

# **Identifikace a číslicové řízení procesů s dopravním zpožděním**

Ing. Stanislav Talaš, Ph.D.

Teze disertační práce



# Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

## Fakulta aplikované informatiky

Teze disertační práce

### **Identifikace a číslicové řízení procesů s dopravním zpožděním**

**Identification and digital control of processes with time-delay**

Autor: **Ing. Stanislav Talaš**

Studijní program: Inženýrská informatika P3902

Studijní obor: Automatické řízení a informatika 3902V037

Školitel: prof. Ing. Vladimír Bobál, CSc.

Oponenti: doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.  
prof. Ing. Milan Hofreiter, CSc.  
prof. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.

Zlín, listopad 2017

© Stanislav Talaš

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.  
Publikace byla vydána v roce 2017

*Klíčová slova: řízení procesů, dopravní zpoždění, číslicové systémy, Smithův prediktor, prediktivní řízení.*

*Key words: Process control, dead-time, identification, digital systems, Smith predictor, predictive control.*

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7454-708-9

## **ANOTACE**

Toto pojednání se zabývá možností využití současných znalostí v identifikaci a syntéze řízení technologických procesů k potlačení účinků dopravního zpoždění. Předkládá obecné principy řízení pomocí číslicových algoritmů a začlenění kompenzace dopravního zpoždění, která je úzce svázána s kvalitou celého regulačního pochodu. V neposlední řadě prozkoumává možnosti přesné identifikace zpoždění odezvy systémů.

### **Klíčová slova:**

*Řízení procesů, dopravní zpoždění, číslicové systémy, Smithův prediktor, prediktivní řízení.*

## **ANNOTATION**

The thesis addresses the option of using current knowledge in the identification and synthesis to suppress time-delay effects.

It assumes general control principles using numeric algorithms and including of time-delay compensation, which is closely connected with overall quality of the whole control process. And last but not least it studies possibilities of precise identification of the delay of system response.

### **Key words:**

*Process control, dead-time, identification, digital systems, Smith predictor, predictive control.*

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>5</b>
<b>CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE</b> .....	<b>6</b>
<b>1. LITERÁRNÍ REŠERŠE – ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU</b> .....	<b>7</b>
1.1 IDENTIFIKACE ZPOŽDĚNÍ .....	7
1.2 SYNTÉZA ŘÍZENÍ.....	8
<b>2. SOUČASNĚ POUŽÍVANÉ METODY – TEORETICKÝ ZÁKLAD</b> .....	<b>10</b>
2.1 MATEMATICKÝ POPIS .....	10
2.2 IDENTIFIKACE ZPOŽDĚNÍ .....	11
2.2.1 <i>Identifikační metody založené na parametrických modelech systému</i> 12	
2.2.2 <i>Identifikační metody založené na neparametrických modelech systému</i> .....	14
2.3 SYNTÉZA ŘÍZENÍ.....	15
2.3.1 <i>Smithův prediktor</i> .....	16
2.3.2 <i>Princip prediktivního řízení</i> .....	17
2.3.3 <i>Prediktivní řízení s modelem</i> .....	19
<b>3. PŮVODNÍ NAVRŽENÁ IDENTIFIKAČNÍ METODA</b> .....	<b>23</b>
3.1 ŘÍZENÍ ADAPTUJÍCÍ SE NA LIBOVOLNÉ DOPRAVNÍ ZPOŽDĚNÍ.....	27
<b>4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>29</b>
4.1 LABORATORNÍ MODEL TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU.....	29
4.2 TESTOVÁNÍ IDENTIFIKAČNÍ METODY.....	30
4.3 TESTOVÁNÍ REGULACE S ADAPTACÍ NA PROMĚNLIVÉ DOPRAVNÍ ZPOŽDĚNÍ.....	31
4.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	32
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>33</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE</b> .....	<b>34</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>36</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>37</b>
<b>PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA</b> .....	<b>38</b>
<b>PROFESNÍ ŽIVOTOPIS</b> .....	<b>40</b>

## Úvod

Termín dopravní zpoždění se v oblasti řízení procesů používá k popisu jevu zpožďujícího odezvu systému na vstupní veličinu. Takové systémy se vyskytují nejen v průmyslové praxi, ale i v řadě netechnických oblastí. Každý provedený zásah do procesu ovlivní řízenou veličinu až po čase zpoždění, a proto je analýza a syntéza regulátorů pro systémy se zpožděním obtížnější. I když v praxi lze mnoho dynamických systémů uspokojivě popsat s pomocí obyčejných diferenciálních rovnic vycházejících jen z nejnovějších hodnot, existují případy, kdy účinky zpoždění nelze zanedbat.

Vyskytuje se v řadě průmyslových systémů; může být způsobeno například transportem materiálu přes nezanedbatelné vzdálenosti, dobou odezvy senzoru nebo komunikační prodlevou, případně součtem časových intervalů, které jsou způsobeny větším množstvím dynamických elementů nižších řádů zapojených v sérii. Dopravní zpoždění tedy není vzácné a vzhledem k jeho častému výskytu je problematice s ním spojené věnována enormní pozornost.

Procesy s významným zpožděním je obtížné řídit pomocí běžných regulátorů. Stěžejní důvod spočívá v tom, že důsledky řízení se na systému po určitý čas neprojeví. Tato skutečnost koliduje se základním principem konvenčních regulátorů pracujících na základě zpětné vazby s následnou odezvou na svůj zásah do řízeného do systému.

## **Cíle dizertační práce**

Dizertační práce se zaměřuje na procesy s dopravním zpožděním, specificky na návrh diskretních metod pro jejich identifikaci a řízení. Hlavní důraz je kladen na kompenzační a prediktivní přístupy pro návrh číslicových regulátorů. Součástí návrhu je i ověření nových metod jak simulačně, tak i v laboratorních podmínkách.

Hlavní body práce jsou:

- Návrh číslicové metody identifikující dopravní zpoždění.
- Ověření navržené identifikační metody v simulačním prostředí.
- Sestavení vhodného postupu pro číslicové řízení systémů s dopravním zpožděním.
- Praktické ověření navržených řídicích metod v laboratorním prostředí.
- Zhodnocení získaných výsledků.

Výsledné metody budou porovnány se současně používanými postupy identifikace a řízení systémů s dopravním zpožděním.

# 1. Literární rešerše – zhodnocení současného stavu

Existuje řada důvodů pro neustálý rozvoj v oblasti dopravního zpoždění. Jde o aplikovanou problematiku v mnoha oblastech jako biologie, chemie, ekonomika, mechanika, fyzika, psychologie, populační dynamika stejně jako inženýrské vědy. Dále v oborech zabývajících se komunikací a v informačních technologiích jako stabilita systémů řízených po síti, vysokorychlostní komunikační sítě, paralelní výpočty, výpočetní časy v robotice a dalších. Systémy se zpožděním stále představují problém pro tradiční regulátory s rizikem oscilací a ztráty stability. Výzkum stále pokračuje převážně v oblastech s komplexními dopady, jako jsou silné nelinearity, zpoždění proměnné v čase a závislé na stavu systému (Jean-Pierre, 2003).

## 1.1 Identifikace zpoždění

Přesná identifikace dopravního zpoždění patří k nejvýznamnějším řešeným problémům v této oblasti. Nalezením vhodných algoritmů pro identifikaci systémů s dopravním zpožděním se zabývalo mnoho vědeckých prací, přesto neexistuje obecný postup pro určení parametrů systému a dopravního zpoždění. Častým problémem bývá nedostačující výpočetní rychlost a nutnost specifické formy vstupních signálů.

Jedním z běžně používaných postupů je identifikace modelu ve vstupně-výstupní formě za použití metody nejmenších čtverců (MNC) s iterativním určením zpoždění. Tato metoda využívá tradiční MNC pro identifikaci parametrů systému rozšířenou o hledání nejlépe odpovídající hodnoty zpoždění na základě naměřených dat. Tento postup je možné aplikovat rekurzivně jako součást adaptivního řízení (Elnaggar et al., 1989).

Další z existujících metod nabízí možnost identifikace zpoždění u systému prvního či druhého řádu ze dvou nebo tří charakteristických bodů odezvy na skok vstupního signálu. Přínosem je zjednodušení výpočetní náročnosti vzhledem k minimálnímu množství potřebných dat a rychlý odhad parametrů systému, který je současně odolný vůči šumu (Rangaiyah a Krishnaswamy, 1996).

S rozvojem operačně komplexnějších postupů se objevily hybridní metody jako například kombinace rekurzivní metody nejmenších čtverců (RMNC) identifikující parametry systému a genetického algoritmu, který provádí globální optimalizaci, kde určuje časově proměnné dopravní zpoždění systému. Vzhledem k úzkému zaměření populace genetického algoritmu bylo umožněno jeho použití při online identifikaci (Yang et al., 1997).

Pro identifikaci zpoždění ve frekvenční oblasti patří k běžným postupům vzájemná korelace pro dané rozsahy časových odstupů vstupního a výstupního signálu. (Guetbi et al., 1998) aplikovali vlnkovou transformaci k získání přesného odhadu zpoždění prostřednictvím polynomiální interpolace. Jednu



z inovací představuje obohacení postupu frekvenční analýzy o spojitou vlnkovou transformaci pro zvýšení efektivity (Ni et al., 2010).

Popis jevu dopravního zpoždění stále není jednotný. V hlavním vědeckém směru je zpoždění chápáno jako lineární parametr. Ve snaze o přesnější popis se objevila myšlenka, že jeho chování je nelineární a tedy by mělo být identifikováno nelineární metodou. Nový postup byl navržen na základě optimalizačního algoritmu a ten dokázal provést poměrně přesnou identifikaci konstantního dopravního zpoždění a projevil odolnost vůči okolnímu šumu (Bayrak a Tatlicioglu, 2011).

Alternativní přístup představuje identifikace dopravního zpoždění korelační analýzou vstupního a výstupního signálu (C. Knapp a G. Carter, 1976). Určuje tak provázanost mezi těmito dvěma signály. Tento postup pak určuje dobu zpoždění na základě maximální pravděpodobnosti. Tato technika se prokázala jako vhodná do prostředí s neměnnými, nebo pomalu se měnícími parametry.

## 1.2 Syntéza řízení

Systémy s dopravním zpožděním je obtížné řídit prostřednictvím tradičních regulátorů v uzavřeném regulačním obvodu, důvodem je především jejich princip založený na vyhodnocování řídicích zásahů na základě aktuální odezvy systému. U zpožděných systémů nemusí nutně existovat přímá souvislost mezi momentálně provedeným zásahem do systému a nadcházející regulační odchylkou. Výsledkem bývá nepřesné řízení s kmitavou tendencí, které při významnějším vlivu zpoždění přechází až do nestability. Zpožděná odezva systému tedy způsobuje zhoršení zpětnovazebního řízení.

Pro řízení systémů, jejichž dynamika se projevuje až po znatelné době, se v základní formě používá robustní nastavení spojitého PID regulátoru, pro dosažení přesnějších výsledků je nutné použít prediktivní řízení. Za první metodu z této oblasti je do jisté míry považován Smithův prediktor. Tato řídicí strategie může poskytnout lepší výsledky než PID regulátor, především v případech kdy dopravní zpoždění představuje výrazný prvek v dynamice systému. V průběhu vývoje se objevila řada návrhů pro nastavení jeho parametrů s cílem vylepšení možností regulátorů v oblastech kompenzace vnější poruchy nebo říditelnosti nestabilních procesů (Normey-Rico a Camacho, 2007).

Pro účely návrhu metod pro potlačení dopadů dopravního zpoždění v systémech vypracovali (Normey-Rico a Camacho, 2008) jednotný postup pro návrh kompenzátorů, založený na modifikované struktuře Smithova prediktoru umožňující určit, jestli je pro řízení daného systému podstatnější přesnost, nebo robustnost.

Dalším krokem v uplatnění znalostí o řízeném systému bylo plné začlenění jeho modelu přímo do řídicího algoritmu v podobě prediktivního řízení. Tato oblast se začala významně vyvíjet v sedmdesátých letech prostřednictvím heuristických iterativních algoritmů. První generace je reprezentována metodou DMC (Cutler a Ramaker, 1980), která přinesla inovativní přístup k řízení

komplexních procesů začleněním modelu systému pro odhad budoucího vývoje. Oproti výše zmíněným řídicím technikám založených na přímém zpracování signálu ze zpětné vazby je prediktivní řízení považováno za optimalizační úlohu. Původní účel DMC se soustředil na problematiku fyzikálně omezeného řízení o více proměnných, které se vyskytuje především v chemickém průmyslu. V průběhu let došlo k širokému rozvoji tohoto algoritmu, jeho modifikací a možností aplikace. Vývoj pokračoval rozšířením především v oblastech omezení vstupů a výstupů, robustnosti a ladicích parametrů. Dosud existuje snaha o snížení výpočetních nároků pomocí zjednodušení a pokročilých optimalizačních technik. (Garcia a Morshedi, 1986) poskytli využití kvadratického algoritmu pro efektivní manipulaci s omezeními, laděním a robustností. (Dougherty a Cooper, 2003) popsali přístup k ladění parametrů základního DMC algoritmu pro případ integračních procesů a rovněž navrhli adaptivní řízení pro nelineární procesy.

V průběhu let se vývoj technik kompenzace dopravního zpoždění rozšířil k vypořádání se s méně specifickými podmínkami jako proměnlivé dopravní zpoždění (Srinivasagupta et al., 2004).

## 2. Současně používané metody – teoretický základ

V následující kapitole budou probrány běžně používané metody v oblasti identifikace a kompenzace dopravního zpoždění. Vzhledem k existenci řady modifikací bude středem pozornosti princip jejich funkce a v případě řídicích metod i způsob řešení problematiky zpožděné odezvy systému.

### 2.1 Matematický popis

Matematická interpretace dopravního zpoždění vyjadřuje funkci, jejíž závislost na čase je posunuta o hodnotu zpoždění  $T_d$ . Ve spojitě reprezentaci má zpožděná funkce obecný tvar

$$f(t - T_d) \quad (2.1)$$

Povedením Laplaceovy transformace se získá obraz funkce (2.1) v komplexní rovině.

$$L\{f(t - T_d)\} = \int_0^{\infty} f(t - T_d) e^{-st} dt = e^{-sT_d} \cdot F(s) \quad (2.2)$$

Z hlediska popisu systému pak lze řízení zapsat ve formě Eulerova čísla se zápornou mocninou obsahující hodnotu zpoždění jako parametr u první mocniny komplexní proměnné  $s$ . Ve vstupně-výstupním popisu systému je zatížení dopravním zpožděním tedy obecně znázorněno přidáním členu  $z$  (2.2)

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} e^{-sT_d}, \quad (2.3)$$

kde

$$\begin{aligned} A(s) &= a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \\ B(s) &= b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

a  $T_d$  určuje dopravní zpoždění v čase.

V číslicovém vyjádření lze dopravní zpoždění zapsat pomocí operátoru zpětného posuvu  $z^{-i}$ , pro který obecně platí  $z^{-i} \cdot x(k) = x(k - i)$ , kde  $k$  a  $i$  jsou celá čísla reprezentující vzorkovací periodu. Přenos diskrétního tvaru systému s dopravním zpožděním (2.3) lze následně vyjádřit jako

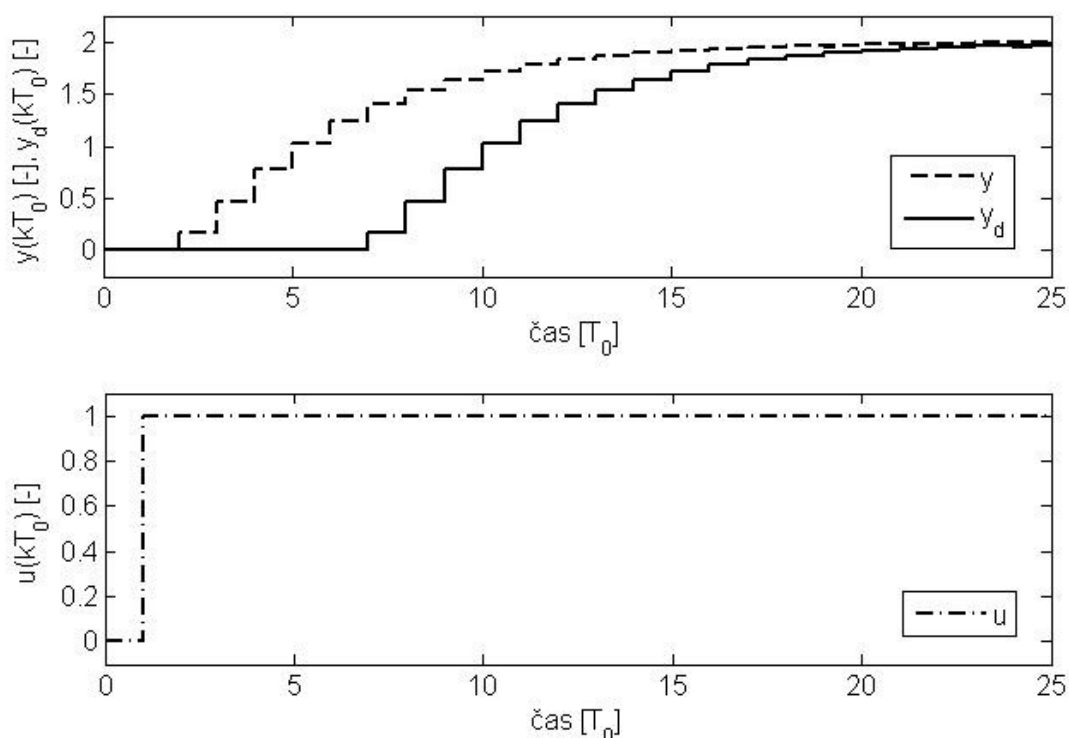
$$G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} z^{-d}, \quad (2.5)$$

kde

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m} \end{aligned} \quad (2.6)$$

a  $d$  vyjadřuje dopravní zpoždění ve vzorkovacích krocích systému.

Grafická interpretace chování systému s dopravním zpožděním je znázorněna na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Rozdíl odezvy na jednotkový skok  $u$  (čerchovaná čára) v systému bez zpoždění  $y$  (prerušovaná čára) a se zpožděním  $y_d$  (plná čára)

Dodatečně, z pohledu na stabilitu uzavřených regulačních systémů obecně platí, že dopravní zpoždění v takto řízených systémech způsobuje, že aplikace řídicí veličiny není synchronizovaná se stavem systému, což nejen snižuje kvalitu řízení, ale navíc způsobuje i nestabilní odezvu systému (Gu et al., 2003).

Zápis dopravního zpoždění se rovněž používá při aproximaci systémů vyšších řádů. Častým případem je zjednodušení systémů vyšších řádů aproximací systémy prvního, případně druhého řádu s dopravním zpožděním.

## 2.2 Identifikace zpoždění

Důležitost přesné identifikace zpoždění spočívá především v tom, že řada řídicích technik postrádá robustnost v oblasti zpoždění a i menší odchylky mohou vést k nestabilitě.

Pro správnou aplikaci kompenzačních technik je nutné určit čas dopravního zpoždění s největší možnou přesností. Existuje řada přístupů pro zjištění časového rozdílu mezi vstupem do systému a odpovídajícím výstupem. Jednotlivé metody bývají typově odlišné a vhodné pro velmi specifické druhy systémů. S tím jsou i spjaty podmínky jejich použití, jako například speciální druh či hodnota budícího signálu, nepřítomnost šumu nebo míra stability systému.

V základě je možné rozdělit identifikační metody podle množství potřebných dat na takové, které ke své funkčnosti vyžadují znalost některých ze zbylých parametrů systému a ty, které dokáží pracovat i bez znalosti charakteristických hodnot jeho dynamiky.

### 2.2.1 Identifikační metody založené na parametrických modelech systému

Tyto metody využívají znalost dynamiky systému k porovnání časové návaznosti v očekávané a skutečné odezvě na vstupní signál. Vzhledem ke znalosti pravděpodobného tvaru výstupu jsou tyto metody poměrně odolné vůči šumu, na druhou stranu často mají vysoké nároky na množství zpracovávaných dat. Další potenciální nevýhodou je skutečnost, že parametry systému nemusí být snadno zjištělné, případně se v průběhu regulace mění.

Klíčovým prvkem této skupiny metod je identifikace zpoždění s využitím informací o alespoň některých parametrech sledovaného modelu. Jsou tedy aplikovány v případech, že potřebné vlastnosti jsou známy.

Postup obecně vychází z aplikace naměřeného vstupního signálu na dynamiku systému při postupném začlenění série možných hodnot dopravního zpoždění. Výsledkem je řada odhadů vývoje veličiny, které jsou následně porovnávány s reálně naměřenými daty. Jako výstup identifikace je pak považována hodnota zpoždění, u které byla zjištěna nejmenší odchylka mezi odhadovaným a skutečným výstupem (Normey-Rico a Camacho, 2007).

Tradičním zástupcem této skupiny je metoda nejmenších čtverců, založená na principu lineární regrese. Vychází z formy diskrétního ARX modelu

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + e(k) \quad (2.7)$$

obsahujícího polynomy z výrazu (2.6), dopravní zpoždění vyjádřené v jednotkách vzorkovací periody proměnnou  $d$  a bílý šum popsany prvkem  $e(k)$ .

Uvažujme formulaci jednotlivých složek do následujících vektorů

$$\Theta = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_m] \quad (2.8)$$

$$\mathbf{f} = [-y(k-1) \ \dots \ -y(k-n) \ u(k-d-1) \ \dots \ u(k-d-m)]$$

Po sestavení řady vektorů  $\mathbf{f}$  pro jednotlivé periody až do stanovené hodnoty  $N$  vznikne matice  $\mathbf{F}$ .

$$\mathbf{F} = [\mathbf{f}(1) \ \mathbf{f}(2) \ \dots \ \mathbf{f}(N)]^T \quad (2.9)$$

Nahrazením prvků ze vztahu (2.7) vektory z (2.8) a maticí (2.9) a vyjádřením kvadrátu chyby a jeho minimalizací položením derivace podle  $\Theta$  rovnu nule se získá vztah pro jednorázovou identifikaci

$$\hat{\Theta} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{Y} \quad (2.10)$$

kde  $\hat{\Theta}$  je odhad parametrů a  $\mathbf{F}^T \mathbf{F}$  není singulární.

S mírnými modifikacemi lze tento postup aplikovat v průběhu regulace jako rekurzivní metodu nejmenších čtverců. Identifikace dopravního zpoždění je umožněna rozšířením algoritmu o stanovení odchylky od reálných dat. Princip následně spočívá v hledání modelu se stanoveným zpožděním, které vykazuje nejmenší chybu. Zvolený model a odpovídající dopravní zpoždění jsou výsledkem identifikace jako nejpřesnější dostupný popis. Tento postup lze opakovat v každé vzorkovací periodě, což umožňuje využití tohoto postupu v adaptivních systémech.

Pro daný rozsah předpokládané celočíselné hodnoty zpoždění  $d_{\min}$  a  $d_{\max}$  je prostřednictvím metody nejmenších čtverců (RMNČ) vytvořena řada modelů se stejnou strukturou a odlišnými parametry. Porovnáním odchylky mezi výstupem skutečného procesu a jednotlivými modely je pro každý z těchto modelů určen index chyby

$$I_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [y(t) - \hat{y}_i(t)]^2, \quad (2.11)$$

pro hodnoty zpoždění  $d = d_{\min} + i, i = 0, 1, 2, \dots, (d_{\max} - d_{\min})$ .

Jako nejpravděpodobnější výsledek je následně vybrán model s dopravním zpožděním odpovídajícím indexu chyby s nejnižší hodnotě. Výhodou jednoduchého principu určování zpoždění je, že nevyžaduje dodatečné parametry a je aplikovatelný i na jiné identifikační metody. Navíc tento postup zajišťuje odolnost proti rušení (Elnaggar et al., 1989).

Alternativní metodou pro nalezení odpovídajících parametrů z naměřených dat je optimalizace realizovaná například funkcí *fminsearch* v programu Matlab. Tato metoda je založena na statické optimalizaci a je známá jako Simplexová metoda neboli metoda pružných polyedrů. Pro jednotlivé iterace hodnot je v tomto případě prováděna zkouška přesnosti naměřených dat a výstupů vypočítaných ze získané přechodové funkce.

Příklad základní struktury programu pro identifikaci systému se zpožděním pomocí funkce *fminsearch* v prostředí Matlab:

Programový výpis 1: Identifikace zpoždění systému optimalizací v programu MATLAB

```
global t y u d
t = simout.time;
y = simout.signals.values(:,1);
u = simout.signals.values(:,2);
for d = 0:10
    [x J] = fminsearch(@krit, [1 1]);
    val(d+1) = [x J];
end
[z, d_opt] = min(val(:, 3));
G = tf(val(d_opt, 1), [val(d_opt, 2) 1], 'iodelay', d_opt-1);
```

## Programový výpis 2: Obsah souboru „krit.m“

```
function f = krit(x)
global t y u d
sys = tf(x(1), [x(2) 1], 'iodelay', d);
[y1, t1] = lsim(sys, u, t);
f = sum((y - y1).*(y - y1));
```

Princip spočívá ve zpracování naměřených vstupů a výstupů, na jejichž základě se odhadují parametry systému. Tyto odhady se provedou pro řadu potenciálních hodnot dopravního zpoždění, ze které se vybírá výsledek s nejmenší odchylkou od výstupních dat.

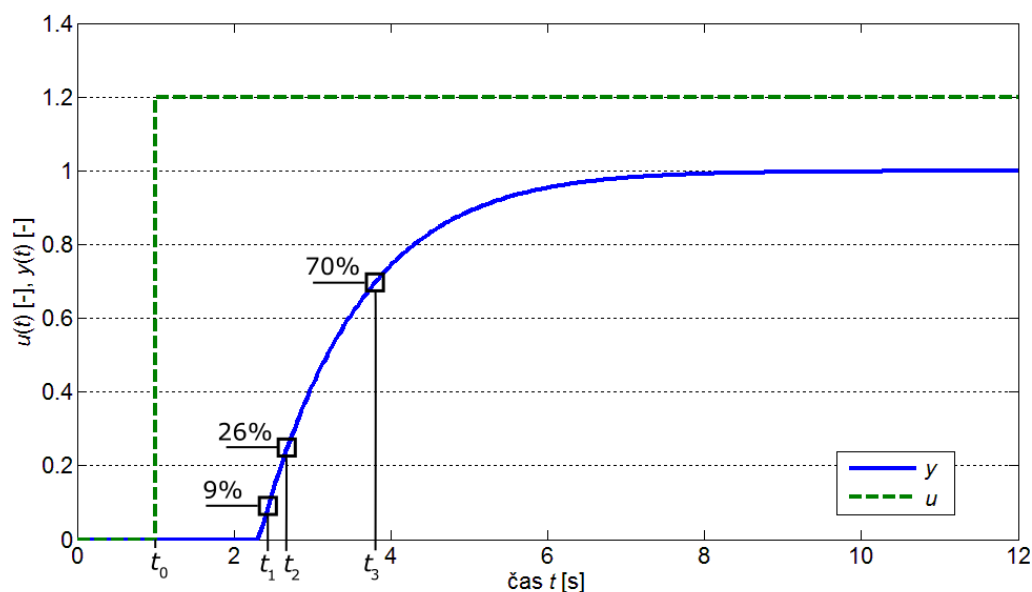
### 2.2.2 Identifikační metody založené na neparametrických modelech systému

Metody vycházející z grafických průběhů, či tabulkových vztahů určují dopravní zpoždění čistě prostřednictvím interpretace naměřených vstupních a výstupních hodnot.

Jedním příkladem může být tříbodová metoda, která je založena na měření časových úseků, kde přechodová charakteristika systému nabývá specifických hodnot. Výsledkem této metody je soustava druhého řádu s dopravním zpožděním popsaná následujícím vztahem

$$G(s) = \frac{K}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} e^{-sT_d} \quad (1.12)$$

Proměnná  $K$  reprezentuje zesílení systému,  $T_1$  a  $T_2$  jsou časové konstanty.



Obr. 1.2: Rozložení časových úseků ve tříbodové identifikaci

Na Obr. 1.2 je znázorněno, rozložení klíčových úseků přechodové charakteristiky pro identifikaci třibodovou metodou. Trvání od změny vstupního signálu v čase  $t_0$  do okamžiků dosažení 9%, 26% a 70% jsou označeny jako  $t_1$ ,  $t_2$  a  $t_3$ . Odvození parametrů systému poté probíhá podle následujících vztahů:

$$T_d = 2t_1 - t_2 \quad (1.13)$$

$$B = 0,83t_3 - 0,24t_2 + 0,48t_1 - T_d \quad (1.14)$$

$$C = 4(t_2 - t_1)^2 \quad (1.15)$$

$$T_1 = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4C}}{2} \quad (1.16)$$

$$T_2 = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4C}}{2} \quad (1.17)$$

$$K = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} \quad (1.18)$$

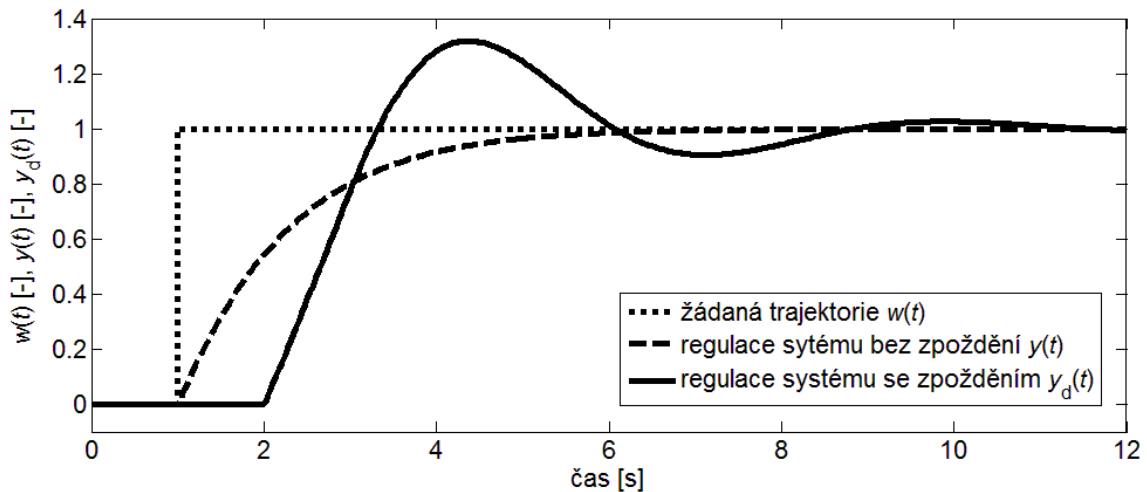
Třibodová metoda vyžaduje přechod systému z jednoho ustáleného stavu do druhého v odezvě na jedinou skokovou změnu v řídicím signálu. Toto omezení zabraňuje aplikaci metody v průběhu regulace (Matějček, 2012).

### 2.3 Syntéza řízení

Přítomnost dopravního zpoždění v uzavřeném řídicím obvodu způsobuje degradaci zpětné vazby vzhledem k časovému posuvu zpracovávaných signálů. Při návrhu řízení pro systémy s dopravním zpožděním přetrvává snaha maximálně využít tradiční postupy a algoritmy, obohacené o mechanismy potlačující dopady způsobené přítomností zpoždění.

Na obrázku 2.2 je příklad poklesu kvality řízení v uzavřeném regulačním obvodu řízeném PID regulátorem při stejných parametrech bez zpoždění a s dopravním zpožděním odezvy systému o velikosti 1 vteřiny. Vlivem dopravního zpoždění je v první řadě opožděn i celkový výstup z regulačního obvodu. Tato skutečnost je pevně daná povahou zpoždění a není možné ji ovlivnit. Další efektem je celkové zhoršení přesnosti regulované veličiny. Tento dopad je možné zmírnit až potlačit pomocí vhodných regulačních postupů.



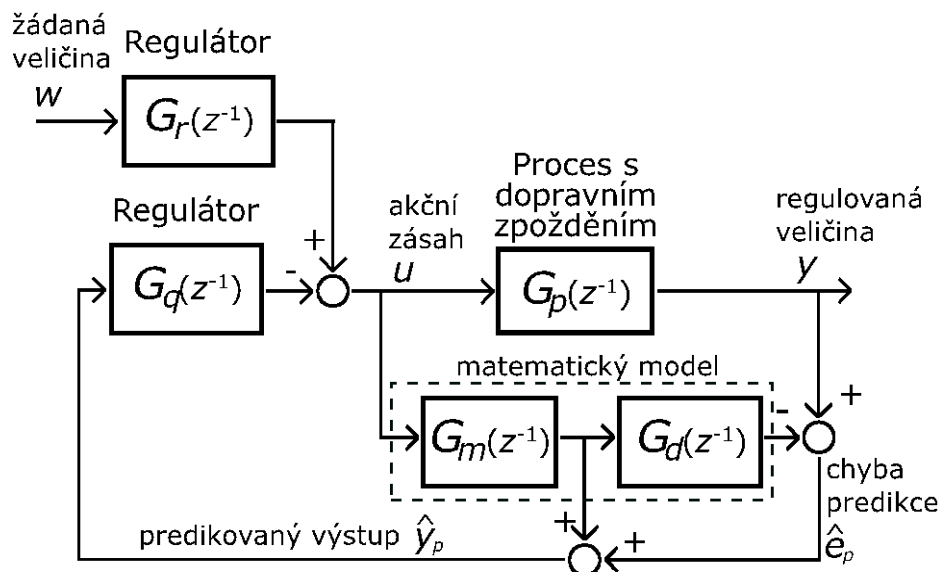


Obr. 2.2: Spojitá odezva uzavřeného regulačního obvodu s PID regulátorem bez zpoždění (přerušovaná čára) a se zpožděním 1 vteřiny (plná čára)

V následujících podkapitolách budou rozebrány některé častěji používané přístupy k číslicovému řízení systémů s dopravním zpožděním.

### 2.3.1 Smithův prediktor

Diskrétní provedení Smithova prediktoru a jeho modifikace jsou vhodnější pro potlačení dopravního zpoždění v průmyslové praxi.



Obr. 2.3: Základní schéma Smithova prediktoru v provedení se dvěma stupni volnosti (2DOF)

Obrázek 2.3 obsahuje blokový diagram Smithova prediktoru. Matematický model je simulovanou součástí řídicího algoritmu, která poskytuje zpětnou vazbu systému nezátíženou dopravním zpožděním. Blok  $G_m(z^{-1})$  reprezentuje dynamiku procesu bez dopravního zpoždění a kalkuluje predikce otevřené

smyčky. Blok  $G_d(z^{-1})$  je použit pro kompenzaci externí poruchy a chyby v modelu. Jednotlivé bloky pro řízení systému druhého řádu mají tvar

$$G_p(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} z^{-d}, \quad G_m(z^{-1}) = \frac{(b_1 + b_2) z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}},$$

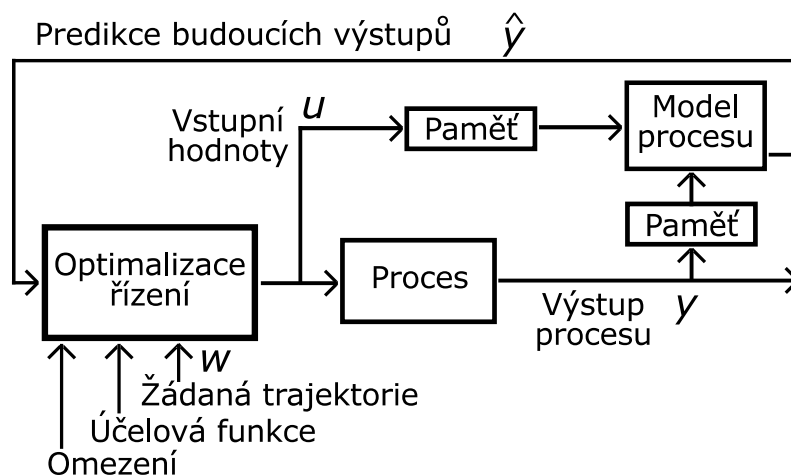
$$G_d(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{(b_1 + b_2) z^{-1}} z^{-d} \quad (2.14)$$

Čitatel bloku  $G_m$  obsahuje statické zesílení původního čitatele, aby byly případně odstraněny problémy řízení neminimálně fázového systému.

Tento přístup k potlačení dopravního zpoždění není sám o sobě regulátorem, ale jedná se spíše o řídicí schéma, které umožňuje do jisté míry obejít negativní aspekty se zpožděním spojené. Samotný regulátor  $G_r(z^{-1})$  může mít formu tradičních řídicích metod, které lze aplikovat bez významného poklesu kvality. K často aplikovaným metodám návrhu řízení patří PID schéma, metoda umístění pólů, nebo lineární kvadratické řízení. Pro správnou funkčnost se předpokládá maximální přesnost vnitřního modelu, v případě výrazných odlišností ztrácí kompenzační postup svou efektivitu (Normey-Rico a Camacho, 2007), (Bobál et al., 2011a).

### 2.3.2 Princip prediktivního řízení

Ve své tradiční podobě má prediktivní řízení obdobný princip jako Smithův prediktor. Využívá vnitřního modelu sestaveného podle vlastností systému k odhadu budoucího rozvoje výstupní veličiny. Nicméně oproti tradičním řídicím přístupům jde v tomto případě spíše o optimalizační úlohu. Regulátor neupravuje hodnotu příchozí ze zpětné vazby v jediném matematickém výrazu, ale na základě formulace kvality řízení a stanovených omezení veličin hledá nejvhodnější možné řešení.



Obr. 2.4: Schéma prediktivního řízení

Postup řešení je naznačen ve schématu prediktivního řízení na obrázku 2.4. Výstup z řízeného procesu je na základě vnitřního modelu rozveden na odhad budoucího rozvoje, ten je následně porovnán s žádanou trajektorií a účelem

optimalizačního postupu je vyhledání nejvhodnější posloupnosti řídicích zásahů pro dosažení maximální kvality řízení (Normey-Rico a Camacho, 2007).

Cílem optimalizace je minimalizace takzvané účelové funkce

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} \delta(i) [\hat{y}(k+i) - w(k+i)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \lambda(i) [\Delta u(k+i-1)]^2, \quad (2.15)$$

ve které jsou stanovena kritéria řídicího algoritmu. Ve své obecné formě tato funkce obsahuje druhou mocninu rozdílu mezi odhadovaným budoucím vývojem výstupní veličiny a budoucí žádanou trajektorií. Dalším prvkem bývá výraz snižující nároky na akční veličinu, vyjádřený ve formě druhé mocniny změny akční veličiny od předešlé hodnoty.

Účelová funkce je často doplněna o prvky upřesňující požadované chování regulátoru. Pro ovlivnění rovnoměrné optimalizace přítomných prvků jsou přítomny váhové parametry  $\delta$  a  $\lambda$ , vyjadřující význam daného členu. Tyto hodnoty mohou být konstantní, nebo se měnit s ohledem na vzdálenost od současného stavu. Časový rozsah, ve kterém se provádí optimalizační úloha je určen hodnotami  $N_1$ ,  $N_2$  a  $N_u$ .  $N_1$  a  $N_2$  jsou minimální a maximální horizont vymezující prostor pro výpočet odhadované přesnosti budoucích výstupů.  $N_u$  je řídicí horizont udávající hranici pro minimalizaci změn akčních zásahů.

Odhad budoucího vývoje výstupní veličiny se počítá na základě parametrů modelu systému. Využívá hodnot předchozích řídicích signálů pro predikci výstupní veličiny za předpokladu, že budoucí řídicí hodnoty by byly konstantní. Na základě principu superpozice je možné k tomuto výsledku přičíst rozvoj výstupní veličiny řízený sérií vstupů, která je předmětem optimalizace. Celková predikce

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (2.16)$$

je tedy součtem volné odezvy  $\mathbf{f}$  s konstantním zásahem z předchozího kroku a nucené odezvy  $\mathbf{G}\mathbf{u}$  vzniklé z vypočítané série zásahů.

Výsledkem optimalizační úlohy je pak série akčních zásahů, která poskytne nejlepší dostupný výsledek řízení. Z této série je aplikována pouze první hodnota jako změna aktuálního akčního zásahu a v následující vzorkovací periodě se celý postup opakuje. Toto je nazýváno strategie klouzavého horizontu.

Možnost dodatečného přínosu ke kvalitě řízení představuje skutečnost, že součástí účelové funkce (2.15) může být i budoucí vývoj žádané trajektorie. Pokud je tato trajektorie známá, pak optimalizační proces nemusí pracovat s konstantní žádanou hodnotou, ale může predikovat řídicí veličinu s ohledem na požadované změny, ke kterým teprve dojde. Tento postup umožňuje dosáhnout maximální přesnosti řízení, za podmínek stanovených pro optimalizaci.

### **Dynamická řídicí matice**

Prvotní metodou reprezentující prediktivní principy v této podobě se stala dynamická řídicí matice (DMC). Dodnes patří k nejrozšířenějším prediktivním

metodám v průmyslu vzhledem ke snadnému začlenění omezení řízených veličin. Jako vnitřní model procesu slouží přechodová funkce

$$y(k) = y_0 + \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(k-i) = G(z^{-1})(1-z^{-1})u(k) \quad (2.17)$$

a poruchová veličina je považována za konstantní po celou délku procesu a předpokládá se rovnost rozdílů mezi výstupy procesu a modelu. Velikost zpoždění je začleněna do popisu prostřednictvím nulových prvků  $g_i$ . Na základě modelu lze stanovit postup pro výpočet odhadů budoucích hodnot

$$\hat{y}(k+j) = \sum_{i=1}^j g_i \Delta u(k+j-i) + y(k) + \sum_{i=1}^M (g_{j+i} - g_i) \Delta u(k-i) \quad (2.18)$$

kde  $M$  vyjadřuje počet vzorkovacích period potřebných k ustálení přechodové funkce. Pokud tedy proces není stabilní, nelze metodu DMC aplikovat.

Sestavením výrazu (2.18) do vektoru predikcí výstupních hodnot se vytvoří vztah

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{H}\mathbf{u}_1 + \mathbf{S}\mathbf{y}_1 \quad (2.19)$$

formulující obecný tvar predikce (2.16) s volnou odezvou tvořenou pomocí matic  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{S}$  s korespondujícími hodnotami předchozích změn v akčním zásahu  $\mathbf{u}_1$  a předpokládaným výstupem bez zpoždění  $\mathbf{y}_1$ .

Následuje řešení optimalizačního problému, který hledá minimum účelové funkce (2.10) při podmínkách stanovených predikcí (2.19). Pokud není uvažována přítomnost fyzikálních omezení, lze řešení zjednodušit na jedinou matici zesílení  $\mathbf{K}$  získanou položením derivace vztahu (2.19) podle vektoru akčních zásahů rovnou nule

$$\mathbf{u} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \mathbf{Q}_\lambda)^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{f} - \mathbf{w}) = \mathbf{K}(\mathbf{f} - \mathbf{w}) \quad (2.20)$$

kde  $\mathbf{Q}_\lambda$  je váhová matice určující poměr optimalizace vyjádřený hodnotou  $\lambda$  z účelové funkce (2.15) a  $\mathbf{w}$  je vektor budoucích referenčních hodnot. Výsledný vektor je sérií změn řídicích vstupů  $\Delta u$  vypočítaných pro optimální regulaci za podmínek daných účelovou funkcí.

Metoda DMS byla aplikována jak simulačně, tak i při řízení laboratorního modelu v reálném čase (Talaš a Bobál, 2014).

### 2.3.3 Prediktivní řízení s modelem

Zobecněné prediktivní řízení (GPC) představuje flexibilní řídicí metodu použitelnou pro většinu systémů. Přenosová funkce typu CARIMA

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})z^{-d}u(k-1) + C(z^{-1})\frac{e(k)}{\Delta} \quad (2.21)$$

umožňuje aplikaci na libovolný lineární systém a potlačení vnější poruchy (Talaš, 2013). Na základě vnitřního modelu za předpokladu, že budoucí hodnota šumu je nulová, pak predikci pro systémy zatížené dopravním zpožděním lze formulovat ve tvaru

$$\hat{y}(k+1) = \sum_{i=1}^{n+1} \tilde{a}_i y(k+1-i) + \sum_{i=1}^m b_i \Delta u(k-d-i) \quad (2.22)$$

Tento vztah se dá použít pro rekurzivní výpočet predikcí budoucích hodnot na požadovaném horizontu. Protože jde o proces s dopravním zpožděním, je první uvažovaná predikce  $\hat{y}(k+d+1)$ . Vektorový zápis predikce nadcházejících hodnot vychází z výrazu (2.20) sestaveného do sekvenční formy s oddělenými minulými a budoucími hodnotami a má tvar

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{H}\mathbf{u}_1 + \mathbf{S}\mathbf{y}_1 \quad (2.23)$$

Vektory hodnot minulých vstupů  $\mathbf{u}_1$  a výstupů  $\mathbf{y}_1$  jsou vymezeny podle řádu polynomů přenosové funkce. Korespondující matice  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{S}$  opět reprezentují volnou odezvu systému. Součin dynamické matice  $\mathbf{G}$  a vektoru budoucích vstupů  $\mathbf{u}$  vypočítává nucenou odezvu systému. Při rozepsání formy (2.23) pro systém druhého řádu a 3 kroky predikce získáme

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{y}(k+d+1) \\ \hat{y}(k+d+2) \\ \hat{y}(k+d+3) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} g_1 & 0 \\ g_2 & g_1 \\ g_3 & g_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{31} & h_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \Delta u(k-2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{y}(k+d) \\ \hat{y}(k+d-1) \\ \hat{y}(k+d-2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Pro určení dodatečných hodnot vektoru  $\hat{\mathbf{y}}$  lze aplikovat vzorec (Bobál, 2008)

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+d+i) &= (1-a_1)\hat{y}(k+d+i-1) + (a_1-a_2)\hat{y}(k+d+i-2) + \\ &+ a_2\hat{y}(k+d+i-3) + b_1\Delta u(k+i-1) + b_2\Delta u(k+i-2) \end{aligned} \quad (2.25)$$

Vztah (2.23) se aplikuje v průběhu optimalizace účelové funkce pro získání série optimálních akčních zásahů (Bobál et al., 2013).

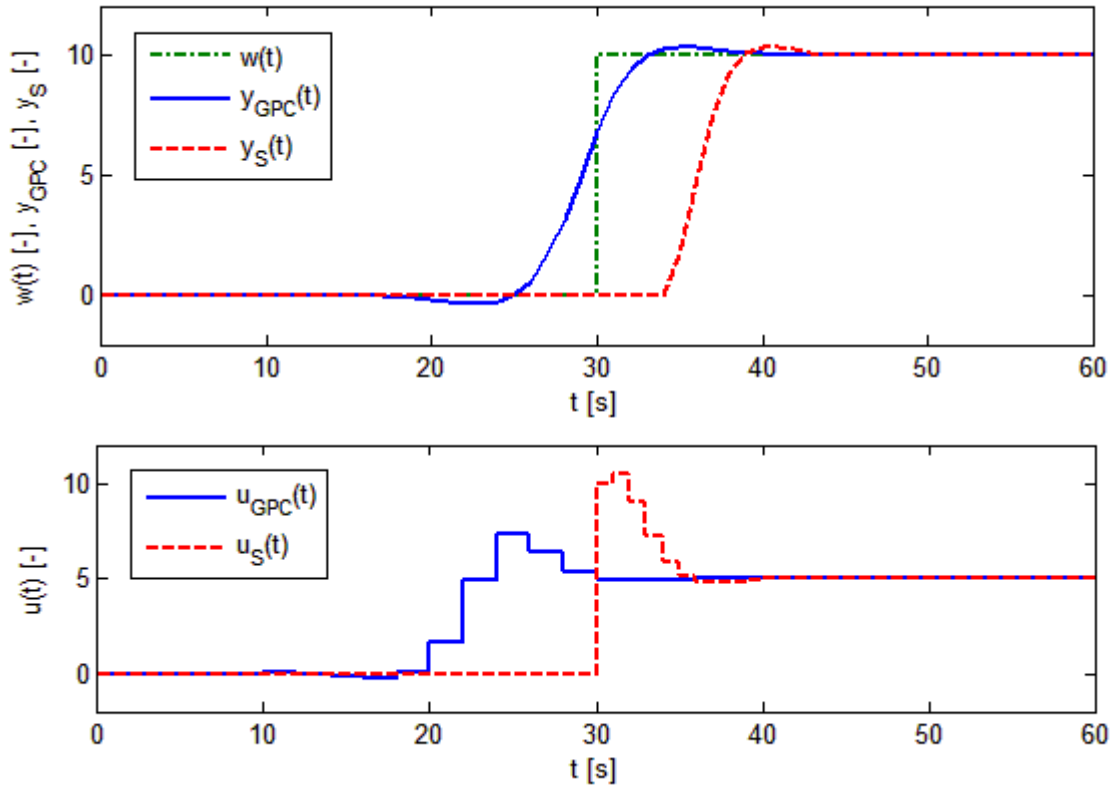
Pro porovnání jednotlivých průběhů regulace použitím Smithova prediktoru a metody GPC byl zvolen následující spojitý model systému druhého řádu

$$G(s) = \frac{2}{(s+1)(4s+1)} e^{-4s} \quad (2.26)$$

kde dopravní zpoždění  $T_d = 4s$ .

Potom její diskrétní verze pro periodu vzorkování  $T_0 = 2s$  je ve tvaru

$$G(z^{-1}) = \frac{0,4728z^{-1} + 0,2076z^{-2}}{1 - 0,7419z^{-1} + 0,08208z^{-2}} z^{-2} \quad (2.27)$$



Obr. 2.5: Porovnání regulace systému s dopravním zpožděním prostřednictvím Smithova prediktoru a GPC

Obrázek 2.5 znázorňuje rozdíly v průběhu řízení mezi Smithovým prediktorem a moderní prediktivní metodou GPC. Výrazný vliv má využití znalosti budoucí požadované trajektorie, které urychluje přechod mezi jednotlivými referenčními hodnotami. Počáteční podkmit v regulaci GPC z optimalizačního hlediska umožňuje, aby následoval výrazný zásah do systému při zachování plynulejší změny v řídicí veličině.

Pro použití prediktivního řídicího postupu v systémech s dopravním zpožděním je nezbytné modifikovat postup výpočtů. To se provede začleněním dopravního zpoždění přímo do vnitřního modelu jako součást chování systému. To pro případ systému druhého řádu se zpožděním vede na následující formu predikce.

$$\hat{y}(k+1) = (1-a_1)y(k) + (a_1-a_2)y(k-1) + a_2y(k-2) + b_1\Delta u(k-d) + b_2\Delta u(k-1-d) \quad (2.28)$$

V průběhu vytváření predikcí je tedy počítáno i s dopadem zpoždění na vývoj výstupní veličiny. Údaje o výstupním signálu, které ještě nebyly zaznamenány vlivem zpoždění lze doplnit použitím dat z vnitřního modelu. Dále není nutné, aby optimalizační proces obsahoval i hodnoty výstupní veličiny, které nelze z důvodu přítomnosti zpoždění ovlivnit. Toho je dosaženo zmenšením intervalu

minimalizovaných dat posunem minimálního horizontu  $N_1$  o počet kroků zpoždění  $d$ .

Metoda GPC byla aplikována jak simulačně, tak i při řízení laboratorního modelu v reálném čase (Talaš, 2013).

Podstatnou nevýhodou prediktivní regulace je obecně vysoká výpočetní náročnost způsobená optimalizační úlohou prováděnou při každé vzorkovací periodě. Snaha oddělit nejnáročnější výpočty od časově často omezené oblasti vedla k návrhu explicitní verze prediktivního regulátoru. V tomto přístupu se zpracuje známá dynamika systému, ze které se odvodí akční zásahy pro návrat z okolních stavů do pracovního bodu systému před samotným začátkem regulace. Tato počáteční fáze vytvoří geometrická interpretace závislosti změny akčního zásahu na veličinách definujících stav systému. S ohledem na parametry systému je tento graf tvořen určitým počtem segmentů aproximujících hodnoty v blízké oblasti do linie či plochy. Vhodným matematickým nástrojem této problematiky je vícekritériální programování.

Prediktivní řízení tvoří oblast regulačních metod poskytujících maximální přesnost a modifikovatelných množstvím dodatečných parametrů jako fyzikální omezení, nelineární řízení, kompenzace poruchy a dopravního zpoždění. Cenou za tyto možnosti jsou vysoké požadavky na výpočetní sílu a tedy i omezení hardwaru a systémů, na které jej lze aplikovat.

### 3. Původní navržená identifikační metoda

Pro návrh identifikační metody byly vyšetřovány doposud publikované metody, které předpokládají znalost modelu bez dopravního zpoždění. Tento přístup je vhodný pro systémy s invariantními parametry, u kterých může průběžně docházet ke změně dopravního zpoždění například vlivem vnější poruchy.

Pro přesnější určení dopravního zpoždění, než jaké umožňuje vzorkování číslicového systému, bývá používána interpolace kritéria přesnosti (Ferretti et al., 1991). Tento postup i přes jistou úspěšnost odhadu nedokáže plně vystihnout vývoj dynamiky systému v závislosti na dopravním zpoždění. Zde navrhuji postup, který vedle odhadů na základě zadaného vnitřního modelu dále odvodí i model téhož systému se sníženou vzorkovací periodou. Matematický popis tak nabízí hustší pokrytí pohybu výstupní veličiny systému v diskretním vyjádření.

Odhad chování vychází ze vztahu predikce výstupu systému. Protože jsou zpracovávána již zaznamenaná data, vymezuje predikční horizont oblast minulých hodnot až do současnosti.

$$\begin{aligned} \hat{y}(k-i) &= -a_1 y(k-1-i) - a_2 y(k-2-i) + \\ &+ b_1 u(k-1-i-d) + b_2 u(k-2-i-d) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$i = N-1, N-2, \dots, 0$$

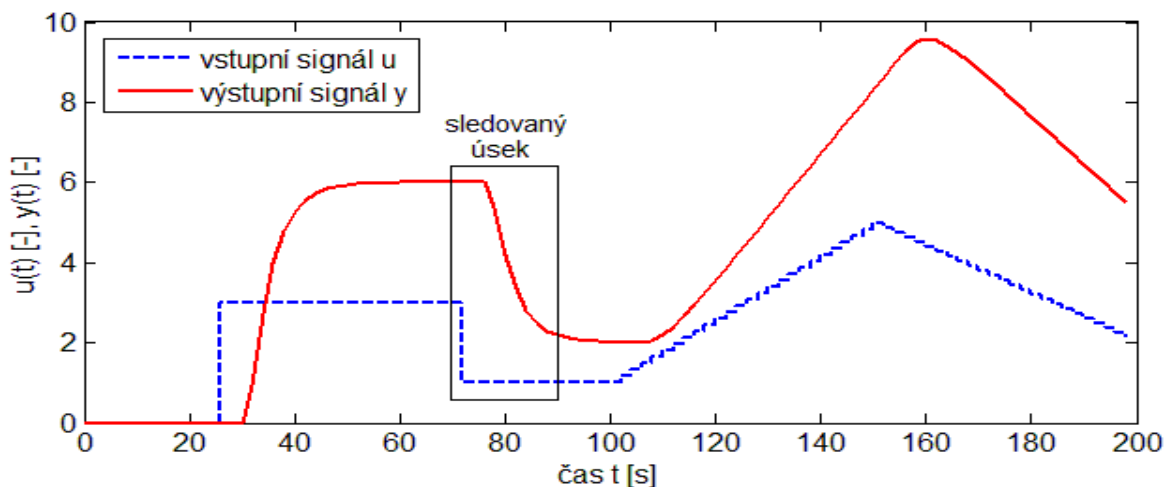
Funkčnost navržené identifikační metody je demonstrována na systému druhého řádu

$$G(s) = \frac{0,5}{s^2 + 1,25s + 0,25} e^{-4,5s} \quad (3.2)$$

s hodnotou dopravního zpoždění 4,5s. V diskretním vyjádření má systém bez dopravního zpoždění se vzorkováním  $T_0 = 2$  s následující tvar

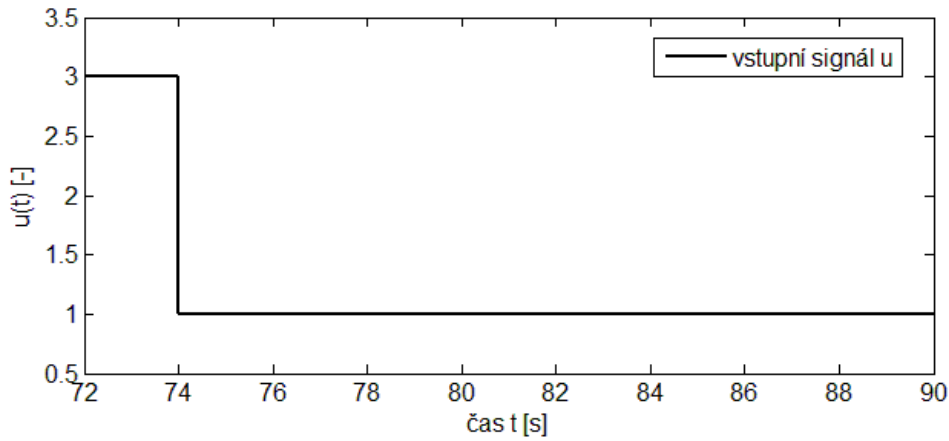
$$G(z^{-1}) = \frac{0,4728z^{-1} + 0,2076z^{-2}}{1 - 0,7419z^{-1} + 0,0821z^{-2}} \quad (3.3)$$

který je vybuzen vstupním signálem  $u$  podle Obrázku 3.1.



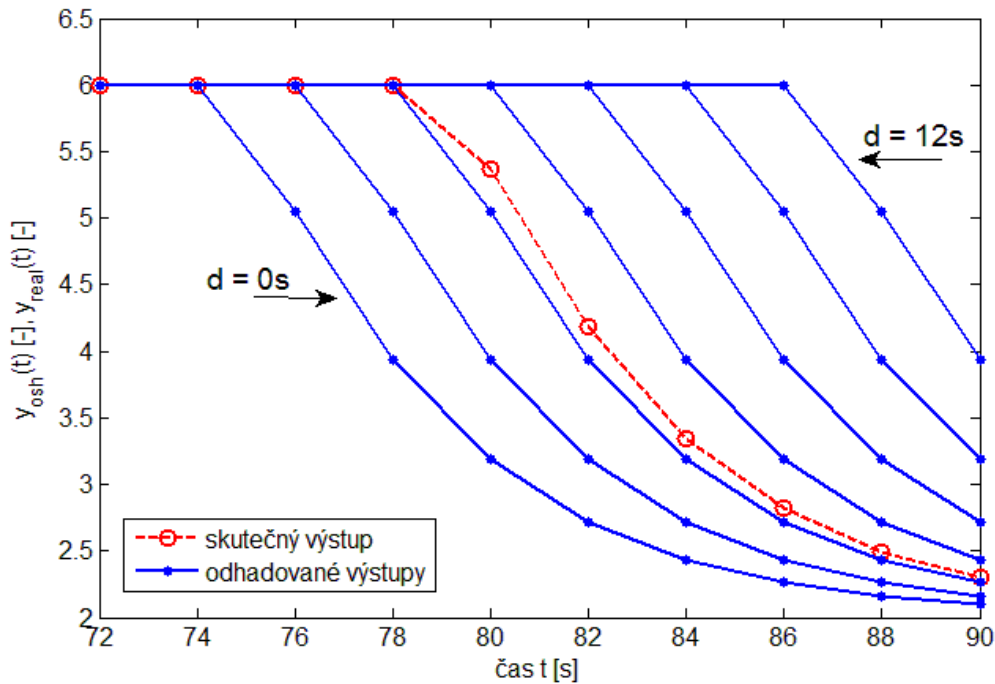
Obr. 3.1: Průběh vstupních a výstupních dat pro odvození dopravního zpoždění





Obr. 3.2: Průběh vstupního signálu v intervalu 72 s až 90 s

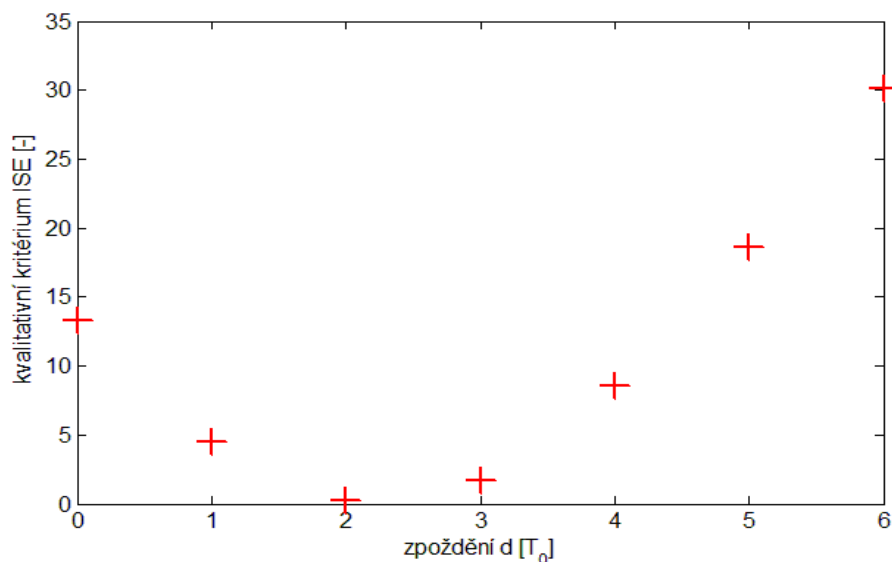
Provedeme identifikaci použitím dat z Obrázku 3.1 v čase 90 s. Průběh vstupního signálu je znázorněn na Obrázku 3.2 v příslušném intervalu od 72 s do 90s. Pro možné celočíselné hodnoty zpoždění v rozsahu 0 až 6 kroků vzorkování, získáme sérii možných výstupů.



Obr. 3.3: Výstupy systému pro různé hodnoty dopravního zpoždění

Na Obrázku 3.3 je znázorněna série možných výstupů odpovídající jednotlivým hodnotám zpoždění. Tyto výstupy jsou následně porovnány s naměřenými hodnotami prostřednictvím kvalitativního kritéria ISE.

$$ISE = \sum_{k=1}^T [w(k) - y(k)]^2 \quad (3.4)$$

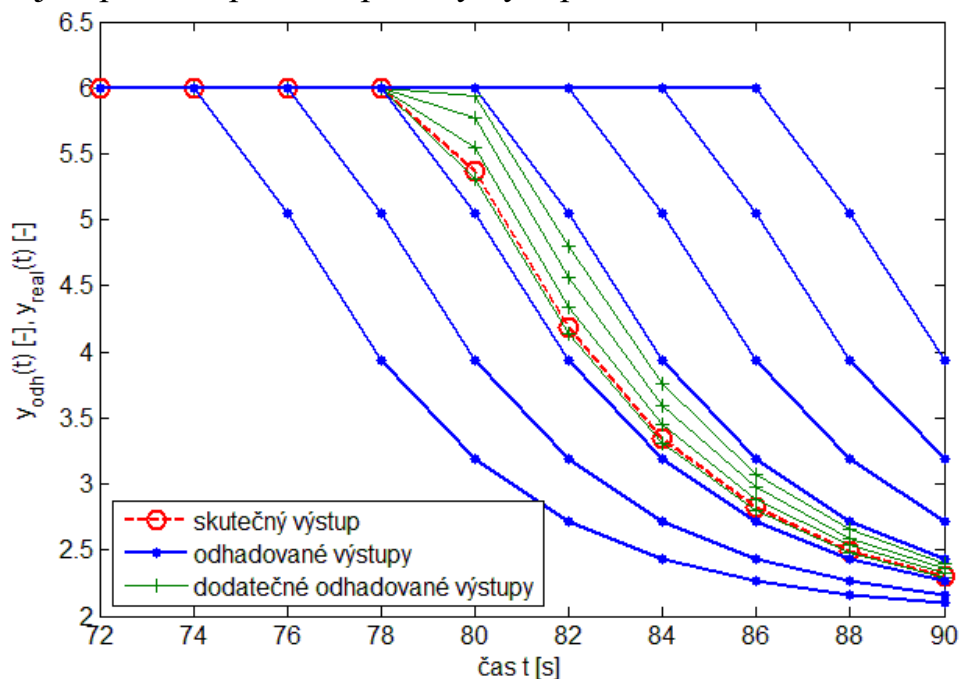


Obr. 3.4: Závislost kvalitativního kritéria na hodnotě zpoždění vnitřního modelu

Oblast v okolí nejnižších hodnot určuje skutečné zpoždění sledovaného systému. Pro upřesnění výsledku je z původního modelu (3.3) odvozena verze s pětkrát nižší periodou vzorkování  $T_0$ , tedy 0,4s.

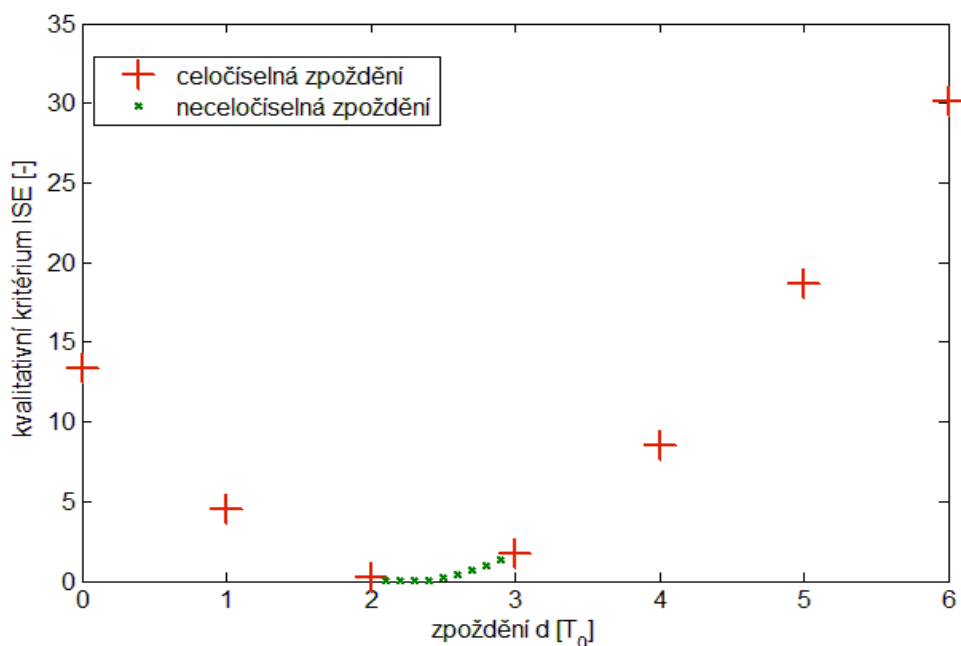
$$G_{\text{mod}}(z^{-1}) = \frac{0,03399z^{-1} + 0,02875z^{-2}}{1 - 1,575z^{-1} + 0,6066z^{-2}} \quad (3.5)$$

Identifikační algoritmus se zopakuje pro stejná zdrojová data s novým matematickým modelem (3.5) pro odvození průběhu výstupu. Dopravní zpoždění je z pohledu původní periody nyní považováno za neceločíselné.



Obr. 3.5: Výstupy systému rozšířené o neceločíselné hodnoty zpoždění

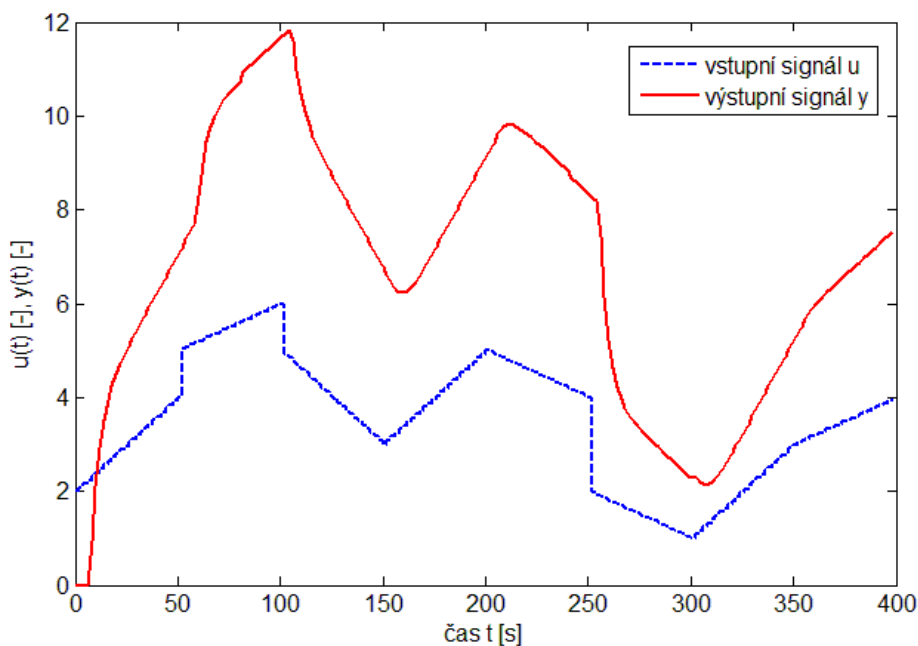
Tímto způsobem lze oblast s nejpravděpodobnějším výskytem skutečné hodnoty zpoždění doplnit kritériální Obrázek 3.5 o hodnoty nezjistitelné s původním vzorkováním. Množství dat je určeno sníženou vzorkovací periodou modelu. Počet kroků zpoždění se stále vztahuje k původní periodě.



Obr. 3.6: Rozšířená závislost kvalitativního kritéria na zpoždění

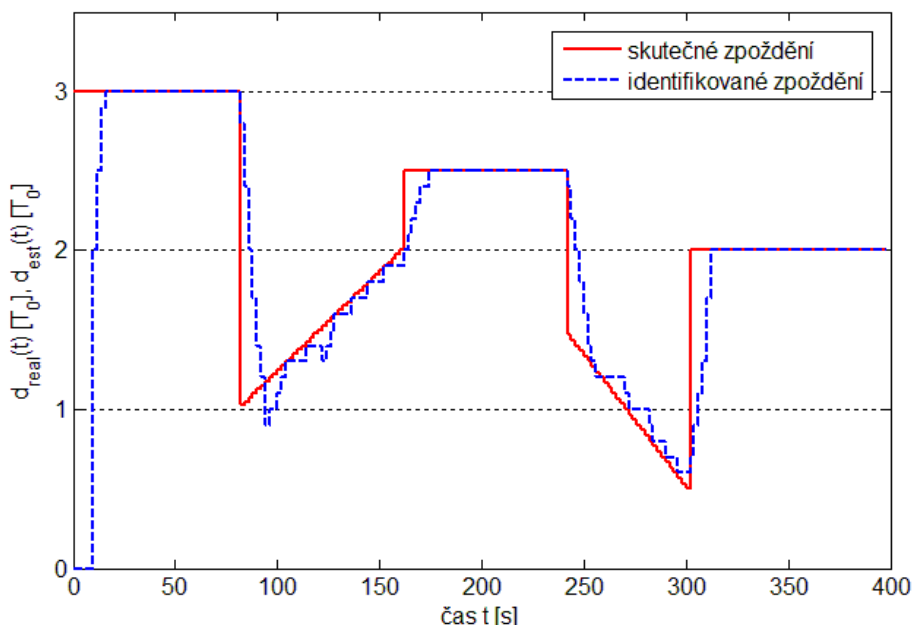
Určením minimální hodnoty z Obrázku 3.6 je získán výsledek 2,25 vzorkovací periody jako nejpravděpodobnější hodnota dopravního zpoždění.

Pro ověření aplikace v průběhu regulačního procesu byla sestavena simulace s budícím vstupním signálem  $u$  tvarovaným v prostředí programu Matlab blokem „Repeating sequence“ pro konstantní změnu k zajištění variabilních dat.



Obr. 3.7: Zdrojová data pro identifikaci

Dalším krokem bylo začlenění možnosti aplikace metody v průběhu řízení. Aplikovatelnost identifikace v průběhu procesu umožňuje provádět identifikaci na základě průběžně přicházejících dat a tak identifikovat proměnné zpoždění.



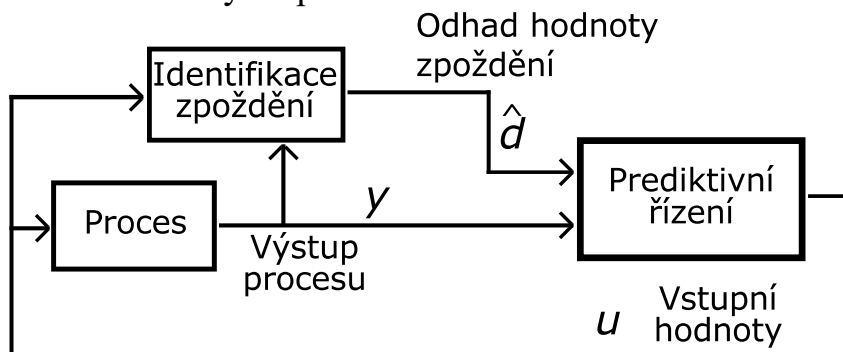
Obr. 3.8: Průběžná identifikace měnícího se dopravního zpoždění

Obrázek 3.8 znázorňuje identifikaci průběžně se měnícího dopravního zpoždění na základě analýzy vstupních a výstupních signálů. Rychlost stanovení doby zpoždění závisí především na délce prediktivního horizontu. Negativní dopady jsou nejvíce patrné v oblasti konstantní změny zpoždění.

Protože aplikovaná rovnice pro predikci pracuje pouze s konstantní hodnotou zpoždění, v oblasti kde se tento parametr mění, může docházet k nepřesnostem. Tento jev lze omezit zmenšením oblasti predikce, která se vyhodnocuje, což na druhou stranu snižuje odolnost algoritmu vůči poruchám.

### 3.1 Řízení adaptující se na libovolné dopravní zpoždění

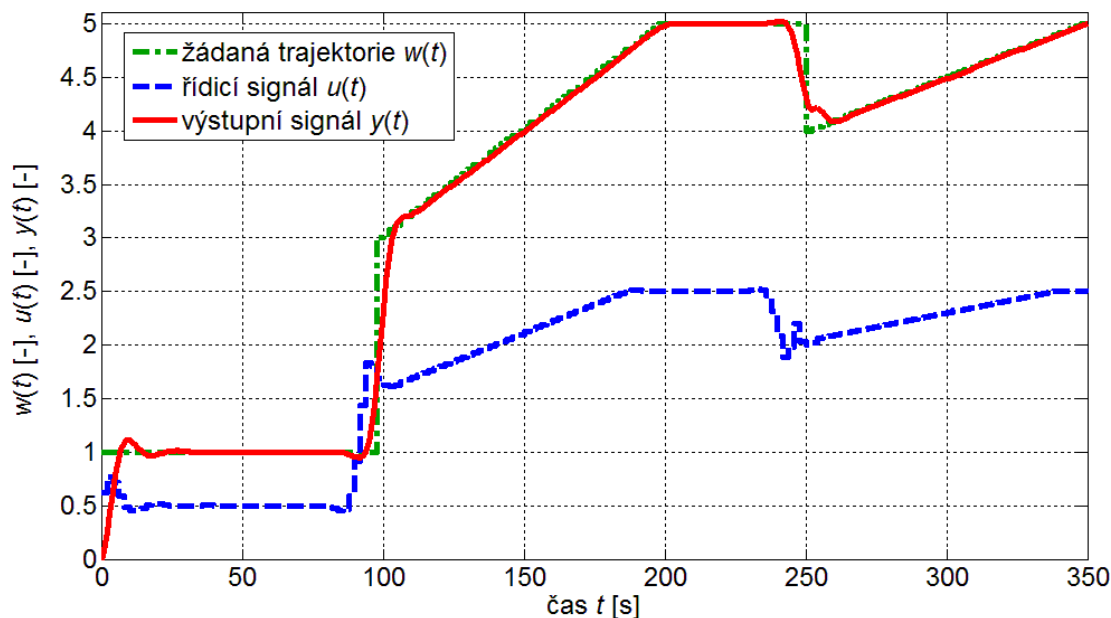
Dalším krokem ve vývoji byla snaha o využití znalosti o přesnější hodnotě dopravního zpoždění při regulaci systému. Navržená identifikační metoda byla propojena s řídicím algoritmem schopným upravit své parametry, aby efektivně řídil systém s neceločíselným zpožděním.



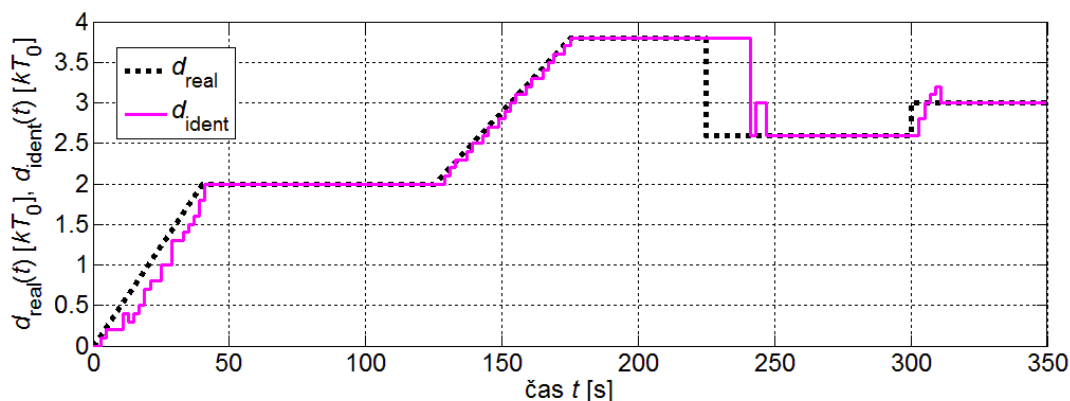
Obrázek 3.9: Schéma propojení identifikace zpoždění a řízení systému

Obrázek 3.9 ukazuje postup předávání jednotlivých signálů mezi jednotlivými elementy účastníci se adaptivní regulace.

Jako vhodné regulační postupy byly zvoleny dvě metody. První je Smithův prediktor s modelem, který může poskytovat výsledky mezi periodami vzorkování. Druhou metodou je GPC, které upravuje hodnoty matic  $\mathbf{G}$ ,  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{S}$  na základě modelu získaného modifikovanou Z-transformací.



Obr. 3.10: Simulovaný průběh řízení systému s proměnlivým zpožděním



Obr. 3.11: Průběžná identifikace dopravního zpoždění

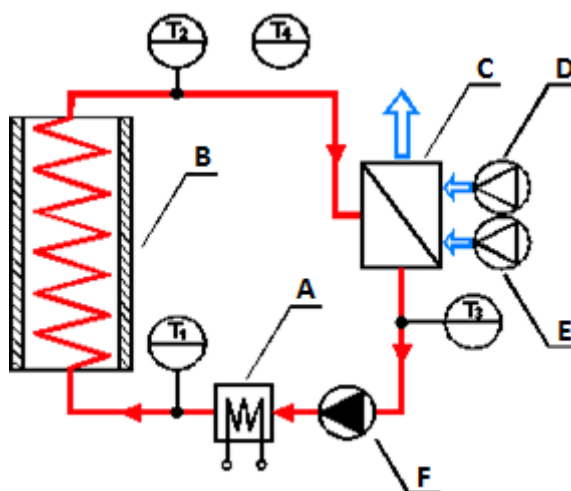
Obrázky 3.10 a 3.11 reprezentují systém řízení s identifikací proměnlivého zpoždění. Vstupní a výstupní signály systému jsou zpracovány identifikačním algoritmem, jehož odhad zpoždění ovlivní parametry regulátoru. Jak lze vidět na Obr. 3.11 regulátor se dokáže přizpůsobit skokovým i plynulým změnám v dopravním zpoždění. V oblasti 225 s až 240 s velikost odhadovaného zpoždění zůstává nezměněná, protože výstupní signál systému je v tomto intervalu konstantní a identifikační algoritmus tedy nedokáže určit, jestli došlo ke změně.

## 4. Experimentální část

Součástí vývoje nových metod je jejich ověření jednak v simulacích, ale především v laboratorním prostředí.

### 4.1 Laboratorní model tepelného výměníku

Schéma laboratorního tepelného výměníku je popsáno na obrázku 4.1. Kapalina zajišťující přenos tepla je čerpána pomocí spojitě říditelné DC pumpy (F) do průtočného ohřívače (A) s maximálním výkonem 750W. Teplota na výstupu z průtočného ohřívače je měřena platinovým teploměrem. Ohřátá kapalina protéká 15 metrů dlouhou izolovanou trubkou (B), která způsobuje výrazné zpoždění (20 – 200 s) v systému. Tepelný výměník vzduch-voda (C) se dvěma chladicími větráky (D, E) představují spotřebič tepla. Rychlost prvního větráku lze řídit spojitě, zatímco druhý je dvoustavový. Vstupní a výstupní teploty chlazení jsou měřeny teploměry  $T_2$ , respektive  $T_3$ . Platinový teploměr  $T_4$  je určen pro měření vnější teploty. Laboratorní vybavení je připojeno k osobnímu počítači prostřednictvím technologické multifunkční karty MF 624. Tato karta je navržena pro propojení počítače a vnějších signálů. Karta obsahuje funkce pro sběr dat, aplikaci řízení a je optimalizovaná pro spolupráci s Real Time Toolboxem pro SIMULINK. Prostředí MATLAB/SIMULINK je používáno pro ovládání všech sledovacích a řídicích funkcí.



Obr. 4.1: Schéma laboratorního tepelného výměníku

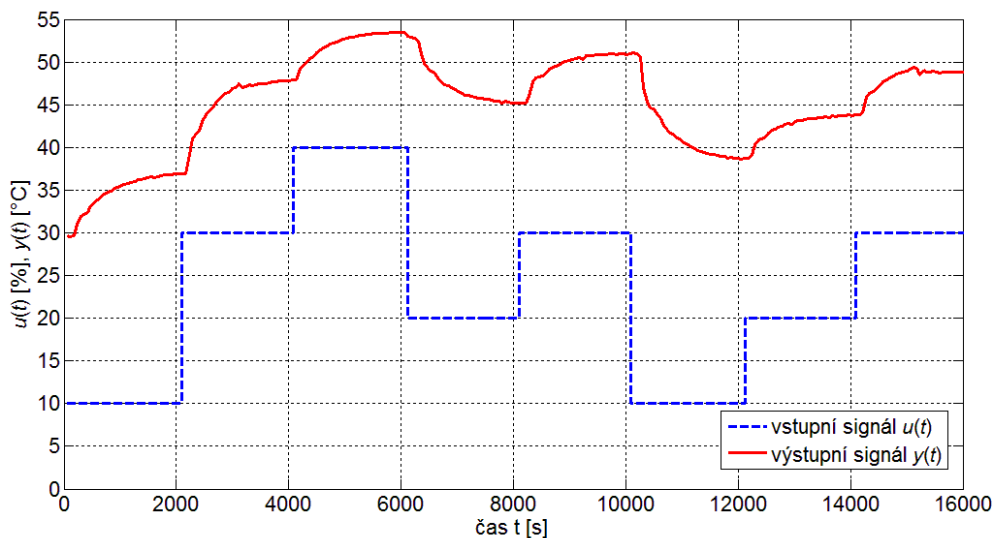
Tento laboratorní model je používán pro testování navržených metod. Vzhledem k nestálosti prostředí, ve kterém je tento model umístěn bylo nutné v průběhu vývoje opakovaně provádět identifikaci parametrů systému. V době provádění měření byla pomocí RMNČ zjištěna přechodová funkce ve tvaru

$$G(z^{-1}) = \frac{0,06123z^{-1} - 0,00512z^{-2}}{1 - 1,125z^{-1} + 0,2158z^{-2}} z^{-2} \quad (4.1)$$

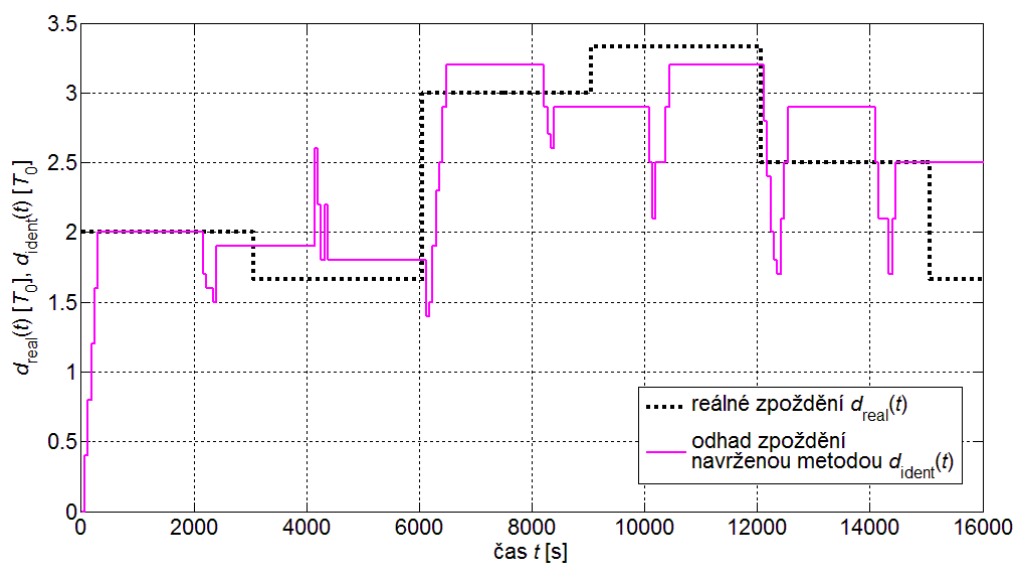
při vzorkovací periodě  $T_0 = 60$  sekund.

## 4.2 Testování identifikační metody

Jako součást návrhu je i testování nových metod v laboratorním prostředí. Výše popsany model umožňuje nastavení řady řídicích prvků, mezi které patří i výkon čerpadla pohánějícího kapalinu. Změna rychlosti průtoku kapaliny tímto systémem způsobuje změnu v časovém intervalu mezi změnou výkonu průtočného ohřívače a hodnotou teploty na senzoru  $T_2$ .



Obr. 4.2: Naměřená data pro průběžnou identifikaci zpoždění



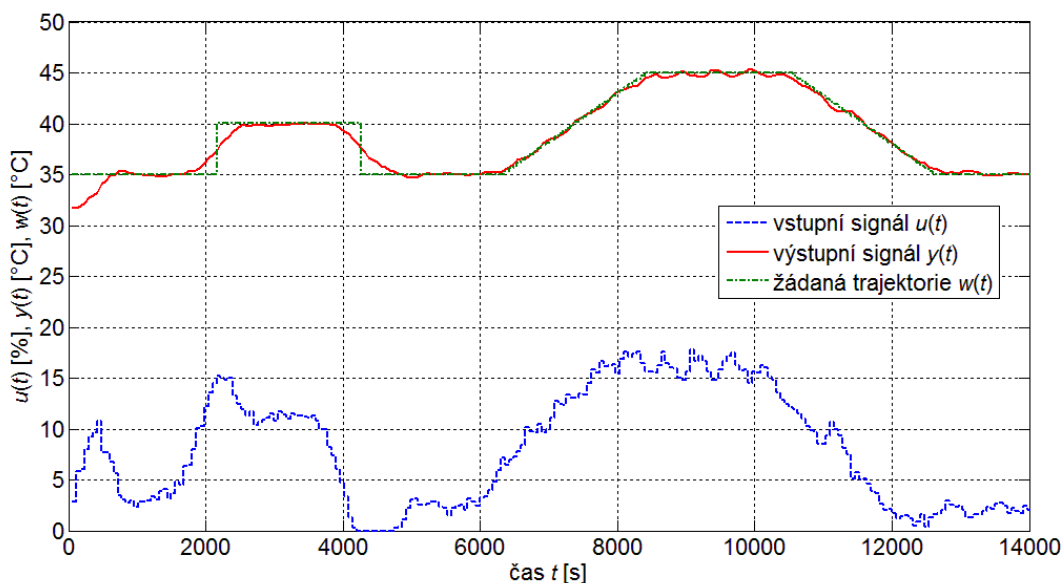
Obr. 4.3: Výsledky průběžné identifikace dopravního zpoždění

Obrázky 4.2 a 4.3 ukazují funkčnost identifikační metody v laboratorním prostředí. Identifikační metoda prováděla nové odhady hodnoty dopravního zpoždění výhradně v oblastech následujících po změně ve vstupním signálu a tyto odhady zůstávaly neměnné až do doby dalšího skoku. V průběhu těchto odhadů se často vyskytly skoky v určitém směru, způsobené tím, že sledovaná oblast obsahovala výstupní signály odpovídající dvěma různým hodnotám

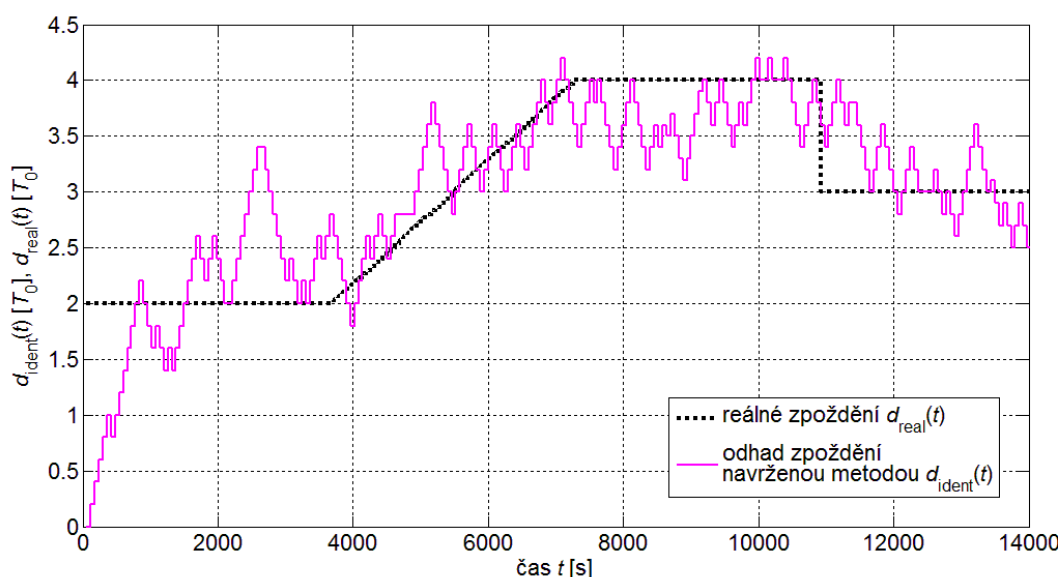
zpoždění. Celkově se odhady identifikace blížily skutečným hodnotám s největší odchylkou o velikosti  $0,4 T_0$ .

### 4.3 Testování regulace s adaptací na proměnlivé dopravní zpoždění

Testování regulace proběhlo na laboratorním modelu tepelného výměníku s výkonem čerpadla nastaveným tak, aby se dopravní zpoždění systému měnilo jak průběžně, tak skokově. Jako regulátor byla použita prediktivní metoda GPC upravená tak, aby měnila své parametry podle údajů o zpoždění systému a to i pro neceločíselné zpoždění.



Obr. 4.4: Průběh regulace s adaptací na proměnlivé dopravní zpoždění



Obr. 4.5: Průběžná identifikace dopravního zpoždění během regulace



Výsledky regulace s adaptací na proměnlivé dopravní zpoždění jsou vidět na Obr. 4.4 a Obr. 4.5. Výsledky identifikace byly znatelně ovlivněny rušením v podobě výkyvů teploty v místnosti a nelineárního chování systému při vyšších teplotách kapaliny. Jakékoliv odchylky od chování matematického popisu se výrazně projeví na nestálosti odhadů. Obecně se identifikovaná hodnota zpoždění blíží ke skutečné s odchylkami do poloviny vzorkovací periody výjimečně až 1,5 periody.

#### 4.4 Porovnání výsledků

Funkčnost navrženého postupu byla ověřena simulačně i v laboratorním prostředí.

Navržený identifikační postup byl porovnán s optimalizačním postupem realizovaným funkcí *fminsearch* v programu MATLAB.

Tabulka 4.3 Porovnání kvality identifikace dopravního zpoždění

Způsob identifikace	ISE simulace	ISE reálných dat
Navržená identifikační metoda	32,7	51,5
Identifikace optimalizací	78,0	327,9

Tabulka 4.1 ukazuje výsledky aplikace jednotlivých metod, v simulacích bylo dosaženo výrazně lepšího výsledku u navržené metody (Obr. 4.3). U optimalizačního postupu se velká část přesnosti ztratila především z důvodu široké oblasti sledovaných dat a tedy pomalejší reakce na změnu. V případě laboratorního měření mělo vliv i omezení na celočíselné výsledky.

V regulaci adaptující se na proměnlivé dopravní zpoždění byly testovány tři různé přístupy. Prediktivní řízení GPC upravené, aby se přizpůsobilo neceločíselnému zpoždění, původní GPC pracující jen s celočíselným zpožděním a Smithův prediktor přijímající i neceločíselné zpoždění.

Tabulka 4.4 Porovnání kvality regulace systému s dopravním zpožděním

Metoda řízení	ISE simulace	ISE reálné regulace
Upravené GPC	153,958	67,788
Původní GPC	154,917	74,886
Původní Smithův prediktor	20304,2	2383,75

Tabulka 4.4 vyjadřuje rozdíl v aplikaci jednotlivých řídicích postupů. Podle očekávání byla nejnižší přesnost zaznamenána u Smithova prediktoru. Prediktivní řízení adaptující se na neceločíselné zpoždění (Obr. 4.4) dosáhlo mírně lepší přesnosti, než jeho původní verze. Lepší výsledky v reálném měření než v simulaci byly způsobeny tím, že se teplota kapaliny laboratorního modelu na začátku regulace pohybovala blíže k referenční trajektorii, než v případě simulací.

## ZÁVĚR

Dopravní zpoždění ovlivňuje mnoho procesů v průmyslové praxi, hlavně při transportu hmoty, energie nebo informací. Vyskytuje se nejen u technologických procesů, ale i v ekonomických a biologických systémech. Většina literatury se zabývá pouze spojitými popisy a návrhy analogových regulátorů pro řízení těchto procesů. Cílem této práce bylo vypracovat metody pro identifikaci a digitální řízení procesů s dopravním zpožděním se zaměřením na kompenzační a prediktivní přístupy pro návrh číslicových regulátorů. Navržené regulátory poté ověřit simulačně a také při řízení laboratorního modelu v reálném čase.

Byla vypracována metoda pro identifikaci dopravního zpoždění vycházející z matematického popisu sledovaného systému. Provedení metody umožňuje provádění odhadů za běhu sledovaného procesu. Na základě těchto možností byl sestaven řídicí postup přizpůsobující své parametry změnu dopravního zpoždění regulovaného systému. Funkčnost navržených mechanismů byla ověřena v simulačním prostředí i na laboratorním výměníku, kde proměnný výkon čerpadla umožnil realizovat průběžné změny v dopravním zpoždění.

Získané výsledky byly porovnány s existujícími metodami a regulace tepelného výměníku s prediktivním regulátorem adaptujícím se na neceločíselné dopravní zpoždění zaznamenala o 9% vyšší přesnost řízení než při použití stejného regulátoru pracujícího jen s celočíselnými údaji o zpoždění. Hlavním přínosem práce je přesnější určení dopravního zpoždění u systémů se známými dynamickými vlastnostmi a to i v průběhu měření.

## Použitá literatura a zdroje

BAYRAK, Alper a Enver TATLICIOGLU. A novel online adaptive time delay identification technique. *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, 2011, Orlando, FL, USA.

BOBÁL, Vladimír. *Adaptivní a prediktivní řízení*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008.

BOBÁL, Vladimír. *Identifikace systémů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009.

BOBÁL, Vladimír; Petr CHALUPA a Petr DOSTÁL. Usage of self-tuning controllers simulink library for real-time control. *23rd European Conference on Modelling and Simulation*. 2009, s. 518-524.

BOBÁL, Vladimír; Petr CHALUPA; Petr DOSTÁL a Jakub NOVÁK. Simulation verification of digital self-tuning control of systems with time delay. *IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling*, 2011a, s. 66-73.

BOBÁL V.; P. CHALUPA; P. DOSTÁL a M. BRÁZDIL. Digitální samoladicí Smithův prediktor založený na umístění pólů. *ATP Journal* 2/2011b, s. 21-28.

BOBÁL, Vladimír; Petr CHALUPA; Marek KUBALČÍK a Petr DOSTÁL. Identification and self-tuning control of time-delay systems. *WSEAS transactions on systems* (10). 2012, s. 596-606.

BOBÁL, Vladimír; Petr CHALUPA; Petr DOSTÁL a Marek KUBALČÍK. Digital control of unstable and integrating time-delay processes. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing* (8). 2014, s. 425-432.

BOBÁL, Vladimír; Marek KUBALČÍK; Petr DOSTÁL a Jakub MATĚJÍČEK. Adaptive predictive control of time-delay systems. *Computers and Mathematics with Applications* (66). 2013, s. 165-176.

DOUGHERTY, Danielle a Douglas J. COOPER. Tuning guidelines of a dynamic matrix controller for integrating (non-self-regulating) proces. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2003, 42, s. 1739-1752.

ELNAGGAR, Ashraf; Guy A. DUMONT a Abdel-Latif ELSHAFIE. Recursive estimation for system of unknown delay. *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision and Control*, 1989, Tampa, Florida, U. S. A., s. 1809-1810.

FERRETTI, G.; C. MAFFEZZONI a R. SCATTOLINI. Recursive estimation of time delay in sampled systems. *Automatica*, 1991, 27, s. 653-661.

GU, Kequin; Vladimir L. KHARITONOV a Jie CHEN. *Stability of Time-Delay Systems*, Birkhäuser, Boston, Control engineering, 2003.

GUETBI, G.; D. KOUAMÉ; A. OUAHABI a J. P. CHEMLA. Methods based on wavelets for time delay estimation of ultrasound signals. *IEEE International Conference on Proceedings of Electronics Circuits and Systems*, 1998, s. 113-116.

KNAPP, Charles H. a G. Clifford CARTER. The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal Processing APPS-24* (4), 1976, s. 320–327.

MATĚJČEK, J. Identifikace a číslicové řízení procesů vyšších řádů, Zlín, 2012. Dizertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.

NI, Boyi; Deyun XIAO a Sirish L. SHAH. Time delay estimation for MIMO dynamical systems – With time-frequency domain analysis. *Journal of Process Control*, **20**, 2010, s. 83-94.

NORMEY-RICO, Julio E. a E. F. CAMACHO, *Control of Dead-time Processes*, Springer, London, 2007.

NORMEY-RICO, Julio E. a E. F. CAMACHO. Unified approach for robust dead-time compensator design. *Journal of Process Control*, 2008, **19**, s. 38-47.

NORMEY-RICO, Julio E.; Pedro GARCIA a Antonio GONZALES. Robust stability analysis of filtered Smith predictor for time-varying delay processes. *Journal of Process Control*, 2012, **22**, s. 1975-1984.

RANGAIAH, G. P., a P. R. KRISHNASWAMY. Estimating second-order dead time parameters from underdamped proces transients. *Chemical Engineering Science*, 1996, **51**, s. 1149-1155.

RIBIĆ, A. I. a M. R. MATAUŠEK. A dead-time compensating PID controller structure and robust tuning. *Journal of Process Control*, 2012, **22**, s. 1340-1349.

RICHARD Jean-Pierre. Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems. *Automatica*, 2003, **39**, s. 1667-1694.

SRINIVASAGUPTA, Deepak; Heinz SCHÄTTLER a Babu JOSEPH. Time-stamped model predictive control: an algorithm for control of processes with random delays. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, **28**, s. 1337-1346.

TALAŠ, Stanislav. *Prediktivní řízení procesů s dopravním zpožděním*. Zlín, 2013. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.

YANG, Zi-Jiang; Tomohiro HACHINO a Teruo TSUJI. On-line identification of continuous time-delay systems combining least-squares techniques with a genetic algorithm. *Internatonal Journal of Control*, 1997, **66**, s. 23-42.

## Seznam obrázků

<i>Obr. 2.1: Rozdíl odezvy na jednotkový skok <math>u</math> (čerchovaná čára) v systému bez zpoždění <math>y</math> (přerušovaná čára) a se zpožděním <math>y_d</math> (plná čára) .....</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 1.2: Rozložení časových úseků ve třibodové identifikaci.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2.2: Spojitá odezva uzavřeného regulačního obvodu s PID regulátorem bez zpoždění (přerušovaná čára) a se zpožděním <math>1</math> vteřiny (plná čára) .....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2.3: Základní schéma Smithova prediktoru v provedení se dvěma stupni volnosti (2DOF) .....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2.4: Schéma prediktivního řízení .....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2.5: Porovnání regulace systému s dopravním zpožděním prostřednictvím Smithova prediktoru a GPC .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3.1: Průběh vstupních a výstupních dat pro odvození dopravního zpoždění .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.2: Průběh vstupního signálu v intervalu 72 s až 90 s .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3.3: Výstupy systému pro různé hodnoty dopravního zpoždění .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3.4: Závislost kvalitativního kritéria na hodnotě zpoždění vnitřního modelu .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3.5: Výstupy systému rozšířené o neceločíselné hodnoty zpoždění.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3.6: Rozšířená závislost kvalitativního kritéria na zpoždění .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3.7: Zdrojová data pro identifikaci.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3.8: Průběžná identifikace měnícího se dopravního zpoždění.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 3.9: Schéma propojení identifikace zpoždění a řízení systému.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3.10: Simulovaný průběh řízení systému s proměnlivým zpožděním .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3.11: Průběžná identifikace dopravního zpoždění .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4.1: Schéma laboratorního tepelného výměníku .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4.2: Naměřená data pro průběžnou identifikaci zpoždění.....</i>	<i>30</i>

<i>Obr. 4.3: Výsledky průběžné identifikace dopravního zpoždění.....</i>	30
<i>Obr. 4.4: Průběh regulace s adaptací na proměnlivé dopravní zpoždění .....</i>	31
<i>Obr. 4.5: Průběžná identifikace dopravního zpoždění během regulace .....</i>	31

## Seznam použitých symbolů a zkratek

### Symbole

$t$	spojitý čas
$k$	čas vyjádřený ve vzorkovací periodě
$s$	komplexní proměnná v Laplaceově transformaci
$z$	proměnná v Z-transformaci, operátor dopředného posuvu
$z^{-1}$	operátor zpětného posuvu
$d$	dopravní zpoždění vyjádřené ve spojitě časové oblasti
$T_d$	dopravní zpoždění vyjádřené jako násobek vzorkovací periody

### Zkratky

PID	proporcionálně integračně derivační regulátor
MNČ	metoda nejmenších čtverců
RMNČ	rekurzivní metoda nejmenších čtverců
LQ	lineární kvadratické řízení
FIR	model odezvy na konečný impuls (Finite Impulse Response)
DMC	dynamická řídicí matice (Dynamic Matrix Control)
GPC	zobecněné prediktivní řízení (Generalized Predictive Control)
CARIMA	typ přenosové funkce (Controller Auto-Regresive and Integrated Moving Average)
ISE	kvalitativní kritérium - součet druhých mocnin odchylky (Integrated Square Error)

## Publikační činnost autora

Talaš, S. *Prediktivní řízení procesů s dopravním zpožděním*. Zlín, 2013. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.

Talaš, S., V. Bobál a A. Krhovják. Use of Dynamic Matrix Control in Simulation of Heat System. *28th European Conference on Modelling and Simulation*, 2014, s. 267-272.

Bobál, V., M. Kubalčík, P. Dostál a S. Talaš. Digital linear quadratic smith predictor. *28th European Conference on Modelling and Simulation*, 2014, s. 254-260.

Krhovják, A., P. Dostál a S. Talaš. Multivariable adaptive control of two funnel liquid tanks in series. (2014) *28th European Conference on Modelling and Simulation*, 2014, s. 273-278.

Talaš, S. a V. Bobál. Measurable Error Compensation with GPC in a Heat-Exchanger with a Traffic Delay. *Advances in Intelligent Systems and computing*, 289, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2014, s. 281-290.

Talaš, S., V. Bobál, A. Krhovják a L. Rušar. Method of explicit predictive control in case of time-delayed heat system. *29th European Conference on Modelling and Simulation*, 2015, s. 299-304.

Rušar, L., S. Talaš, A. Krhovják a V. Bobál. Application of constraints in predictive control of time-delay systems. *29th European Conference on Modelling and Simulation*, 2015, s. 333-339.

Krhovják, A., P. Dostál, S. Talaš a L. Rušar. Nonlinear gain scheduled controller for a sphere liquid tank. *29th European Conference on Modelling and Simulation*, 2015, s. 327-332.

Bobál, V., P. Dostál, M. Kubalčík a S. Talaš. LQ control of heat exchanger - Design and simulation. *29th European Conference on Modelling and Simulation*, 2015, s. 239-245.

Talaš, S., V. Bobál, A. Krhovják a L. Rušar. Nonlinearity and time-delay compensations in state-space model based predictive control. *Proceedings of the 5th Computer Science On-line Conference 2016 (CSOC2016)*, vol. 3, 2016, s. 99-106.

Krhovják, A., S. Talaš a L. Rušar. Multivariable Gain Scheduled Control of Four Tanks System: Single Scheduling Variable Approach. *Proceedings of the 5th Computer Science On-line Conference 2016 (CSOC2016)*, vol. 3, 2016, s. 53-62.

Rušar, L., A. Krhovják, S. Talaš a V. Bobál. State-space Predictive Control of Two Liquid Tanks System. *Proceedings of the 5th Computer Science On-line Conference 2016 (CSOC2016)*, vol. 3, 2016, s. 119-128.

Talaš, S., V. Bobál, A. Krhovják a L. Rušar. Discrete method for estimation of time-delay outside of sampling period. *30th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2016)*, 2016, s. 287-292.

Bobál, V., P. Dostál, M. Kubalčík a S. Talaš. Identification and LQ Digital Control of a Set of Equal Cylinder Atmospheric Tanks - Simulation Study. *30th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2016)*, 2016, s. 279-286.

Rušar, L., S. Talaš, A. Krhovják a V. Bobál. State-Space Predictive Control of Two Liquid Tanks System with Constraints of Process Variables. *30th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2016)*, 2016, s. 307-312.

Krhovják, A., P. Dostál, S. Talaš a L. Rušar. Optimal Gain Scheduled Controller for a Two Funnel Liquid Tanks in Series. *30th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2016)*, 2016, s. 327-332.

Bobál, V., S. Talaš, P. Dostál a M. Kubalčík. Digital LQ Smith Predictor for Control of Time-Delay Systems - Design and Application. *22nd International Conference on Soft Computing - MENDEL 2016*, 2016, s. 179-186.

Talaš, S. a Bobál, V. Utilization of Heat Accumulation in Control of Cyclic Systems. In: James K. Cooper. *Heat Exchangers: Characteristics, Types and Emerging Applications*. Nova Science Publishers Inc (Verlag). 2016. ISBN: 978-1-63485-749-9.

Talaš, S., V. Bobál, A. Krhovják a L. Rušar (2017). Predictive Control of a Series of Multiple Liquid Tanks Substituted by a Single Dynamics with Time-Delay. *31st European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2017)*, 374-378.

Krhovják, A., S. Talaš a L. Rušar (2017). 1DOF Gain Scheduled PH Control of CSTR. *31st European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2017)*, 391-396.

Rušar, L., A. Krhovják, S. Talaš a V. Bobál (2017). State-Space Predictive Control of Inverted Pendulum Model. *31st European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2017)*, 384-390.



# Profesní životopis

## OSOBNÍ ÚDAJE

Jméno a příjmení: Stanislav Talaš  
Titul: Ing.  
Datum narození: 5. 8. 1988  
Adresa: Hřivínův Újezd 132  
Telefon: +420 775 407 111  
E-mail: talas.stanislav@gmail.com

## VZDĚLÁNÍ

2013 - nyní

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Automatické řízení a informatika, doktorské studium

2011 - 2013

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Automatické řízení a informatika, navazující magisterské studium

2008 - 2011

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
obor: Informační a řídicí technologie, bakalářské studium

2000 - 2008

Gymnázium a Jazyková škola s právem státní jazykové zkoušky Zlín  
všeobecné víceleté gymnázium

## PRAXE

02/2014 - 07/2014

Dudr Tools s.r.o.  
Dohoda o provedení práce  
Výzkum a vývoj nových technologií - návrh a vývoj softwaru PLC a uživatelského prostředí v C++ .

## **POČÍTAČOVÉ ZNALOSTI**

### **Operační systémy**

MS Windows

Linux

### **Databáze**

MySql

### **Programování**

C/C++

Python

Java

HTML

PLC

### **Aplikace**

MS Office

Matlab

ControlWeb

## **JAZYKOVÉ ZNALOSTI**

Angličtina      úroveň C1, certifikát FCE

Španělština    úroveň A1

## **AKADEMICKÁ ČINNOST**

Výuka bakalářského předmětu „Programování“

Výuka bakalářského předmětu „Algoritmy a datové struktury“

Výuka bakalářského předmětu „Řízení technologických procesů“

Ing. Stanislav Talaš

**Identifikace a číslicové řízení procesů s dopravním zpožděním**

Identification and digital control of processes with time-delay

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,

nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Stanislav Talaš

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou

Pořadí vydání: první

Rok vydání 2017

ISBN 978-80-7454-708-9

