysokým zesílením

Vhodnou volbou stavitelných parametrů $\Theta_1, \Theta_2, u_1^m, u_2^m, \varepsilon_1$ a ε_2 lze dosáhnout lepších výsledků.

Robustní řízení s vysokým zesílením je lineární a předpokládá se, že může nabývat libovolně vysokých hodnot, co je prakticky nerealizovatelné. Naproti tomu robustní klouzavé řízení aproximované funkcí nasycení je snadno realizovatelné.



Obr. 3 Klouzavé řízení aproximované funkcí nasycení

6 Závěr

V příspěvku jsou pro mechanické systémy odvozena novým způsobem robustní řízení, která ke své činnosti nevyžadují znalost jejich přesného matematického modelu ani působících poruch. Navržená řízení umožňují zajistit sledování zadané trajektorie s požadovanými vlastnostmi uzavřeného systému řízení.

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu SP2015/83.

7 Literatura

BULLO, F., LEWIS, A. D. Geometric Control of Mechanical Systems. Modeling, Analysis, and Design for Simple Mechanical Control Systems. New York: Springer Science+Business Media, 2005.

CEDRO, L. Identification of an electrically driven manipulator using the differential filters – input error method. In: Acta Mechanica et Automatica, Vol. 6, No. 2, 2012, p. 23-27.

CEDRO, L. Identification of an electrically driven manipulator using the differential filters. In: Pomiary Automatyka Robotyka, 12/2012, p. 68-72.

CEDRO, L. Linearization and identification a Mathematical model of an excavator. In: 15th International Carpathian Control Conference – ICCS, Czech Republic, 2014, p. 73-79.

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.

NWOKAH, O. D. I., HURMUZLU, Y. The Mechanical Systems Design Handbook. Modeling, Measurement, and Control. Boca Raton: CRC Press, 2001.

PETERSEN, K. B., PEDERSEN, M. S. The Matrix Cookbook. Version: November 15, 2012, [<http://matrixcookbook.com>].

SLOTINE, J. –J. E., LI, W. Applied Nonlinear Control. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.

STADLER, W. Analytical Robotics and Mechatronics. New York, McGraw-Hill, 1995.

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.

VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A. Vybrané metody seřizování regulátorů. Ostrava: VSB-TU Ostrava, 2011.

ZÍTEK, P., VÍTEČEK, A. Návrh řízení podsystémů se zpožděními a nelinearitami. Praha: Vydavatelství CVUT, 1999.

Author index

| | | | |
|--------------------------|--------|-------------------------|--------|
| B | | V | |
| BABIUCH, Marek..... | 5 | VAGASKÁ, Alena..... | 85 |
| BARANOVÁ, Vladena | 14 | VASILEV, Andrey..... | 97 |
| C | | VÍTEČEK, Antonín | 104 |
| CRHA, Jan..... | 20 | VÍTEČKOVÁ, Miluše | 104 |
| F | | W | |
| FARANA, Radim | 25 | WAGNEROVÁ, Renata | 38, 97 |
| FOJTÍK, David..... | 34 | WALEK, Bogdan..... | 25 |
| FUTÓ, Jozef..... | 14 | Ž | |
| H | | ŽÁČEK, Jaroslav | 25 |
| HULKÓ, Gabriel | 60 | ŽIDEK, Kamil..... | 85 |
| HÝL, Radim | 38 | | |
| J | | | |
| JANEČKA, Patrik | 49 | | |
| JANOŠEK, Michal | 25 | | |
| L | | | |
| LANDRYOVÁ, Lenka..... | 14, 91 | | |
| LORENZ, Filip..... | 55 | | |
| M | | | |
| MAREŠ, Jan | 20 | | |
| MENDEL, Mário | 60 | | |
| MÉSZÁROS, Alajos | 60 | | |
| MOUČKA, Michal | 85 | | |
| O | | | |
| ÓHLSCHLÄGER Kamil..... | 68 | | |
| P | | | |
| PAWLENKA, Miroslav | 76 | | |
| PODEŠVA, Petr | 34 | | |
| Š | | | |
| ŠEMINSKÝ, Jaroslav..... | 68 | | |
| T | | | |
| TEICHMANN, Dušan..... | 55 | | |
| TÓTHOVÁ, Mária | 85 | | |
| ŤUPA, Ondřej..... | 20 | | |
| TŮMA, Jiří | 49, 76 | | |
| U | | | |
| URBAN, Patrik..... | 91 | | |

| | | |
|---------------------|---|-----|
| Autor: | Kolektiv autorů | |
| Editor: | Ing. Pavel Smutný, PhD. | |
| Katedra, institut: | Katedra automatizační techniky a řízení | 352 |
| Název: | XXXIX. Seminar ASR '2015 "Instruments and Control" | |
| Místo, rok, vydání: | Ostrava, 2015, 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 978-80-248-3744-4