



**FAKULTA
APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

AUTOREFERÁT

diserta ní práce

PLZEŇ, 2016

Ing. Radek Škarda

Ing. Radek Škarda

**Nové metody pro monitorování a
ohodnocování kvality regulace**

obor

Kybernetika

Autoreferát disertační práce k získání
akademického titulu "Doktor"

V Plzni, 1. 4. 2016

Disertační práce byla vypracována v prezenčním/kombinovaném doktorském studiu na katedře kybernetiky fakulty aplikovaných věd ZČU.

Uchazeč: Ing. Radek Škarda
Fakulta aplikovaných věd
Katedra kybernetiky
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Školitel: Prof. Ing. Miloš Schlegel, CSc.
Katedra kybernetiky
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Oponenti: Doc. Ing. Štěpán Ožana, Ph.D., FEI, VŠB, Ostrava
Ing. Oto Sládek, Ph.D., KYBERTEC Ltd.

Autoreferát byl rozeslán dne:

Obhajoba disertační práce se koná dne _____ před komisí v oboru
Kybernetika na Fakultě aplikovaných věd, Technická 8, Plzeň,
v místnosti UN544 v _____ hodin.

S disertační prací je možno se seznámit na studijním oddělení FAV ZČU,
Univerzitní 22, UV 206.

Prof. Ing. Josef Psutka, CSc.
předseda oborové rady KKY

Resumé

Tato disertační práce se zabývá problematikou monitorování a ohodnocování kvality řízení v jednoduchých regulačních smyčkách s PID regulátory. Cílem bylo vyvinout spolehlivé a efektivní algoritmy, které komplexně pokrývají tuto problematiku především v oblasti řízení průmyslových procesů a jsou schopné praktického nasazení. Dosažené teoretické výsledky jsou popsány ve třech kapitolách, které se věnují metodám automatického ladění PID regulátorů, ohodnocování regulačních smyček a identifikace řízeného systému v uzavřené smyčce. Představené metody byly otestovány jak v simulačním prostředí, tak na reálných laboratorních modelech.

Resumé

This thesis deals with assessment and monitoring of simple PID loop control quality. The goal was to develop reliable and effective algorithms for complex solution of selected problem in process control industry. Achieved theoretical results are described in three chapters dedicated to automatic PID tuning, control loop performance assessment and closed-loop system identification methods. The introduced methods were extensively tested both in simulation and real hardware environment.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Obecný úvod do problematiky	1
1.2	Kvalita regulace v praxi	4
1.3	Současný stav problematiky	6
2	Formulace problému, cíle disertační práce	8
3	Robustní metoda automatického nastavování regulátorů	10
3.1	Efektivní šířka pásma	10
3.2	PID autotuner	12
4	Index kvality řízení	16
4.1	Definice indexu kvality řízení	16
4.2	Odhad indexu kvality	17
4.3	Výpočet maximálních hodnot indexu pro přípustné systémy a PID regulátor . .	18
4.4	Použití indexu kvality pro detekci špatně naladěných smyček	19
5	Identifikace systému v uzavřené smyčce	21
5.1	Výpočet chyby odhadu	22
5.2	Výpočet modelu systému ze dvou bodů frekvenční charakteristiky	23
6	Nové metody pro oceňování kvality regulace v praxi	25
6.1	Implementace do řídicího systému	25
6.2	Testovací model	26
6.3	Testování algoritmů v reálném prostředí	27
7	Diskuse a závěr	29

1

Úvod

Současné řídicí systémy v oblasti řízení průmyslových procesů¹ obsahují řádově stovky až tisíce regulačních smyček. Většina z nich (až 97% Desborough & Miller (2002)) je řízena pomocí proporcionálně-integračně-derivačních (PID) regulátorů. Bohužel, podstatná část těchto regulačních smyček dosahuje špatné kvality řízení. Důvodů může být několik. Velmi často je příčinou nevhodně zvolený nebo špatně nastavený regulátor, vadná nebo špatně dimenzovaná čidla a akční členy atd. I v případě, že regulační smyčka funguje dobře, dá se očekávat, že se její kvalita řízení časem zhorší, ať z důvodu změny parametrů řízeného systému (například použití jiných surovin, změna parametrů výrobku atd) nebo kvůli opotřebení či poruše akčních členů nebo čidel.

Kvalita řízení přitom rozhodujícím způsobem ovlivňuje užité vlastnosti, jakost výstupních výrobků a celkovou ekonomickou efektivitu daného provozu. Pokud nepracuje základní procesní vrstva řídicího systému kvalitně, není možné dosáhnout zlepšení ani instalací pokročilých vysokoúrovňových algoritmů (prediktivní řízení, optimalizační metody).

Pro operátory, kteří se starají o řídicí systém, je vzhledem k obrovskému množství regulačních smyček prakticky nemožné kontrolovat jejich kvalitu. Také „manuální“ odhalování zdroje problémů (například oscilací způsobených vadným ventilem) je velice obtížné a zdlouhavé. Proto je logické, že roste poptávka po systémech umožňujících automatické monitorování regulačních smyček a oceňování jejich kvality. Zároveň je žádoucí, aby takový systém byl nejen schopen odhalit špatně fungující smyčky, ale také identifikovat příčinu problému, tento stav nahlásit obsluze a v ideálním případě i navrhnout řešení.

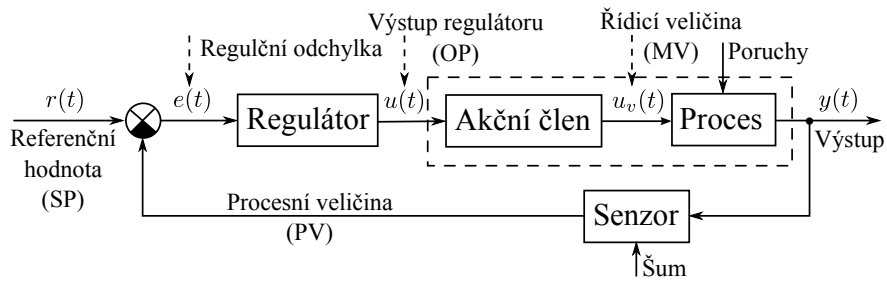
Problematika oceňování kvality regulace je v současné době poměrně populární i v akademické sféře. Od roku 1989, kdy byl publikován článek Harris (1989) (byla zde popsána první prakticky použitelná metoda umožňující ocenit kvalitu řízení na základě porovnání s regulátorem s minimální variancí), bylo publikováno několik set prací popisujících mnoho různých metod vhodných pro monitorování a diagnostiku regulačních smyček.

1.1 Obecný úvod do problematiky

Standardní jednoduchá regulační smyčka (obr. 1.1) je základním prvkem celého řídicího systému. Obsahuje proces, jehož výstupní veličina má být řízena na požadovanou (referenční) hodnotu (SP) zpětnovazebním regulátorem. Zpětnou vazbu zajišťuje senzor, který měří hodnotu výstupní veličiny; měření bývá často zatíženo šumem. Akční člen je zařízení, které převádí výstup regu-

¹Process control; Oblast průmyslu, kde je nutné řídit spojité procesy - především teplotu, tlak, průtok, koncentraci atd. Je zde zastoupen převážně chemický průmysl a rafinérie, papírenský, keramický a potravinářský průmysl, částečně i energetika

1. ÚVOD

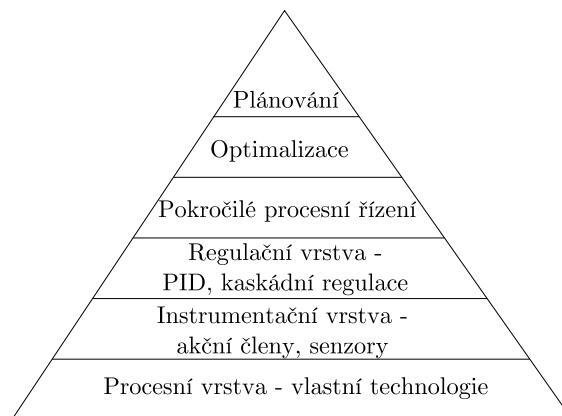


Obrázek 1.1: Schéma jednoduché regulační smyčky

látoru (OP) ve formě analogového nebo digitálního signálu na reálný akční zásah (MV; např. servoventil \rightarrow změna průtoku). Dynamika akčního členu a senzoru bývá často započítána do modelu řízeného systému.

Aby řídicí smyčka fungovala optimálně, musí být splněno několik podmínek. Akční člen i senzor musí být správně nadimenzovány a bez poruch. Pro daný řízený systém musí být zvolen a správně nastaven vhodný typ regulátoru. Podstatný vliv hraje samozřejmě i samotný řízený systém. Pokud by byl špatně navržený, není možné dosáhnout kvalitní regulace se sebelepším regulátorem. Je proto nutné, aby byla věnována velká pozornost všem prvkům regulační smyčky nejen ve fázi návrhu a realizace, ale i nadále v běžném provozu. Tam s časem roste pravděpodobnost poruchy nebo opotřebení jednotlivých komponent systému a tím i zhoršení kvality regulace následované snížením kvality výstupních výrobků, zvýšením spotřeby energie apod. Automatická detekce těchto problémů však není triviální ani u jedné regulační smyčky, natož v případě rozsáhlého řídicího systému s tisíci smyček.

Řízení průmyslových procesů



Obrázek 1.2: Struktura řízení průmyslového procesu

Řízení procesů (process control) je oblast teorie řízení, kde je aplikováno automatické řízení na spojitě procesy. Většinou se jedná o rozsáhlé průmyslové provozy, kde probíhá zpracovávání surovin na finální produkty. Typickými zástupci jsou například chemický průmysl a rafinérie, papírenský, keramický, potravinářský a farmaceutický průmysl, částečně i energetika. Řízenými veličinami jsou nejčastěji teplota, tlak, průtok, pH, vlhkost, hladina, koncentrace, viskozita, vodivost a další. Řídicí systémy těchto provozů jsou většinou strukturovány do více vrstev, viz

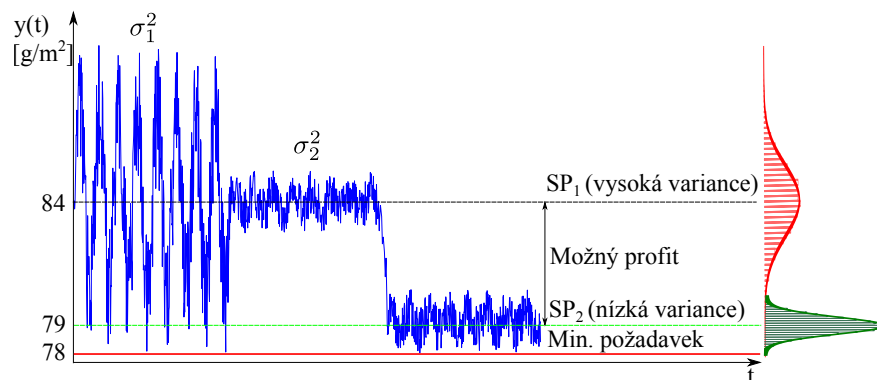
obr. 1.2. Nejnižší vrstvu tvoří vlastní technologie, která je přes instrumentační vrstvu (senzory, akční členy) propojena s vrstvou regulační, která se stará o řízení jednotlivých procesních veličin. Regulační vrstva bývá velmi rozsáhlá, nachází se zde typicky několik set až několik tisíc regulačních smyček (v drtivé většině s PID regulátory). Právě z tohoto důvodu je regulační vrstva v oblasti řízení průmyslových procesů nevhodnější pro nasazení systémů pro automatické monitorování/ocenořování kvality. Je pochopitelné, že lidská obsluha nedokáže takové množství smyček efektivně monitorovat a zároveň řešit další problémy spojené s provozem daného zařízení. Zlepšení kvality řízení byt' jen o 1% (a její udržení) bude mít velký pozitivní ekonomický dopad – ať díky úsporám surovin a energií nebo zlepšení kvality výstupů (například u průmyslu v USA by úspory na energiích dosahovaly řádově stovek miliónů USD ročně (Desborough & Miller (2002), ww.eia.gov)). Bylo by samozřejmě vhodné automaticky monitorovat i vyšší vrstvy řídicích systémů (pokročilé procesní řízení, optimalizační metody), ale vzhledem k jejich nízkému zastoupení mohou být monitorovány operátory řídicích systémů. Důležitá je také skutečnost, že pokud nižší vrstvy řízení nefungují správně, nemohou dobře fungovat ani nadřazené vrstvy s pokročilými metodami řízení. Kvalita řízení závisí na několika faktorech:

Optimálně naladěný regulátor. Ladění regulátorů při jejich uvádění do provozu se často nevěnuje dostatečná pozornost. Parametry bývají zvoleny příliš konzervativně, díky čemuž je odezva regulační smyčky příliš pomalá, výjimkou nebývá dokonce ani ponechání parametrů regulátoru na výchozích hodnotách. I při vhodném počátečním naladění dochází časem ke změnám dynamiky řídicího systému (změna vlastností vstupních surovin, změna technologického postupu, degradace akčních členů, případně čidel...). Špatně nastavený regulátor se nejčastěji projevuje dvěma způsoby: 1) pomalou odezvou nebo 2) přílišnou agresivitou.

Opotřebený akční člen. Opotřebením a následná špatná funkce akčního členu je další faktor podstatně ovlivňující kvalitu regulace. V praxi nejběžnější jsou problémy s ventily. V důsledku opotřebením vzniká u ventilů stále větší tření, které způsobuje nelineární chování ventilu. Tím jsou zapříčiněny oscilace řízené veličiny.

Motivační příklad

Variance výstupní veličiny je jeden z nejpoužívanějších indikátorů kvality regulační smyčky. Proto je jedním z důležitých požadavků na regulátor, aby varianci výstupu udržoval na nízké hodnotě. Význam zlepšení kvality řízení je ilustrován na hypotetickém příkladu (obr. 1.3).



Obrázek 1.3: Vliv variance na efektivitu systému

Papírenský stroj je nastaven, aby vyráběl papír o gramáži $80\text{g}/\text{m}^2$, minimální gramáž sta-

1. ÚVOD

novená odběratelem je $78g/m^2$. Řízení papírenského stroje nefunguje příliš dobře, výstupní veličina má poměrně vysokou varianci (σ_1^2). Aby bylo zaručeno splnění min. požadavků na kvalitu výstupu, musí být požadovaná gramáž nastavena až na $84g/m^2$, což je velmi neefektivní. Po identifikaci problémů a jejich odstranění (například výměna vadného čidla, přeladění regulátoru) se podstatně snížila výstupní variance (σ_2^2). Požadovaná hodnota tak může být snížena na $79g/m^2$, čímž dojde k velké úspoře vstupních surovin i energie při zachování požadavků na kvalitu.

Klasifikace kvality řízení

Kvalita	Popis
Výborná	Kvalita regulace je po všech stránkách vysoká. Řízená veličina sleduje požadovanou hodnotu, její variance je nízká,...
Dobrá	Kvalita řízení je na dobré úrovni, v některých aspektech ale není ideální. Potenciální přínos vzhledem k nákladům na zásah je malý -> nevyplatí se zasahovat.
Dostatečná	Kvalita řízení není špatná, ale systém zdaleka nedosahuje svých možností. Doporučuje se údržba těchto smyček.
Špatná	Kvalita řízení je špatná, vyskytují se vážné problémy (např. oscilace, trvalá reg. odchylka atd.), které mají vliv na celý systém. Údržba těchto smyček je nutná!

Tabulka 1.1: Kvalita řízení

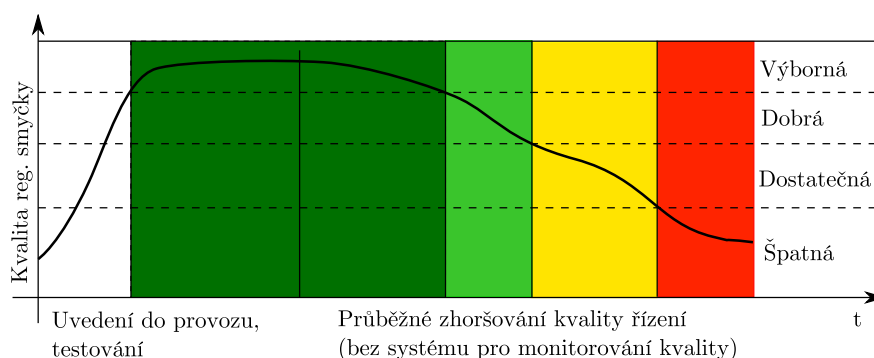
Kvalitu řízení lze hodnotit různými metodami podle mnoha kritérií. Často je i vhodné použít více metod najednou. Aby mělo toto hodnocení praktický význam, musí být informace o stavu regulační smyčky prezentována obsluze řídicího systému v jasné a přehledné formě. V předních komerčních systémech pro monitorování kvality regulace je použito několika barev pro rychlé rozpoznání kvality smyčky, viz tabulka 1.1. Ke každé smyčce jsou shromážděna všechna dostupná data a na jejich základě je vypočítán „celkový index kvality“ reprezentovaný příslušnou barvou. Obsluha pak snadno rozpozná kritická místa a může pružněji reagovat na problémy.

Zhoršování kvality řízení

I v případě, že byly při uvedení do provozu všechny regulační smyčky naladěny správně, dochází v průběhu času ke zhoršování kvality regulace, viz obr. 1.4. Důvodů je několik: opotřebení a poruchy akčních členů a senzorů, změny řízeného procesu (změny technologie, parametrů výsledného produktu, kvality surovin). Pokud je kvalita regulace kontinuálně monitorována, je možné na každé její zhoršení okamžitě reagovat - například výměnou vadné komponenty nebo přeladěním regulátoru.

1.2 Kvalita regulace v praxi

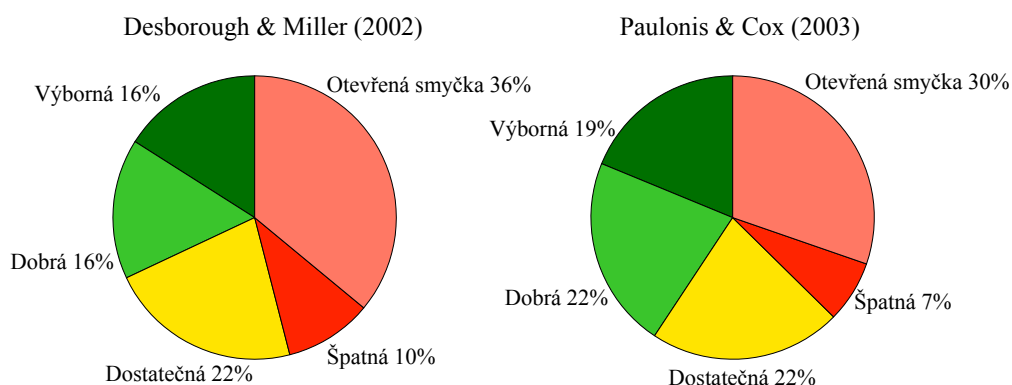
Na počátku 90. let, tedy ve stejnou dobu, kdy se ve vědecké komunitě zvýšil zájem o metody oceňování kvality řízení, se objevily i studie mapující skutečný stav kvality regulace v praxi.



Obrázek 1.4: Degradace kvality řízení v čase

Výsledky byly pro mnoho odborníků šokující. Jedna z prvních studií (Ender (1993)) odhalila například tyto skutečnosti: více než 30% regulačních smyček pracuje v otevřené smyčce (regulátor je v manuálním režimu), více než 30% jich zhoršuje varianci výstupní veličiny oproti otevřené smyčce. Asi 25% regulátorů pracuje s výchozími (továrně přednastavenými) parametry, 30% smyček má problémy s instrumentací (špatně navržené, případně opotřebované ventily, problémy s měřením...) Další část studie se věnuje podrobněji regulačním ventilům, které jsou velmi častou příčinou špatné kvality řízení. Až 35% ventilů má špatně nastavený rozsah pohybu, 35% trpí nadměrným třením, 35% špatným nastavením motoru (neplynulý pojezd), 38% pneumatických ventilů má špatně nastavené ovládací tlaky a 71% má špatně zkalibrovanou polohu. Studie vychází z dat získaných na přelomu 80. a 90. let ve více než 2000 provozech v 16 zemích.

Kromě zmíněné publikace Ender (1993) se kvalitou řízení v praxi zabývají další, velmi rozsáhlé studie – například Desborough & Miller (2002), Paulonis & Cox (2003), Torres et al. (2006) a Rice (2012); hlavní poznatky týkající se kvality řízení jsou přehledně zobrazeny v grafech na obr. 1.5 a v tabulce 1.2. Ve všech těchto studiích bylo zjištěno, že počet špatně fungujících regulačních smyček v průmyslu je velmi vysoký a tento stav se v průběhu dvaceti let prakticky nezlepšil.



Obrázek 1.5: Kvalita regulace na základě rozsáhlých studií Desborough & Miller (2002) a Paulonis & Cox (2003)

1. ÚVOD

Problém	Ender(93)	Ruel(03)	Torres(06)	Rice(12)
Regulátor v man. režimu	30%	30%	16%	30%
Regulátor špatně nastavený		85%	16%	65%
Regulátor má výchozí param.	25%			
Regulátor zvyšuje varianci	30%	75%		
Regulátor je v saturaci			24%	
Řízená veličina kmitá			41%	
Problémy s instrumentací	30%	30%	29%	

Tabulka 1.2: Souhrn ze studií zabývajících se kvalitou řízení

Řídicí algoritmy

Zajímavou a pro proces oceňování a monitorování kvality řízení velmi důležitou informací je zastoupení typu řídicích algoritmů v jednotlivých regulačních smyčkách průmyslových provozů. Podle Desborough & Miller (2002) je přibližně 97% regulátorů typu PID (často pouze jako PI regulátor), 2% jsou jiné zpětnovazební algoritmy a 1% algoritmy přímovazební. Důležitou část z těchto řídicích algoritmů tvoří pokročilé metody řízení, které se používají převážně jako nadřazené regulátory pro základní vrstvy využívající PID. Z pokročilých metod jsou nejčastěji používány (Bauer & Craig (2008), Kano & Ogawa (2010)): prediktivní řízení (model predictive control, MPC), lineární programování (linear programming, LP) a řízení s rozdělenou akční veličinou (split-range control). Podle Desborough & Miller (2002) je ale více než 30% MPC regulátorů prakticky nefunkčních kvůli zásahům operátorů řídicího systému do řízení a většina MPC funguje pouze jako algoritmus, který generuje optimální referenční hodnoty pro nižší úroveň řízení. Také použití MPC pro MIMO systémy je v průmyslu poměrně řídkým jevem, stále jsou častěji využívány PID s dynamickým rozvazbovacím regulátorem. Z těchto údajů vyplývá, že vzhledem k masivnímu rozšíření PID regulace je velmi důležité mít jednoduchý a spolehlivý algoritmus pro oceňování těchto smyček.

1.3 Současný stav problematiky

V současné době je v akademické komunitě problematika oceňování a monitorování kvality řízení poměrně populární. Vlnu zájmu odstartovala publikace Harris (1989), která jako jedna z prvních popsala index, na jehož základě bylo možné určit kvalitu regulace. **Harrisův index** je definován jako poměr variance výstupu σ_{MV}^2 , kterou by generoval regulátor s minimální variancí ku aktuální varianci výstupu σ_y^2 , tedy $\eta_{MV} = \frac{\sigma_{MV}^2}{\sigma_y^2}$. Hodnota indexu η_{MV} se pohybuje v intervalu $(0, 1)$, kde „0“ je nejhorší kvalita řízení, „1“ nejlepší (shodná s řízením na minimální varianci).

Devadesátá léta byla ve znamení dalšího zkoumání metody oceňování na základě min. variance, jejích modifikací a zobecnění pro MIMO systémy. Tento výzkum je shrnut v přehledových článcích Qin (1998) a Harris et al. (1999). Na konci 90. let se objevují další metody, stejně jako Harrisův index založené na H_2 řízení – a to index založený na řízení se zobecněnou minimální variancí (GMV) a LQG regulátoru. Problematiku monitorování kvality regulace kolem roku 2000 shrnují přehledové články Grimbale & Uduehi (2001) a Harris & Seppala (2002), který je zaměřen především na metody oceňování MIMO systémů. Problematiku dalšího vývoje

metod pro MIMO systémy popisují přehledové články Qin & Yu (2007) a Yuan et al. (2009). Od poloviny 90. let se pozornost výzkumu zaměřuje i na příčiny špatné kvality řízení. Velmi často jsou to oscilace. Jejich detekcí a diagnostikou se zabývá mnoho publikací, výsledné metody jsou shrnuty například v Horch (2006) a Karra & Karim (2009).

Jednou z nejčastějších příčin oscilací v oblasti řízení průmyslových procesů jsou vadné regulační ventily (které mají kvůli přílišnému tření nelineární charakteristiku). Tomuto tématu je opět věnována velká pozornost a věnuje se mu mnoho přehledových článků – například Choudhury et al. (2005), Garcia (2008) a Daneshwar & Noh (2012). Velké množství přehledových článků se věnuje širokému spektru metod pro monitorování, oceňování a diagnostiku řídicích smyček. Jsou v nich často uvedeny i příklady použití metod v praxi, případně i návrh grafického uživatelského prostředí pro monitorovací systémy. Jsou to například publikace Hugo (1999), Kozub (2002), Hoo et al. (2003), Bonavita et al. (2004), Shah et al. (2005), Jelali (2006), Salahshoor & Khalil Arjomandi (2010), Qin (2012), Shardt et al. (2012), Yu et al. (2012). Nejucelenější přehled problematiky oceňování kvality řízení je v člancích Jelali (2006), Shardt et al. (2012), v knihách Huang & Shah (1999), Ordys et al. (2007), Huang & Kadali (2008) a především Jelali (2013), kde je vyčerpávajícím způsobem popsán současný stav problematiky.

Přehled metod

Problematika oceňování a monitorování kvality regulačních smyček je velmi rozsáhlá a zahrnuje širokou škálu metod – od velmi jednoduchých heuristických po velmi sofistikované. V následujícím seznamu je uveden přehled používaných metod.

1. Oceňování kvality regulace
 - (a) Oceňování kvality jednotlivých řídicích smyček
 - i. Metody založené na řízení s minimální variancí (MVC)
 - Harrisův index
 - modifikace Harrisova indexu
 - Index založený na zobecněném řízení s min. variancí (GMV)
 - ii. LQG index
 - iii. Oceňování založené na analýze v časové a frekvenční oblasti
 - Kritéria založená na odezvě systému v čas. oblasti
 - Integrovaná kritéria
 - Autokorelační funkce (ACF), vzájemná korelace (CCF), (PCF)
 - iv. Statistické metody
 - v. Datové metody
 - (b) Detekce abnormalit a nežádoucích jevů
 - i. Metody detekce oscilací
 - Detekce oscilací na základě kritéria IAE
 - Index regularity
 - Area index
 - ii. Metody detekce pomalého regulátoru
 - IDLE index
 - iii. Metody detekce nelinearit
 - (c) Oceňování kvality řízení celého systému
2. Oceňování kvality vyšších úrovní řízení
3. Ekonomické ukazatele

2

Formulace problému, cíle disertační práce

Cílem této práce je vytvoření, implementace a otestování komplexního souboru metod určeného k automatickému ohodnocování jednoduché regulační smyčky s PID regulátorem v reálném čase. Protože v průmyslové sféře neustále roste tlak na zvyšování efektivity výroby, rostou tím i požadavky na kvalitu regulace a monitorování její kvality. Přesto existuje jen velmi málo specializovaných algoritmů pro ohodnocování kvality řízení PID regulátorů, kterými je v praxi osazena drtivá většina regulačních smyček. Tato práce si klade za cíl vyvinout nové metody pro identifikaci řízeného systému v uzavřené smyčce, automatické naladění PID regulátoru a ohodnocování kvality regulace, které s dalšími pomocnými metodami umožní spolehlivé naladění řídicí smyčky a následné dlouhodobé udržení kvality regulace především v oblasti řízení průmyslových procesů. Výše uvedené metody musí být schopné velmi těsné spolupráce (či případně i integrace do jednoho komplexního algoritmu), ale také zcela samostatné činnosti.

Algoritmus pro automatické ladění PID

Pro správnou a efektivní funkci regulační smyčky s PID regulátorem je zásadní jeho vhodné naladění. Proto je **prvním cílem této práce vytvoření spolehlivé metody automatického návrhu robustních PID regulátorů**. (Za spolehlivou se zde považuje taková metoda, která při splnění všech uvažovaných předpokladů vždy produkuje regulátor splňující všechny uvažované návrhové požadavky.) Tato metoda musí být koncipována tak, aby ji bylo možné jednoduše doplnit o algoritmy automatického ohodnocování kvality regulace a identifikace v uzavřené smyčce. Algoritmus automatického naladění PID regulátoru je založen na metodě popsané v Schlegel & Večerek (2005), kde je pro návrh robustního regulátoru použit množinový model neceločíselného řádu popsany třemi charakteristickými čísly – κ , μ , σ^2 . V této práci bude představena její modifikace, kdy je pro popis systému použit kromě výše zmíněných charakteristických čísel další parametr – efektivní šířka pásma Ω_a .

Vývoj algoritmu robustního PID autotuneru zahrnuje několik dílčích problémů. Je potřeba navrhnout vhodnou metodu experimentální identifikace řízeného systému ve tvaru množinového modelu popsaneho charakteristickými čísly κ , μ , σ^2 pomocí pulsního experimentu, a metodu identifikace efektivní šířky pásma ω_a . Dále musí být specifikovány návrhové požadavky PID regulátoru, které jsou kompatibilní s dalšími představenými metodami pro ohodnocování kvality řízení. Na základě definovaných požadavků na chování uzavřené smyčky jsou následně metodou robustních regionů vypočteny parametry PID regulátoru. Výsledný algoritmus je nakonec důkladně otestován v rámci simulace a na reálném zařízení.

Index kvality řízení

Dalším cílem této práce je vyvinout metodu, která umožní **ohodnocování kvality řízení za běžného provozu pomocí vhodně definovaného indexu kvality**. Tato metoda musí respektovat jak fundamentální omezení regulační smyčky daná Bodeho větou a omezenou dosažitelnou šířkou pásma, tak omezení určená návrhovými parametry regulátoru. Jen tak lze dosáhnout relevantních hodnot indexu pro PID regulátor. Dále budou vypočteny maximální hodnoty indexu pro optimálně nastavený PID regulátor a definovanou množinu přípustných systémů, algoritmus bude implementován do řídicího systému a důkladně otestován jak simulačně, tak na reálném modelu.

Metoda identifikace systému v uzavřené smyčce

Posledním hlavním cílem je vyvinutí **neinvazivní metody umožňující identifikaci modelu řízeného systému v uzavřené smyčce za běžného provozu**. Aby bylo možné určit, kdy jsou výsledky relevantní, bude vyvinuta metoda pro určení chyby odhadu. Výsledný identifikovaný model bude neceločíselného řádu. Tato metoda může být využita buď ve spolupráci s indexem kvality nebo samostatně, kdy může být sloužit k detekci změny řízeného systému. Navržený algoritmus bude opět implementován do řídicího systému a důkladně otestován jak v simulačním, tak v reálném prostředí.

Další pomocné a doplňkové metody

Kromě výše zmíněných stěžejních algoritmů budou vytvořeny, implementovány a otestovány další doplňkové a pomocné metody, které mají uplatnění v oblasti monitorování a ohodnocování kvality regulace.

3

Robustní metoda automatického nastavení regulátorů

V této kapitole je popsána plně automatická metoda robustního návrhu PID regulátoru s jedním stupněm volnosti pro systém popsaný třemi charakteristickými čísly κ , μ , σ^2 a efektivní šířkou pásma Ω_a . Za definovaných podmínek (systém náleží do apriorně přípustné množiny přenosů, jsou známa charakteristická čísla κ , μ , σ^2 a parametr Ω_a) algoritmus nikdy neselže a je zajištěno splnění všech návrhových požadavků.

V této práci je použito dvou návrhových požadavků: 1) na maximální hodnotu citlivostní funkce M_s a 2) na maximální hodnotu překmitu citlivostní funkce na frekvencích $\omega > \Omega_a$ (mělo by platit, že $|S(j\omega)| \approx 1$, $\omega > \Omega_a$). Tímto způsobem je zajištěna kompatibilita s metodou ohodnocování kvality řízení, která bude popsána v následující kapitole. Dále je zaručeno, že takto navržený regulátor negeneruje řízení na frekvencích $\omega > \Omega_a$, kdy již řízený systém na zásahy regulátoru nereaguje předvídatelně. Alternativně lze za Ω_a dosadit jakoukoliv frekvenci, za kterou nechceme, aby regulátor ovlivňoval řízený systém – například kvůli zamezení vzniku vibrací.

3.1 Efektivní šířka pásma

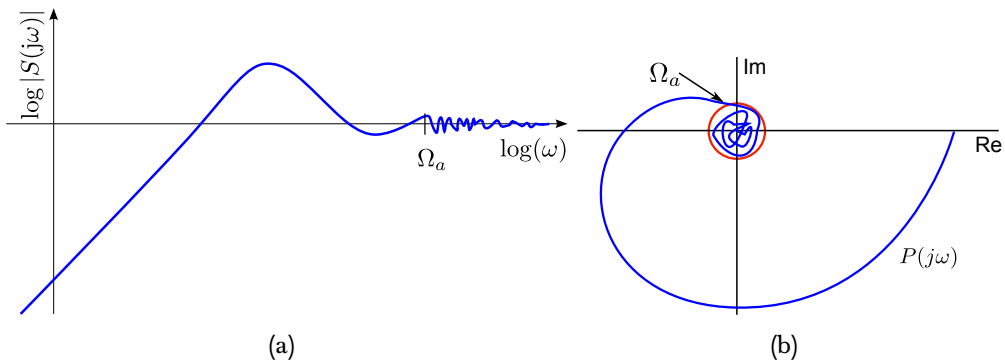
Bodeho věta definuje zásadní omezení na zpětnovazební systém, toto omezení není však jediné. V závislosti na fyzikální realizaci daného systému existuje i omezení na maximální frekvenci, za kterou již zpětnovazební systém nemůže správně fungovat.

Ve skutečnosti nejsou reálné systémy schopné od určité frekvence dodržet lineární frekvenční odezvu. Tato frekvence se nazývá **efektivní šířka pásma** – Ω_a , byla poprvé popsána v přednášce Guntera Steina „Respect the Unstable“ na konferenci IEEE Conference on Decision and Control v roce 1989. Ta byla později publikována ve formě článku Stein (2003). Efektivní šířka pásma nemá exaktní definici, ale lze ji popsat dvěma způsoby (Stein (2003)):

1) Efektivní šířka pásma je frekvence, do které se přenos otevřené smyčky $L(j\omega)$ chová jako lineární systém. Za frekvencí Ω_a je možné garantovat jen to, že amplituda $|L(j\omega)|$ bude klesat dostatečně rychle, není ovšem možné žádným způsobem ovlivnit fázi systému. Jinými slovy se jedná o frekvenci, od které lineární systém přestane být lineární (viz obr. 3.1 a), b). Tj. od frekvence Ω_a nebude odezva reálného systému na sinusový signál sinusová.

2) Alternativně je možné pojem efektivní šířky pásma vysvětlit na základě teorie používané v robustním řízení. Potom je Ω_a frekvence do které je velikost nestrukturované multiplikativní neurčitosti podstatně menší než jedna.

Pro ideální lineární systém je $\Omega_a = \infty$. Ovšem každá reálná realizace lineárního systému má konečnou efektivní šířku pásma! Ta není závislá na typu regulátoru ani na způsobu jeho návrhu.



Obrázek 3.1: Interpretace pojmu efektivní šířka pásma

Prostředí ¹	Faktory ovlivňující efektivní šířku pásma Ω_a
1. MIL	přesnost reprezentace čísla
2. SIL	dosažitelná frekvence vzorkování
3. PIL	rychlost komunikační sběrnice
4. HIL	rozlišení D/A, A/D převodníků, odstup signálu od šumu, saturace
5. realita	další nelinearity, přesnost senzorů/aktuátorů, nemodelovaná dynamika

Tabulka 3.1: Typické faktory ovlivňující efektivní šířku pásma Ω_a v rozdílných prostředích.

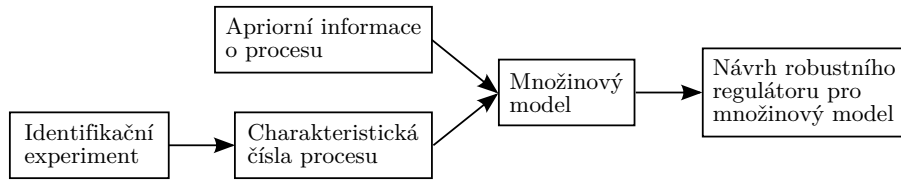
Je ale závislá na fyzikální realizaci systému, použité vzorkovací frekvenci rozlišení a linearitě čidel a akčních členů atd. Tyto vlastnosti řízeného systému generují omezení na chování zpětnovazebního systému ve frekvenční oblasti a znemožňují řízení nad frekvencí Ω_a (viz definice. Z pohledu robustního řízení pak výše uvedené vlastnosti zanáší do systému neurčitost, která opět při překročení frekvence Ω_a znemožní řízení systému. Nejdůležitější faktory ovlivňující efektivní šířku pásma jsou popsány v tabulce 3.1.

Poznámka 3.1. *Tabulka 3.1 by měla být vnímána jako kumulativní výčet faktorů omezujících efektivní šířku pásma, které působí v jednotlivých krocích vývoje řídicího systému. Tedy při simulaci v Simulinku (prostředí MIL) se projeví konečná hodnota Ω_a , ta ale bude ve většině případů velmi vysoká. Při řízení reálného systému je nutné brát v potaz všechny zmíněné faktory, ovšem nejvíce omezující může být kterýkoliv z nich.* \triangle

V případě návrhu řídicího systému je tedy nutné s omezením způsobeným konečnou efektivní šířkou pásma počítat. Protože na vyšších frekvencích než Ω_a reaguje systém na vnější zásahy (tedy i na řízení) nepředvídatelně, je i řízení omezeno frekvencí Ω_a . To znamená, že od frekvence Ω_a musí být hodnota citlivostní funkce (přibližně) rovna jedné $|S(j\omega)| \approx 1$, $\omega > \Omega_a$. Toto omezení lze vyjádřit modifikací Bodeho integrální věty (pro stabilní systémy):

$$\int_0^{\Omega_a} \log |S(j\omega)| d\omega = \delta \doteq 0. \quad (3.1)$$

¹MIL – Model-in-the-Loop; SIL – Software-in-the-Loop; PIL – Processor-in-the-Loop; HIL – Hardware-in-the-Loop



Obrázek 3.2: Struktura algoritmu pro automatické ladění regulátoru

3.2 PID autotuner

Uživatelsky jednoduchý a spolehlivý algoritmus automatického ladění regulátorů dokáže zajistit, že v době uvedení do provozu bude mít řízený systém dobrou kvalitu regulace. Algoritmus vychází z osvědčených metod robustního návrhu regulátorů (viz Schlegel (2000), Schlegel et al. (2003), Schlegel & Večerek (2005), Schlegel (2008), Čech (2008)), které se osvědčily i v průmyslové praxi. Představený algoritmus automatického ladění tyto metody dále rozšiřuje a umožňuje jeho snadné doplnění o algoritmus pro ohodnocování kvality regulace.

Obecné schéma algoritmu pro automatické ladění regulátorů je na obr. 3.2. Základem metody je identifikace parciálního (problémově orientovaného) modelu procesu, kdy tento model obsahuje informaci potřebnou k návrhu regulátoru. Takovýto model bývá mnohem jednodušší a snadněji získatelný než univerzální model, který poskytuje přesnou odezvu na libovolný vstup. Aby bylo možné vytvořit spolehlivou a efektivní metodu automatického návrhu regulátoru, je nutné využít apriorní informace o řízeném procesu. V oblasti řízení procesů je vhodné se orientovat na systémy s monotónní přechodovou charakteristikou (nebo s monotónní frekvenční charakteristikou). Explicitní charakterizace všech monotónních funkcí takového systému je však velmi obtížná. Z toho důvodu má apriorní informace o řízeném procesu jinou formu. Předpokládá se, že řízený proces lze s dostatečnou přesností popsat přenosem, který má libovolný počet neceločíselných pólů a žádné nuly. Byla vybrána množina lineárních t -invariantních systémů obecně neceločíselného řádu s přenosem ve tvaru

$$P(s) = \frac{K}{\prod_{i=1}^p (\tau_i s + 1)^{n_i}}, \quad (3.2)$$

kde $p \in \mathbb{N}$, $K \in \mathbb{R}$, $\tau_i \in \mathbb{R}^+$, $i = 1, \dots, p$, $n_i \in \mathbb{R}^+$, $n_i \geq m$, $i = 1, \dots, p$, $\sum_{i=1}^p n_i \leq n$, kde $n \in \mathbb{R}^+$ je celkový řád procesu a $m \in \mathbb{R}^+$ je minimální povolený stupeň každého pólu. Libovolný přenos mající formu (3.2) budeme dále nazývat apriorně přípustný.

Charakteristická čísla procesu Pro popis procesu je možné použít první tři momenty impulsní funkce

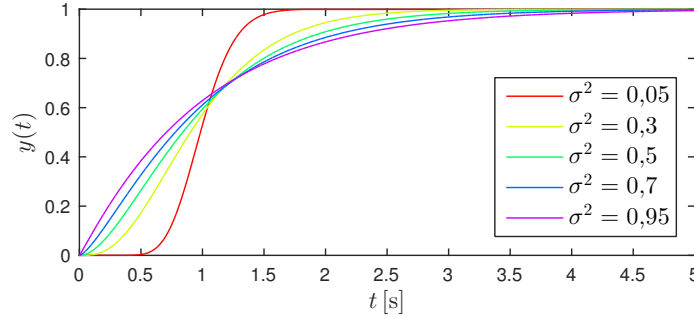
$$m_i = \int_0^{\infty} t^i h(t) dt, \quad i = 0, 1, 2 \quad (3.3)$$

kde $h(t)$ je impulsní funkce procesu. Momenty m_0 , m_1 , m_2 mohou být nahrazeny jinou trojicí charakteristických čísel – κ , μ , σ^2 , která jsou definována jako

$$\kappa = \int_0^{\infty} h(t) dt = m_0, \quad \mu = \frac{\int_0^{\infty} t h(t) dt}{\int_0^{\infty} h(t) dt} = \frac{m_1}{m_0}, \quad \sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \mu)^2 h(t) dt}{\int_0^{\infty} h(t) dt} = \frac{m_2}{m_0} - \frac{m_1^2}{m_0^2}. \quad (3.4)$$

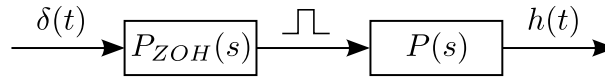
Charakteristická čísla κ , μ , σ mají jasnou fyzikální interpretaci; udávají zesílení soustavy, rezidentní časovou konstantu (přibližné časové zpoždění průchodu pulsu soustavou) a přibližný

celkový čas průchodu pulsu soustavou. Vliv parametru σ^2 na přechodovou charakteristiku je ilustrován na přenosu $P(s) = \frac{1}{(\sigma^2 s + 1)^{\frac{1}{\sigma^2}}}$, viz obr. 3.3.



Obrázek 3.3: Ilustrace vlivu parametru σ^2 na přechodovou charakteristiku systému

Pro **identifikaci charakteristických čísel** κ, μ, σ^2 je možné použít několik metod. Nejčastěji využívaná metoda využívá k vybuzení procesu z ustáleného stavu testovací signál typu puls. Pro identifikaci přenosu je využito sériové spojení $H(s)$ tvarovače nultého řádu $P_{ZOH}(s)$ a identifikovaného přenosu $P(s)$ (viz obr. 3.4). Impulsní funkce přenosu $H(s)$ je identická s odezvou přenosu $P(s)$ na obdélníkový puls.



Obrázek 3.4: Pulsní identifikační experiment

Množinový model. Přenosovou funkci $P(s)$ budeme nazývat přípustnou, jestliže jsou $n, m, \kappa, \mu, \sigma^2$ jsou nezáporná reálná čísla a jsou splněny následující dvě podmínky:

- 1) (Apriorní předpoklad) Přenosová funkce $P(s)$ je ve tvaru (3.2).
- 2) (Momentová podmínka) Pro parametry $K, \tau_i, n_i, i = 1, \dots, p$ přenosové funkce $P(s)$ (3.2) platí

$$\kappa = K, \quad \mu = \sum_{i=1}^p \tau_i n_i, \quad \sigma^2 = \sum_{i=1}^p \tau_i^2 n_i, \quad (3.5)$$

kde κ, μ, σ^2 jsou daná charakteristická čísla (získaná experimentální identifikací přenosu). Množinu všech přípustných přenosových funkcí $P(s)$ budeme označovat $\mathcal{S}^{n,m}(\kappa, \mu, \sigma^2)$ a budeme ji nazývat (momentovým) množinovým modelem. Množinu $\mathcal{V}_\omega^{n,m}(\kappa, \mu, \sigma^2) = \{P(j\omega) : P(s) \in \mathcal{S}^{n,m}(\kappa, \mu, \sigma^2)\}$ budeme nazývat oborem hodnot množinového modelu na frekvenci ω . Obor hodnot představuje ve frekvenční oblasti neurčitost množinového modelu pro danou frekvenci. Je možné ukázat, že obor hodnot je ve frekvenční oblasti uzavřená ohraničená množina. Problém charakterizace všech systémů množinového modelu je proto možné zjednodušit na problém nalezení hranice této množiny. Body na hranici oboru hodnot jsou generovány takzvanými extrémálními přenosovými funkcemi.

Poznámka 3.2. Množinový model $\mathcal{S}^{n,m}(\kappa, \mu, \sigma^2)$ lze bez ztráty obecnosti znormalizovat v zesílení a v čase, tedy $\bar{\kappa} = 1, \bar{\mu} = 1$ a $\bar{\sigma}^2 = \sigma^2/\mu^2$. Parametr $\bar{\sigma}^2$ má potom význam normalizovaného dopravního zpoždění. Normalizovaný množinový model budeme dále označovat $\mathcal{S}^{\infty,m}(1, 1, \bar{\sigma}^2)$. \triangle

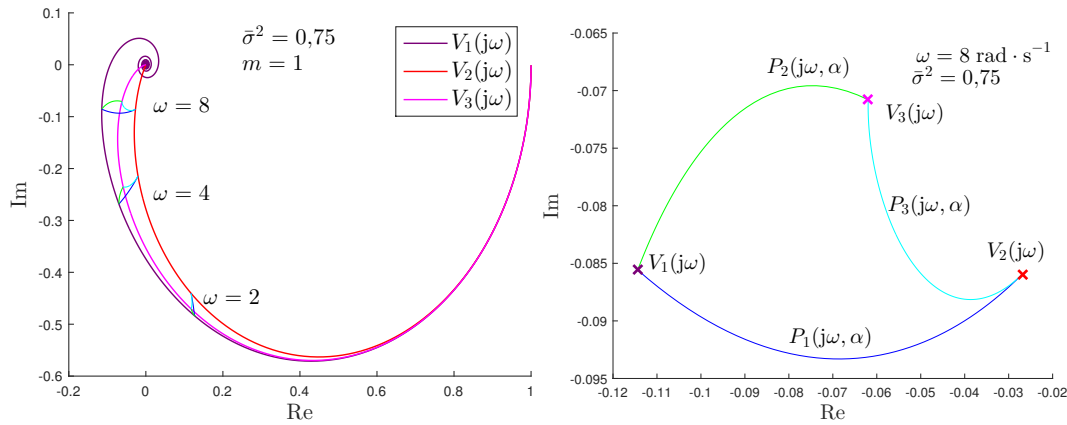
3. ROBUSTNÍ METODA AUTOMATICKÉHO NASTAVOVÁNÍ REGULÁTORŮ

Extremální přenosové funkce jsou velmi důležité pro návrh robustního regulátoru. Pro libovolné $\omega > 0$ je hranice $\partial\mathcal{V}_\omega$ oboru hodnot \mathcal{V}_ω množinového modelu $\mathcal{S}^{\infty,m}(1, 1, \sigma^2)$ tvořena třemi oblouky. Koncové body těchto oblouků jsou tzv. vrcholové systémy:

$$V_1(s) = \frac{e^{-(1-\bar{\sigma}\sqrt{m})s}}{\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{m}}s + 1}, \quad V_2(s) = \frac{1}{(\bar{\sigma}^2 s + 1)^{\frac{1}{\bar{\sigma}^2}}},$$

$$V_3(s) = \frac{1}{\left(\frac{1-\sqrt{2m\bar{\sigma}^2-1}}{2m}s + 1\right)^m \left(\frac{1+\sqrt{2m\bar{\sigma}^2-1}}{2m}s + 1\right)^m}.$$

Bylo dokázáno (Schlegel (2000)), že pokud je regulátor navržen pro systémy ležící na hranici oboru hodnot \mathcal{V}_ω množinového modelu $\mathcal{S}^{n,m}(\kappa, \mu, \sigma^2)$ (tedy extrémální systémy) tak, aby splňoval jisté návrhové požadavky ve frekvenční oblasti, potom jsou tyto požadavky splněny pro všechny systémy množinového modelu $\mathcal{S}^{n,m}(\kappa, \mu, \sigma^2)$. Díky tomu se návrh robustního regulátoru zásadně zjednoduší. Další zjednodušení návrhu regulátoru umožní aproximace, kdy jsou místo všech extrémálních systémů uvažovány jen systémy vrcholové. Parametrizace oboru hodnot \mathcal{V}_ω je ilustrována na množinového modelu $\mathcal{S}^{\infty,m}(1, 1, \bar{\sigma}^2)$, $\bar{\sigma}^2 = 0,75$, viz obr. 3.5.



(a) Obor hodnot modelu $\mathcal{S}^{\infty,m}(1, 1, \bar{\sigma}^2)$

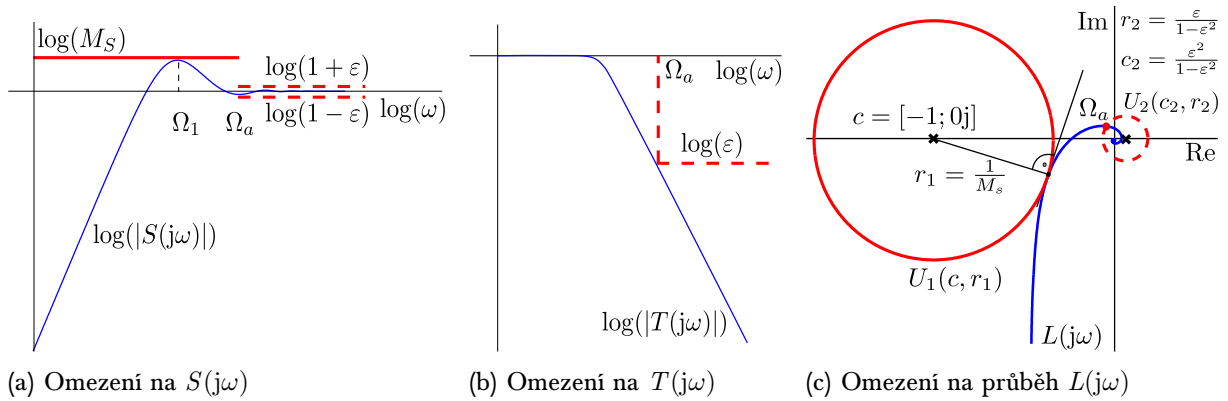
(b) Detail pro $\omega = 8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Obrázek 3.5: Parametrizace množinového modelu $\mathcal{S}^{\infty,m}(1, 1, \bar{\sigma}^2)$, $\bar{\sigma}^2 = 0,75$

Návrh PID regulátoru pomocí robustních regionů

Návrh robustního PID regulátoru je založen na znalosti množinového modelu $\mathcal{S}^{n,m}(1, 1, \bar{\sigma}^2)$. Do návrhu regulátoru jsou promítnuty požadavky na chování uzavřené smyčky (v tomto případě budou dva). Základním požadavkem je zajištění robustnosti ve stabilitě, což reprezentuje požadavek **1**) na omezení na maximální hodnotu citlivostní funkce M_S . Omezení na velikost M_S patří mezi standardní návrhové požadavky, umožňuje omezit zesílení poruch regulátorem. Tento požadavek je nutné doplnit o kontrolu, zda Nyquistova křivka $L(j\omega)$ neobkličuje bod $-1, 0j$, čímž je zajištěna stabilita uzavřeného systému. Protože chceme, aby byl algoritmus autotuneru i samotný navržený regulátor plně kompatibilní s novou metodou pro ohodnocování kvality regulace, bude definován návrhový požadavek **2**) omezující maximální velikost citlivostní funkce pro frekvence $\omega > \Omega_a$. Omezení na maximální velikost $|S(j\omega) - 1| \leq \varepsilon$, $\omega > \Omega_a$ zaručuje, že činnost regulátoru se omezuje na frekvenční rozsah $\omega < \Omega_a$. Oba požadavky jsou ilustrovány na obr. 3.6.

Poznámka 3.3. Přidání návrhového požadavku 2) – omezení šířky pásma regulátoru má velký praktický význam. Takto navržený PID regulátor najde uplatnění nejen jako součást systému pro automatické ohodnocování kvality regulace, ale lze s úspěchem nasadit samostatně. Například v aplikacích,

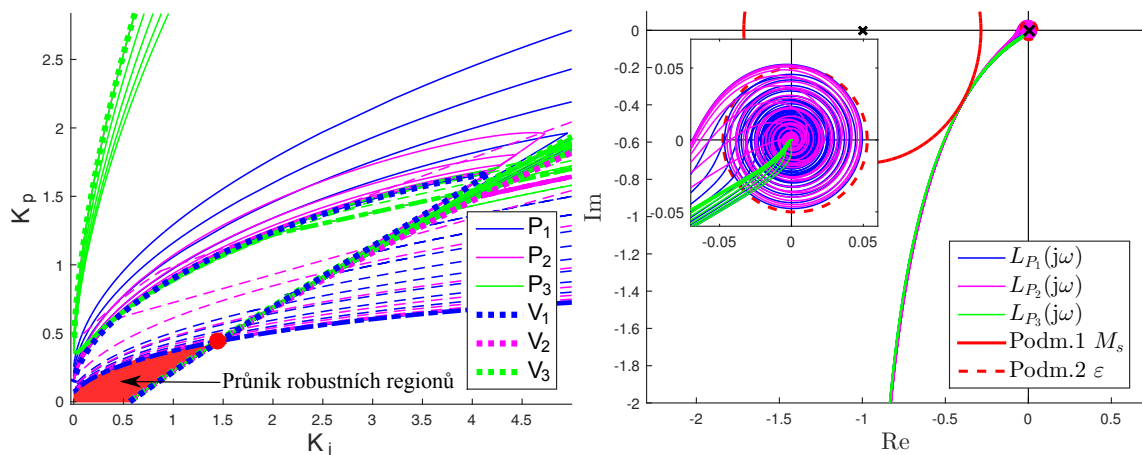

Obrázek 3.6: Návrhové požadavky pro výpočet PID regulátoru

kde by zásahy regulátoru na frekvencích $\omega > \Omega_a$ vyvolávaly oscilace řízené veličiny nebo vibrace stroje. Parametr Ω_a v tomto případě bude mít význam klasické šířky pásma. \triangle

Výběr nejlepšího regulátoru Výsledné parametry regulátorů, které splňují obě podmínky odpovídají průniku robustních regionů náležícím k obou podmínkám pro všechny extrémální systémy. Ze všech přípustných regulátorů je nutné pomocí dodatečného kritéria vybrat ten nejlepší. Ukazuje se, že je vhodné vybrat nejrychlejší regulátor, tedy ten, který pro přechodovou charakteristiku minimalizuje kritérium $J = \int_0^\infty e(t)dt$ kde $e(t)$ je regulační odchylka. V parametrické rovině $K_i - K_p$ se jedná o regulátor s nejvyšší složkou K_i , tedy i s největším zesílením.

Algoritmus 3.1. Návrh robustního regulátoru s využitím množinového modelu

1. Identifikace charakteristických čísel procesu κ, μ, σ^2
2. Nalezení robustního regionu (množiny vyhovujících regulátorů) pro jeden extrémální systém a jeden návrhový požadavek
3. Nalezení robustních regionů pro všechny extrémální systémy a návrhové požadavky
4. Nalezení průniku robustních regionů, výběr optimálního regulátoru (viz obr. 3.7)


Obrázek 3.7: Robustní návrh PID regulátoru pro proces popsaný char. čísly $\kappa = 1, \mu = 1, \sigma^2 = 0.41$

4

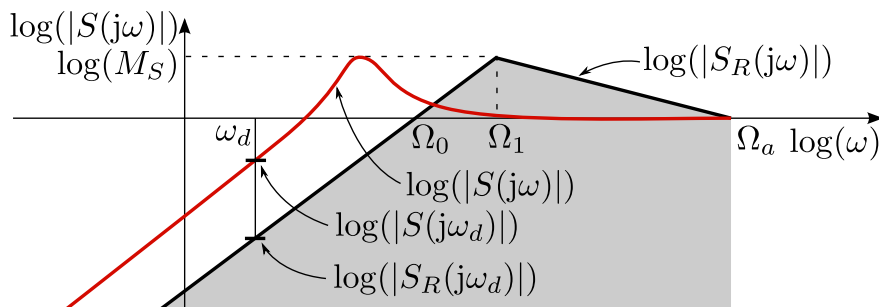
Index kvality řízení

Přestože existují metody pro oceňování kvality regulačních smyček s PID regulátory, žádná z nich se v praxi příliš nerozšířila. Stále existuje silná poptávka po jednoduché a spolehlivé metodě umožňující monitorovat a oceňovat kvalitu řízení (především) PID regulátorů.

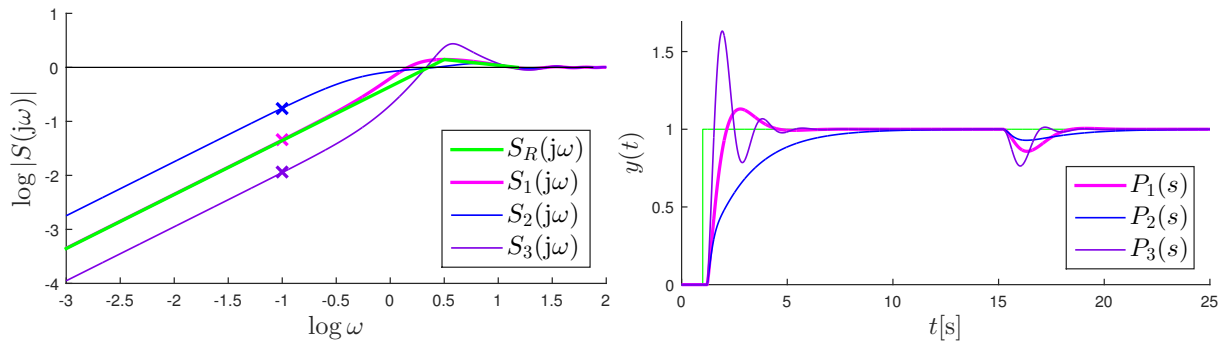
V této kapitole bude představena nová metoda umožňující monitorování kvality jednoduché regulační smyčky s PID regulátorem. Na rozdíl od ostatních publikovaných metod jsou monitorovány vlastnosti zpětnovazebního systému ve frekvenční oblasti. Index kvality je definován jako poměr aktuální citlivostní funkce regulačního obvodu ku referenční. Referenční citlivostní funkce je popsána pomocí dvou parametrů – M_s a Ω_a , tedy stejných parametrů, jaké jsou využity k definování návrhových požadavků PID autotuneru v kapitole 3. Pro výpočet indexu je nutné znát jeden bod citlivostní funkce $|S(j\omega_d)|$. K identifikaci tohoto bodu byla využita metoda běžící Fourierovy transformace, která umožňuje jeho identifikaci v reálném čase. Pro identifikaci bodu citlivostní funkce je nutné systém vybudit harmonickým signálem na frekvenci ω_d (kromě případů, kdy je v systému přítomna vhodná porucha). Ve většině případů však lze zvolit přijatelnou amplitudu perturbací, která výstup systému ovlivní pouze málo a především jen dočasně, po dobu měření indexu.

4.1 Definice indexu kvality řízení

K odvození vztahů pro výpočet indexu kvality řízení je nejprve nutné definovat referenční tvar citlivostní funkce. Předpokládá se, že řízený systém má monotónní přechodovou charakteristiku a regulátor obsahuje integrační složku (těmto předpokladům vyhovuje drtivá většina regulačních smyček v oblasti řízení průmyslových procesů). Při splnění těchto předpokladů je referenční citlivostní funkce $S_R(j\omega)$ volena ve tvaru, který je zobrazen na obr. 4.1 a pro její definování postačí pouze dva parametry: Ω_a a M_S . Pro zvolenou frekvenci $\omega_d \in (0, \Omega_0)$ je index kvality



Obrázek 4.1: Princip indexu kvality řízení



(a) Citlivostní funkce s vyznačeným bodem odhadu in- (b) Odezva uzavřených systémů na změnu referenční dexu I_p

Obrázek 4.2: Příklad využití indexu I_p pro detekci změny kvality řízení

řízení je definován jako

$$I_p \triangleq \frac{|S_R(j\omega_d)|}{|S(j\omega_d)|}, \quad (4.1)$$

jedná se tedy o poměr hodnoty referenční citlivostní funkce $|S_R(j\omega_d)|$ ku aktuální hodnotě $|S(j\omega_d)|$ (viz obr. 4.1). Hodnotu referenční citlivostní funkce v bodě ω_d lze vypočítat ze vztahu $|S_R(j\omega_d)| = \frac{M_S \omega_d}{\Omega_1}$, $\omega_d \in (0, \Omega_0)$, aktuální hodnota citlivostní funkce $|S(j\omega_d)|$ může být změřena pomocí vhodného experimentu. Index kvality řízení lze popsat následujícím vztahem:

$$I_p = \frac{M_S \omega_d \ln(M_S)}{\Omega_a (\ln(M_S) M_S - M_S + 1)} \cdot \frac{1}{|S(j\omega_d)|}, \quad (4.2)$$

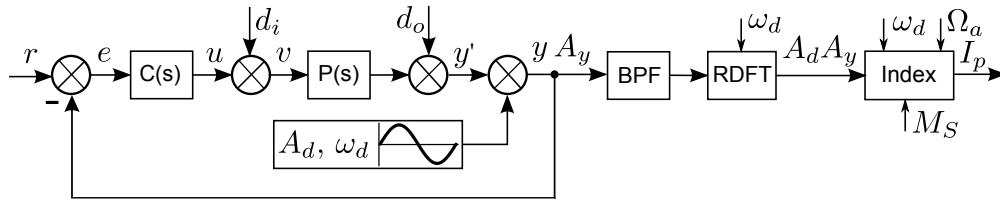
kde $|S(j\omega_d)| = \frac{A_y}{A_d}$ (za předpokladu, že je systém vybuzen harmonickou poruchou).

Význam a způsob výpočtu indexu kvality I_p je ilustrován na obr. 4.2 a), b). Je uvažován systém 2. řádu s přenosem $P_1(s) = \frac{e^{-0,2s}}{s^2 + 3s + 2}$, $M_S = 1,4$, s dobře nastaveným PID regulátorem. Pro uzavřený systém je vypočítán index kvality řízení $I_{p1} = 0,98$; systém má tedy velmi dobrou kvalitu regulace. Nyní předpokládejme, že se parametry řízeného systému změni (přenosy $P_2(s)$, $P_3(s)$), parametry PID zůstávají. Pro uzavřené systémy s $P_2(s)$ a $P_3(s)$ byl opět vypočítán index kvality řízení: $I_{p2} = 0,25$, $I_{p3} = 3,91$. Protože pro $P_1(s)$ je regulátor nastavený správně, významná změna indexu kvality ukazuje na problém.

4.2 Odhad indexu kvality

Index kvality byl navržen tak, aby dokázal vyčíslit kvalitu řízení jednoduché regulační smyčky s PID regulátorem a zároveň byl uživatelsky co nejvíce přívětivý, tj. měl malý počet jasně definovaných parametrů. Parametry jsou celkem tři; dva z nich – efektivní šířka pásma Ω_a a maximální hodnota citlivostní funkce M_S definují referenční citlivostní funkci $S_R(j\omega)$. Třetím parametrem je frekvence ω_d , která definuje bod ve kterém probíhá měření citlivostní funkce $|S(j\omega_d)|$ a výpočet referenční citlivostní funkce $|S_R(j\omega_d)|$. Pro odhad velikosti bodu citlivostní funkce $|S(j\omega_d)|$ je tedy nutné, aby byl uzavřený systém vybuzen harmonickým signálem s amplitudou A_d a frekvencí $\omega_d \in (0, \Omega_0)$. Schéma algoritmu pro odhad indexu kvality řízení je zobrazeno na obr. 4.3.

4. INDEX KVALITY ŘÍZENÍ



Obrázek 4.3: Schéma algoritmu pro odhad kvality regulace

Běžící diskretní Fourierova transformace Pro měření amplitudy A_y bude využito algoritmu běžící (vlečné) diskretní Fourierovy transformace (RDFT, running discrete Fourier transform). Použití tohoto algoritmu je popsáno například v Olkkonen (1995). RDFT vychází z klasické diskretní Fourierovy transformace (DFT, discrete Fourier transform), které se běžně využívá k spektrální analýze signálů. Na rozdíl od běžně používaných algoritmů (například FFT) umožňuje RDFT výpočet Fourierových koeficientů v reálném čase. Algoritmus RDFT má velmi malé nároky na výpočetní výkon, protože jsou výpočty rovnoměrně rozloženy v čase (na rozdíl od FFT, kdy je nutné všechny výpočty provést najednou). Nízké výpočetní nároky RDFT jsou vykoupeny možností výpočtu DFT pouze pro jednotlivé konkrétní frekvence, což je ovšem pro odhad bodu citlivostní funkce plně dostačující. Existuje možnost paralelního spuštění více RDFT algoritmů a tedy i možnost současného výpočtu Fourierových koeficientů pro řádově jednotky až desítky frekvencí. Algoritmus RDFT byl využit nejen v metodě pro ohodnocování kvality regulace, ale i v metodě pro identifikaci systému v uzavřené smyčce a byl také implementován jako samostatný blok. Při implementaci bylo využito inovativního přístupu, který eliminuje riziko kumulace numerických chyb.

4.3 Výpočet maximálních hodnot indexu pro přípustné systémy a PID regulátor

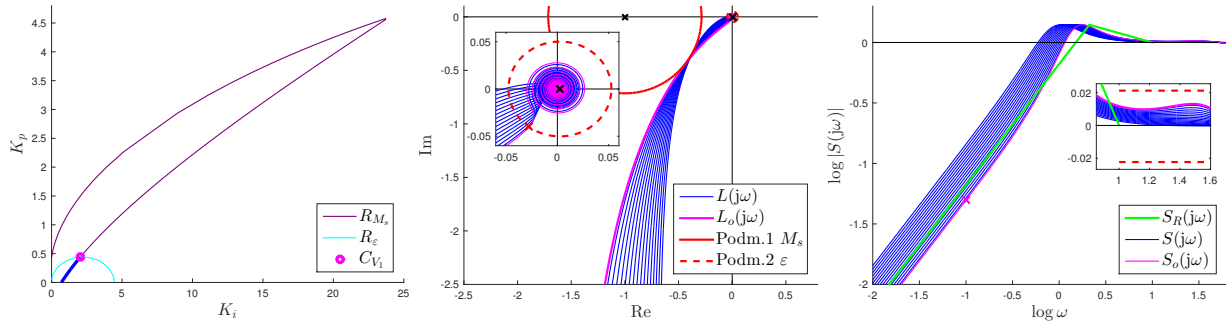
Hodnota indexu kvality I_p je vztažena k referenční citlivostní funkci a index tak není vázaný na konkrétní typ regulátoru (ten jen musí obsahovat integrační složku). To je na jednu stranu výhodou, protože je tak oceňování kvality univerzálnější. Na druhou stranu je to značná nevýhoda, protože výsledný index není vztažen k konkrétnímu PID regulátoru.

Pro praktické využití je velmi užitečné znát jakých maximálních a minimálních hodnot může index kvality I_p nabývat pro množinový model $\mathcal{S}^{n,m}(\kappa, \mu, \sigma^2)$ a PID regulátor. Lze dokázat, že index I_p nabývá své maximální a minimální hodnoty vždy pro některé extrémální přenosy. Velmi často jsou to přenosy V_1 a V_2 . Z tohoto důvodu budeme dále tyto systémy používat jako aproximaci nejlépe a nejhůře říditelného systému daného množinového modelu. Přenos V_1 stejně jako v kapitole 3 aproximuje nejhůře říditelný systém a spolu s robustním regulátorem C_R budou používány pro výpočet nejmenšího indexu I_p pro množinový model $\mathcal{S}^{n,m}(\kappa, \mu, \sigma^2)$. Poznamenejme, že díky aproximaci je robustní regulátor shodný s regulátorem navrženým přímo pro tento systém, tedy $C_R = C_{V_1}$. Tento index označíme jako referenční $I_{p_{ref}}$. Přenos V_2 naopak aproximuje nejlépe říditelný systém množinového modelu $\mathcal{S}^{n,m}(\kappa, \mu, \sigma^2)$ a spolu s regulátorem C_{V_2} (regulátor navržený přímo pro systém V_2) budou používány pro výpočet nejvyššího možného indexu $I_{p_{max}}$ pro množinový model.

Návrh regulátoru s nejvyšší kvalitou regulace pro vrcholový systém V_1 je ilustrován na obr.

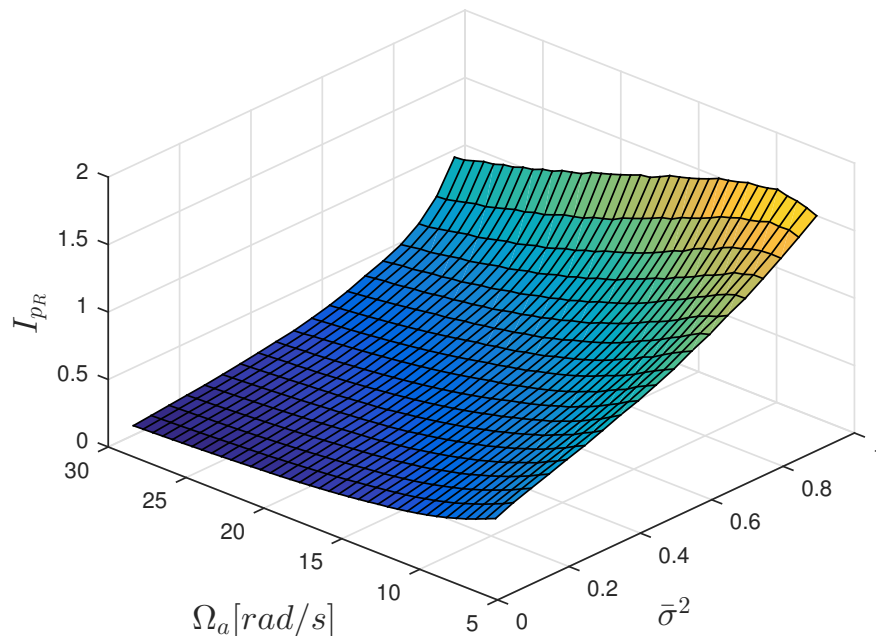
4.4 Použití indexu kvality pro detekci špatně naladěných smyček

4.4. Postup návrhu regulátoru je totožný s postupem popsáním v kapitole 3. Lze dokázat, maximální index I_p má regulátor, který maximalizuje zesílení integrační složky K_i . Touto metodou lze vypočítat mapu indexů I_{pRef} (viz obr. 4.5), který lze při znalosti modelu systému a aktuálního indexu I_p využít k vyhodnocení kvality regulace.



(a) Robustní regiony pro daný systém a podmínky 1), 2) s vyznačeným optimálním regulátorem (b) $L(j\omega)$ pro vybrané regulátory s vyznačeným optimálním regulátorem (c) $S(j\omega)$ pro vybrané regulátory s vyznačeným optimálním regulátorem

Obrázek 4.4: Návrh PID regulátoru s nejvyšší kvalitou regulace pro vrcholový systém V_1 , $\bar{\sigma}^2 = 0,85$

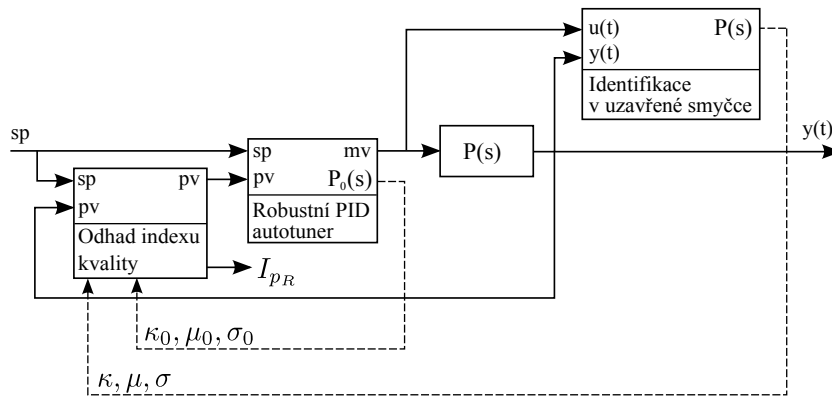


Obrázek 4.5: Hodnoty indexu kvality I_{pRef} pro nejlepší PID regulátor a vrcholový systém V_1

4.4 Použití indexu kvality pro detekci špatně naladěných smyček

Pro posouzení kvality regulace na základě I_p je nutné tento index správně interpretovat. V zásadě je možné index kvality použít dvěma způsoby:

4. INDEX KVALITY ŘÍZENÍ



Obrázek 4.6: Schéma algoritmu pro měření relativního indexu kvality I_{pR}

Standardní index kvality. V tomto případě se předpokládá standardní použití indexu kvality tak, jak je definován v kapitole 4.1. Kromě měření bodu citlivostní funkce se předpokládá znalost Ω_a a M_S . V praxi je možné tento index využívat následujícím způsobem: Pokud budeme uvažovat, že systém má na počátku monitorování kvality řízení dobře nastavený regulátor (a tedy i dobrou kvalitu regulace), je vhodné sledovat změny indexu I_p oproti počátečnímu stavu. Pokud v průběhu ohodnocování kvality dojde ke významnému zmenšení indexu I_p , lze s jistotou říci, že se kvalita řízení snížila (regulační smyčka je pomalejší, než byla při prvním měření indexu). Významné zvětšení hodnoty I_p také ukazuje na možný problém. V tomto případě má regulační smyčka rychlejší odezvu, ale tato rychlejší odezva je s největší pravděpodobností vykoupena překročením požadovaného M_S a tím i nižší robustností ve stabilitě a vyšší kmitavostí – kvalita řízení je tedy nevyhovující.

Relativní index kvality Index kvality je vázaný na konkrétní typ regulátoru (PID) a konkrétní způsob jeho návrhu. Předpokládá se znalost problémově orientovaného modelu systému ($\mathcal{S}^{n,m}(\kappa, \mu, \sigma^2)$), na jehož základě jsou určeny referenční hodnoty indexu kvality pro daný model a regulátor. Model může být identifikován pomocí pulsního experimentu (viz kapitola ??) nebo v uzavřené smyčce (metoda bude představena a podrobně popsána v kapitole 5).

Jako referenční hodnoty indexu kvality bude využito I_{pRef} (viz obr. 4.5). Jako pomocný parametr při určování kvality řízení může být využito i I_{pmax} . Relativní index kvality řízení I_{pR} lze při znalosti charakteristických čísel procesu κ, μ, σ^2 vypočítat jako poměr aktuálního indexu kvality I_p ku indexu referenčnímu I_{pRef} :

$$I_{pR} = \frac{I_p}{I_{pRef}}. \quad (4.3)$$

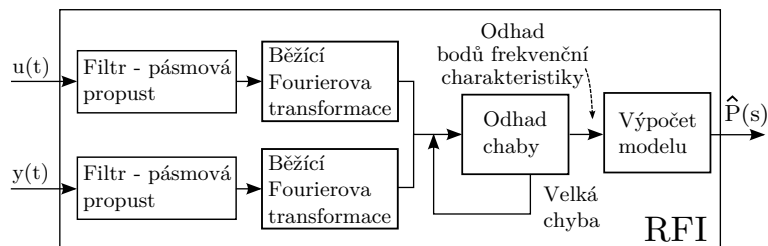
Pomocí I_{pR} je tedy možné snadno a rychle zjistit, jaká je kvalita řízení ve srovnání s referenčním robustním PID regulátorem. Ideální stav nastává, pokud $I_{pR} \doteq 1$, tedy referenční index kvality se přibližně rovná aktuálnímu změřenému indexu. Pokud nastane situace, kdy $I_{pR} \ll 1$ nebo $I_{pR} \gg 1$, je vhodné analyzovat příčiny zhoršení kvality regulace a podniknout patřičné kroky k nápravě vzniklého stavu (přeladit regulátor, provést údržbu řízeného systému atd.). Základní schéma výpočtu I_{pR} je na obr. 4.6.

5

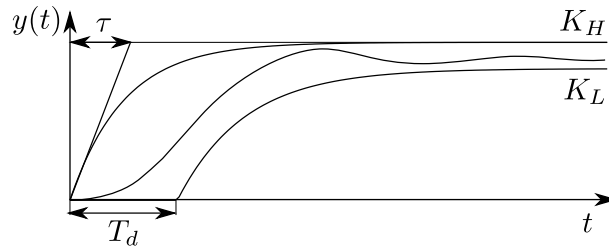
Identifikace systému v uzavřené smyčce

Jedním ze způsobů monitorování kvality regulace je detekce změny řízeného systému. Vychází se z předpokladu, že při uvádění systému do provozu byl adekvátně nastaven i příslušný regulátor. Časem ale může u řízeného systému dojít k podstatným změnám (opotřebení a poruchy akčních členů nebo senzorů, změna dynamiky systému způsobená například změnou vstupních surovin a mnohým dalším). V těchto příkladech se může významně snížit kvalita regulace. Tento problém by často mohl být vyřešen včasnou detekcí změny řízeného systému a přeladěním regulátoru. Nabízí se zdánlivě jednoduché řešení – kontinuální identifikace systému. Protože se ale v předpokládané oblasti využití metody (řízení průmyslových procesů) jedná většinou o systémy s nepřetržitým provozem, není možné využít standardní metody identifikace v otevřené smyčce. Bude tedy nutné provádět identifikaci systému v uzavřené smyčce, navíc pouze s minimálním (ideálně žádným) vnějším vybudováním systému.

V této kapitole bude popsána nová metoda identifikace systému v uzavřené smyčce využívající k vybudování systému jen vnější vlivy (například změny požadované hodnoty). Základem metody, jejíž schéma je znázorněno na obr. 5.1, je identifikace jednoho bodu frekvenční charakteristiky (na libovolné frekvenci). Pro tento účel je používána běžící diskrétní Fourierova transformace vstupního a výstupního signálu řízeného systému. Odhad bodu frekvenční charakteristiky je určen jako podíl Fourierova obrazu výstupu ku obrazu vstupu. Protože je tento odhad zatížen chybou, je tato odhadována a díky tomu jsou použity jen ty odhady bodu frekvenční charakteristiky, kdy je indikována malá chyba odhadu. Většinou je žádoucí identifikovat více bodů (typicky 2-10), čehož lze dosáhnout vícenásobnou aplikací zmíněného postupu; při vhodné implementaci je pak možné provádět paralelní identifikaci. Na základě znalosti několika bodů frekvenční charakteristiky bude vypočten obecný model neceločíselného řádu vhodný pro monitorování kvality řízení i pro návrh regulátoru.



Obrázek 5.1: Struktura odhadu modelu systému na základě běžící Fourierovy transformace



Obrázek 5.2: Apriorní informace o řízeném procesu nutná k výpočtu chyby odhadu: časová konstanta τ , maximální zpoždění T_d , meze statického zesílení K_L , K_H .

5.1 Výpočet chyby odhadu

Aby byla popisovaná metoda identifikace bodu frekvenční charakteristiky použitelná v praxi, musí obsahovat i algoritmus pro výpočet chyby odhadu, který umožní používat jen relevantní odhady.

Protože je ale uvažován model s konečnou časovou odezvou na konečném časovém intervalu (obrazy jsou počítány pomocí diskrétní Fourierovy transformace s plovoucím oknem délky M), platí

$$Y(z) = \sum_{k=0}^{M-1} y_k z^{-k}, \quad U(z) = \sum_{k=0}^{M-1} u_k z^{-k}, \quad (5.1)$$

kde $y_k = 0$ pro $k < 0$, $u_k = 0$ pro $k < 0$, $y_k = 0$ pro $k \geq M$, $u_k = 0$ pro $k \geq M$. Diskrétní Fourierovu transformaci signálu y_k lze zapsat ve tvaru

$$\begin{aligned} Y(z) &= \sum_{k=0}^{M-1} y_k z^{-k} = \left(\sum_{i=0}^{N-1} h_i z^{-i} \right) \left(\sum_{k=0}^{M-1} u_k z^{-k} \right) + R_0(z) - L_0(z) \\ Y(z) &= P(z) \cdot U(z) + R_0(z) - L_0(z) \\ R_0(z) &= \sum_{k=1}^{N-1} \left(\sum_{i=1}^{N-1} h_i u_{k-i-1} \right) z^{-k+1} \\ L_0(z) &= \sum_{k=1}^{N-1} \left(\sum_{i=1}^{N-1} h_i u_{M-i} \right) z^{-(M+k-1)} \\ |E(z)| &= |R_0(z) - L_0(z)| \leq |R_0(z)| + |L_0(z)|, \end{aligned} \quad (5.2)$$

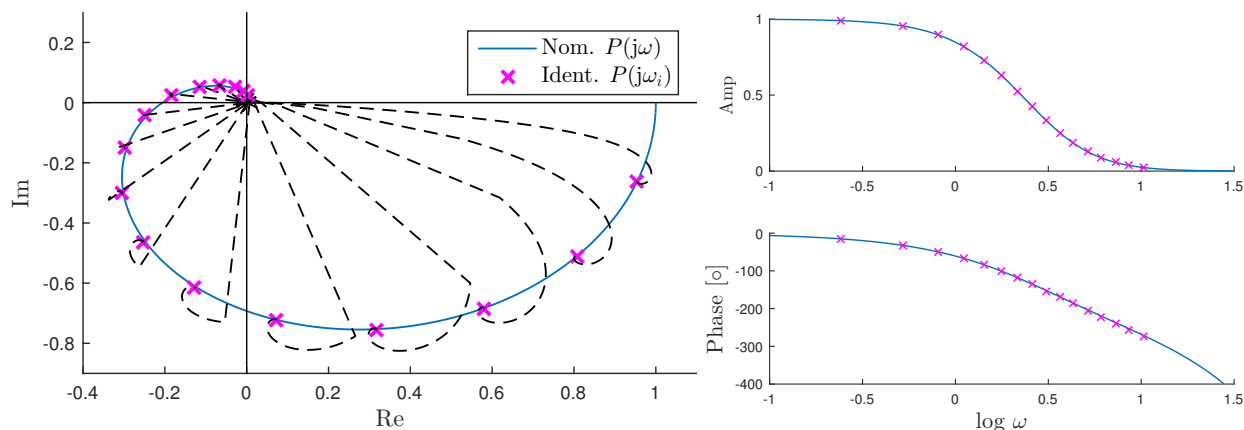
kde M je délka posloupnosti pro Fourierovu transformaci, N délka impulsní posloupnosti a h_i její koeficienty. Residua R_0 , L_0 vzniklá kvůli nesplnění podmínek ve vztahu (5.1). Popisují chybu odhadu $E(z)$, která lze odhadnout pomocí trojúhelníkové nerovnosti.

Pro výpočet chyby odhadu je nutná určitá apriorní informace o řízeném systému (je znázorněna na obr. 5.2). Přechodová charakteristika systému je shora omezena systémem prvního řádu se statickým zesílením K_H a časovou konstantou τ , zdola pak systémem 1. řádu se stat. zesílením K_L , časovou konstantou τ s dopravním zpožděním T_d . Pro statické zesílení systému tedy platí $K_L \leq K \leq K_H$. Dopravní zpoždění je charakterizováno číslem L , kdy platí $T_d = LT$, kde T je perioda vzorkování.

Příklad 5.1. Na tomto příkladu je ilustrováno použití metody rekurzivní frekvenční identifikace. Metoda byla použita pro identifikaci šestnácti bodů frekvenční charakteristiky systému s PID

5.2 Výpočet modelu systému ze dvou bodů frekvenční charakteristiky

regulátorem v uzavřené smyčce. K vybuzení systému pro identifikaci stačila změna referenční hodnoty. Průběh identifikace bodů frekvenční charakteristiky a jejich porovnání s nominální frekvenční charakteristikou systému je znázorněno na obr. 5.3 a), b).



(a) Identifikované body frekvenční charakteristiky

(b) Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika

Obrázek 5.3: Příklad 5.1 – Průběh a výsledky identifikace bodů frekvenční charakteristiky



5.2 Výpočet modelu systému ze dvou bodů frekvenční charakteristiky

Identifikované body frekvenční charakteristiky je samozřejmě možné přímo použít například k detekci změny systému, ale vhodnější je jejich využití k výpočtu modelu systému ve formě přenosu. V této sekci bude podrobně popsán postup výpočtu přenosu systému v předem definované tvaru ze dvou bodů frekvenční charakteristiky.

Je uvažován přenos systému ve tvaru

$$P(s) = K \frac{e^{-Ds}}{(\tau s + 1)^n}, \quad K, D, \tau, n \in \mathbb{R}^+, \quad (5.3)$$

kde K je statické zesílení, D dopravní zpoždění, τ časová konstanta a n řád systému (může být neceločíselný). Parametry tohoto systému lze vypočítat na základě znalosti dvou bodů frekvenční charakteristiky (viz obr. 5.4):

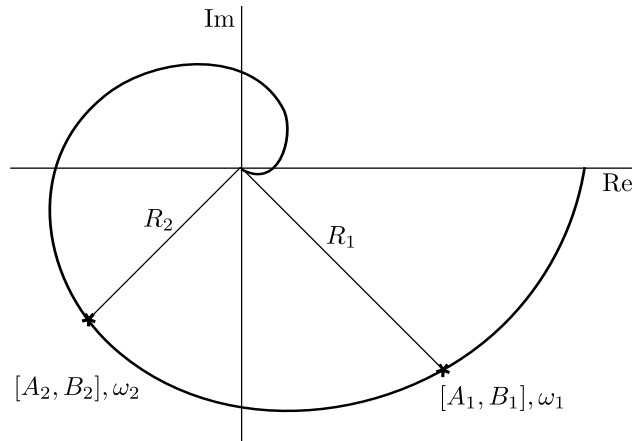
$$\tau \text{ je řešení rovnice } L(\tau) = Q, \quad (5.4)$$

$$n = \frac{2 \ln \frac{R_1}{R_2}}{\ln \frac{\tau^2 \omega_2^2 + 1}{\tau^2 \omega_1^2 + 1}}, \quad (5.5)$$

$$D = \frac{1}{\omega_1} \left[\frac{\pi}{2} \arctan \frac{A_1}{B_1} - n \arctan \tau \omega_1 \right], \quad (5.6)$$

$$K = R_1 [\tau^2 \omega_1^2 + 1]^{\frac{n}{2}}, \quad (5.7)$$

5. IDENTIFIKACE SYSTÉMU V UZAVŘENÉ SMYČCE



Obrázek 5.4: Výpočet přenosu ze dvou bodů frekvenční charakteristiky

kde

$$L(\tau) \triangleq \frac{\omega_2 \arctan(\tau\omega_1) - \omega_1 \arctan(\tau\omega_2)}{\ln \frac{\tau^2\omega_2^2+1}{\tau^2\omega_1^2+1}},$$

$$Q \triangleq \frac{(\omega_2 - \omega_1)\frac{\pi}{2} + \omega_2 \arctan \frac{A_1}{B_1} - \omega_1 \arctan \frac{A_2}{B_2}}{2 \ln \frac{R_1}{R_2}}.$$

Všechny parametry budou kladné, pokud

$$Q \in \langle 0, \frac{\pi(\omega_1 - \omega_2)}{4 \ln \frac{\omega_1}{\omega_2}} \rangle \wedge \frac{\pi}{2} \arctan \frac{A_1}{B_1} - n \arctan \tau\omega_1 > 0.$$

V případě, že neznáme řád procesu n , je nutné vypočítat řešení rovnice $L(\tau) = Q$ numericky, pokud je řád systému známý, lze najít explicitní řešení rovnice $L(\tau) = Q$. Charakteristická čísla procesu pro (5.3) je možné vypočítat jako:

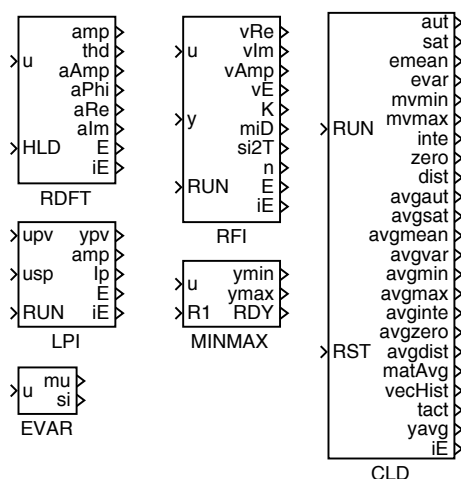
$$\kappa = K, \quad \mu = \tau n + D, \quad \sigma^2 = \tau^2 n, \quad \bar{\sigma}^2 = \frac{\sigma^2}{\mu^2}.$$

Poznámka 5.1. Takto vypočítaná charakteristická čísla vychází z identifikovaného přenosu (5.3). Výše popsaná metoda identifikace obsahuje i výpočet chyby odhadu, na základě kterého se aktualizují parametry identifikovaného přenosu. Přesto může nastat, že identifikace selže – například při špatné apriorní informaci o řízeném systému nebo kvůli špatnému odhadu bodů frekvenční charakteristiky (například kvůli nevhodnému nastavení algoritmu). Proto je takto vypočtená charakteristická čísla κ , μ , σ^2 nutné používat obezřetně. Jsou vhodná především pro detekci změny řízeného systému, pro zpřesnění odhadu indexu kvality a výpočet relativního indexu kvality I_{pR} . Pro automatické ladění regulátorů je vhodnější (a především bezpečnější) využít standardní metodu využívající pulsní experiment. Ten sice probíhá v otevřené smyčce, ale charakteristická čísla procesu jsou zde měřena přímo. \triangle

6

Nové metody pro oceňování kvality regulace v praxi

6.1 Implementace do řídicího systému



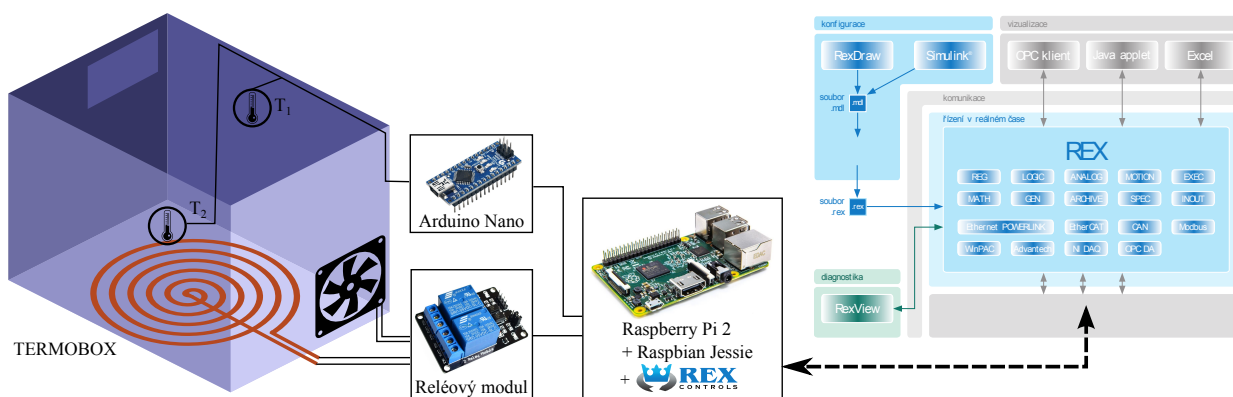
Obrázek 6.1: Funkční bloky pro monitorování kvality regulace vytvořené v rámci této práce

Algoritmy popsané v této práci byly implementovány a zařazeny do řídicího systému REX v podobě funkčních bloků. Tímto krokem bylo zajištěno snadné simulační testování, protože funkční bloky jsou plně kompatibilní se systémem Matlab/Simulink. Především je ale umožněno velmi rychlého nasazení u praktických aplikací na mnoha různých softwarových (Windows, GNU/Linux, PharLap ETS) i hardwarových platformách (od levného Raspberry PI, přes klasické PC, PLC Winpac až po průmyslová PC (IPC)). Tyto nové funkční bloky jsou zobrazeny na obr. 6.1.

Seznam nových funkčních bloků:

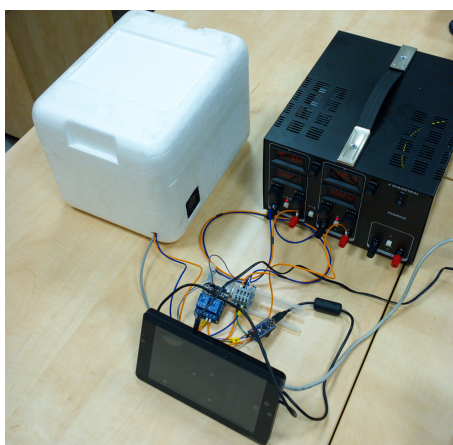
LPI	Odhad indexu kvality řízení (control Loop Performance Index)
RFI	Vlečná frekvenční identifikace (Running Frequency Identification)
RDFT	Vlečná diskrétní Fourierova transformace (Running Discrete Fourier Transform)
MINMAX	Vlečné minimum/maximum
EVAR	Vlečná střední hodnota a směrodatná odchylka
CLD	Diagnostika regulační smyčky (Control Loop Diagnostics)

6.2 Testovací model

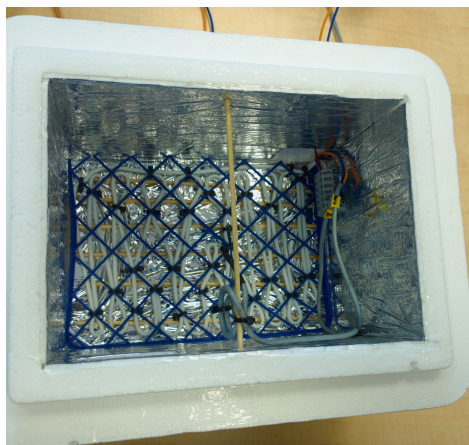


Obrázek 6.2: Schéma zapojení laboratorního modelu TERMObOX

U popisovaných algoritmů se předpokládá jejich využití v oblasti řízení průmyslových procesů. Protože testování nových algoritmů v ostrém provozu není vhodné (a prakticky ani možné), byl vytvořen jednoduchý laboratorní model „TERMObOX“. Jedná se o tepelně izolovaný box vyhříváný topným kabelem s možností chlazení (ventilátor). Ten je využíván především pro generování poruch. Řízení zajišťuje minipočítač Raspberry Pi 2 model B s řídicím systémem REX, spínání topného kabelu a ventilátoru zajišťují relé ovládané digitálními výstupy z Raspberry Pi. Dále byly použity dva digitální teploměry DS18B20; jeden teploměr měří teplotu topného kabelu, druhý teplotu vzduchu uvnitř TERMObOXu. Schéma modelu je znázorněno na obr. 6.2, fotografie na obr. 6.3.



(a) Celkový pohled na model



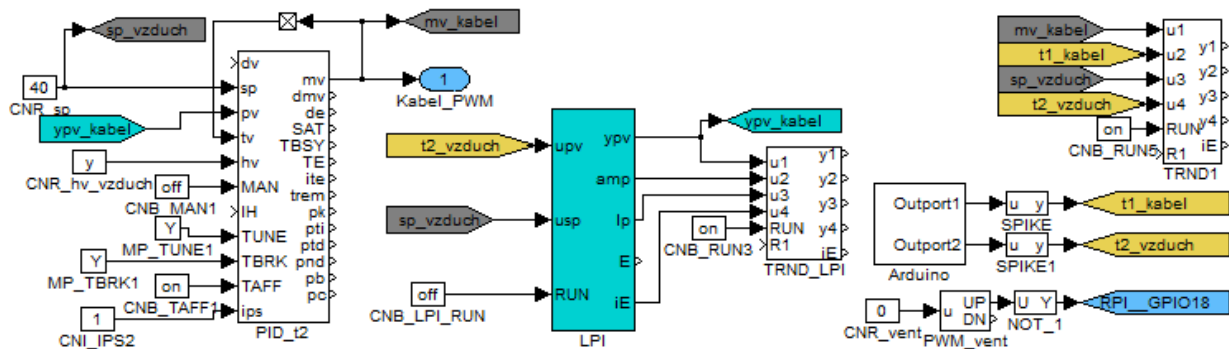
(b) Vnitřek TERMObOXu

Obrázek 6.3: Fotografie laboratorního modelu TERMObOX

Poznámka 6.1. Jako zajímavost lze uvést skutečnost, že tento jednoduchý laboratorní model má i praktické uplatnění. Lze ho použít například k šetrnému ztekucování zkrystalizovaného medu (maximální doporučená teplota tohoto procesu je 40° C) nebo k výrobě jogurtů (doporučená teplota je 38 – 45° C). Oba výše uvedené procesy byly na laboratorním modelu úspěšně otestovány. \triangle

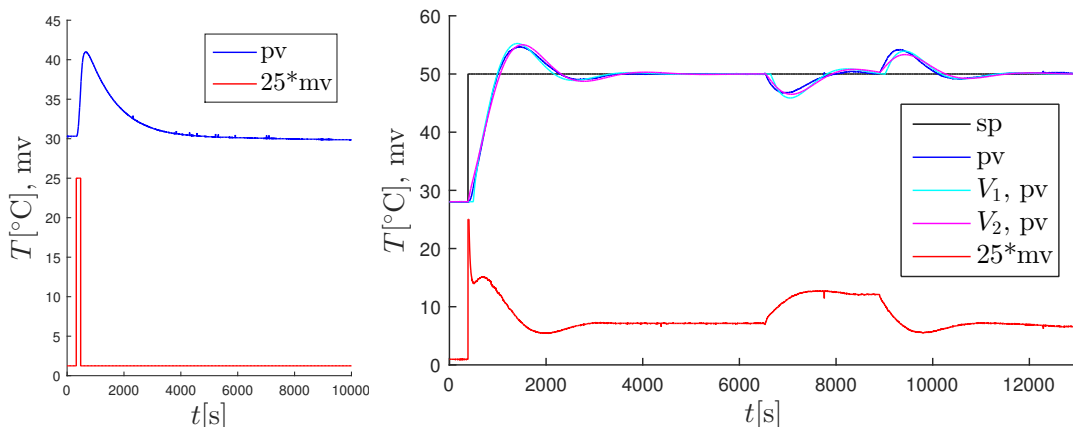
6.3 Testování algoritmů v reálném prostředí

V této sekci budou ukázány vybrané výsledky z testování nových metod na laboratorním modelu TERMOBOX. Při testování byl využíván řídicí systém REX, příklad zapojení funkčních bloků je na obr. 6.4.



Obrázek 6.4: Schéma konfigurace řídicího systému REX pro odhad indexu kvality regulace

Na obr. 6.5 a) je zobrazen pulsní identifikační experiment, na obr. 6.5 b) je vidět odezva uzavřeného systému s naladěným PID regulátorem s omezenou šířkou pásma a její porovnání s odezvami vrcholových systémů V_1 , V_2 se stejným regulátorem.



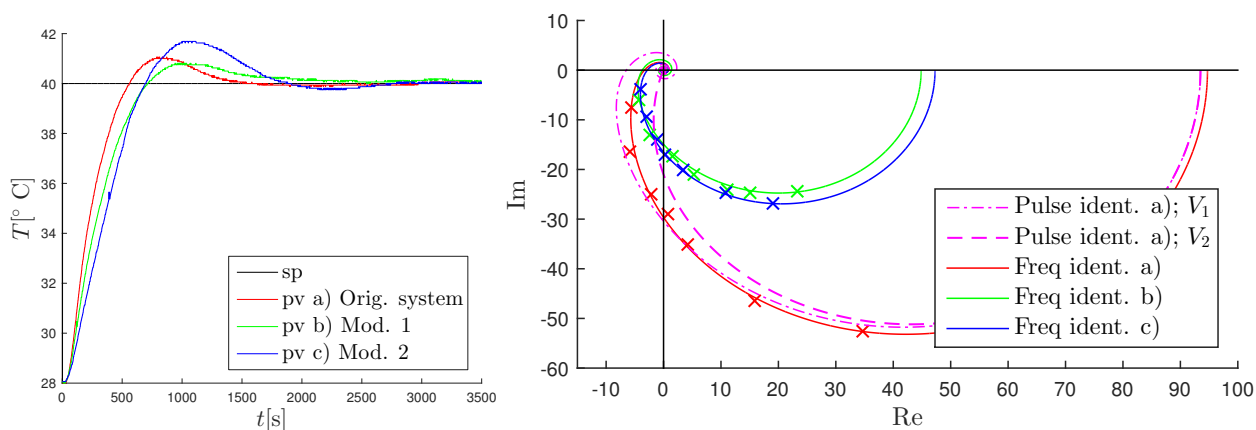
(a) Průběh pulsního identifikačního experimentu (b) Odezva uzavřené smyčky (pro laboratorní model a vrcholové systémy V_1 , V_2), odezva na vstupní poruchu

Obrázek 6.5: Testování robustního PID autotuneru s omezenou šířkou pásma

Metody pro odhad indexu kvality řízení a identifikaci v uzavřené smyčce byly testovány při různých konfiguracích modelu: **a) standardní konfigurace**, **b) s 250 ml vody** v TERMOBOXu (modifikace 1), **c) se sníženým výkonem topného kabelu** (modifikace 2). Tímto způsobem mohla být odzkoušena schopnost algoritmů detekovat změnu systému, případně zhoršení kvality regulace.

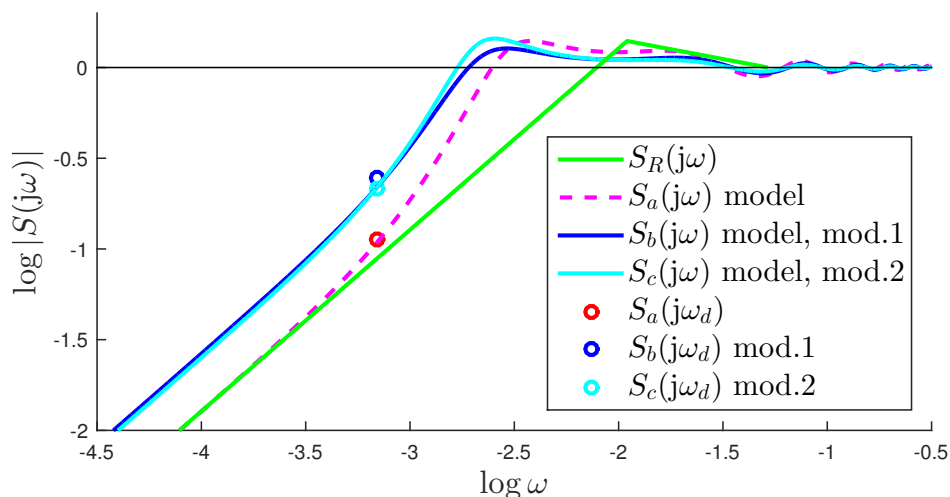
Příklad funkce algoritmu pro identifikaci systému v uzavřené smyčce je uveden na obr. 6.6. Systém byl vybuzen pouze změnou referenční hodnoty, přesto byla identifikace úspěšná. Křížky na obr. 6.6 b) znázorňují identifikované body, plné čáry z nich vypočtené frekvenční charakteristiky a čárkované čáry vykreslují frekvenční charakteristiky vrcholových systémů identifikovaných pulsním experimentem.

6. NOVÉ METODY PRO OCEŇOVÁNÍ KVALITY REGULACE V PRAXI



(a) Detail přechodových charakteristik naměřených na reálném modelu při různých konfiguracích (b) Identifikované body a vypočtené frekvenční charakteristiky identifikovaných modelů

Obrázek 6.6: Identifikace různých konfigurací modelu TERMOBOX v uzavřené smyčce



Obrázek 6.7: Naměřené body citlivostní funkce $S(j\omega_d)$ a jejich porovnání s citlivostními funkcemi $S(j\omega)$ pro identifikované modely různých modifikací TERMOBOXu

Obrázek 6.7 ilustruje funkci odhadu indexu kvality řízení (schéma zapojení je na obr. 6.4). Experimenty byly provedeny pro stejné modifikace řízeného systému, jako v předchozím případě. Naměřené hodnoty indexu kvality I_p poměrně přesně korespondují s citlivostními funkcemi vypočtenými na základě identifikovaných modelů. Tím se zpětně ověřily výsledky identifikace v uzavřené smyčce.

Pomocí výše uvedených metod bylo možné detekovat změnu systému a úspěšně odhalit snížení kvality regulace.

7

Diskuse a závěr

Tato práce se zabývá monitorováním a oceňováním kvality řízení v jednoduchých regulačních smyčkách s PID regulátorem. Předkládané metody si kladou za cíl komplexní řešení této problematiky – od návrhu regulátoru po dlouhodobé monitorování kvality řízení. Hlavní dosažené výsledky jsou shrnuty v následujících bodech:

- **Robustní PID autotuner s omezenou šířkou pásma**

Algoritmus automatického naladění PID regulátoru má v praxi mimořádný aplikační potenciál, umožňuje totiž mnohem rychlejší a spolehlivější nastavení regulátoru než ruční ladění. Protože správné počáteční naladění regulátoru je nutný předpoklad pro dobrou kvalitu regulace, je použití autotuneru logicky prvním krokem ke zkvalitnění řízení. Algoritmus využívá množinový model neceločíselného řádu parametrizovaný třemi charakteristickými čísly – κ, μ, σ^2 a efektivní šířkou pásma Ω_a . Charakteristická čísla jsou identifikována pulsním experimentem, pro identifikaci Ω_a může být použit reléový experiment. Chování uzavřené smyčky je definováno dvěma návrhovými požadavky: 1) na maximální hodnotu citlivostní funkce M_s a 2) $|T(j\omega)| < 1$ pro $\omega > \Omega_a$. Na základě těchto požadavků byla pro výpočet parametrů regulátoru použita metoda robustních regionů. Představený autotuner má jednu zásadní výhodu: Při splnění všech předpokladů (řízený systém náleží do apriorní množiny přenosových funkcí a jsou identifikována jeho charakteristická čísla) návrhová metoda nikdy neselže. Zvolené návrhové požadavky zajišťují vhodné chování regulační smyčky (robustnost ve stabilitě, nevybuzování systému na frekvencích $\omega > \Omega_a$), navíc zajišťují plnou kompatibilitu s dalšími nově vyvinutými algoritmy.

- **Ohodnocování kvality regulace**

Představená metoda umožňuje ohodnocování kvality jednoduché regulační smyčky v reálném čase. Oceňování kvality probíhá na základě indexu I_p ve frekvenční oblasti. Index je definován jako poměr hodnoty referenční citlivostní funkce $|S_R(j\omega_d)|$ ku aktuální hodnotě $|S(j\omega_d)|$ na frekvenci ω_d . Tímto způsobem lze jednoduše posoudit, jak zpětnovazební systém odregulovává nízkofrekvenční poruchy, což je jeho nejobvyklejší úloha v oblasti řízení průmyslových procesů. Referenční citlivostní funkce je definována pomocí parametrů M_s a Ω_a , které jsou použity i v metodě návrhu PID regulátoru. Bod $|S(j\omega_d)|$ je měřen pomocí algoritmu běžící diskrétní Fourierovy transformace, v průběhu procesu identifikace musí být zpětnovazební systém vybuzován harmonickou perturbací (pokud na systém nepůsobí externí porucha na vhodné frekvenci). Pokud je znám model řízeného systému, je možné vypočítat relativní index kvality I_{pR} . Ten udává hodnoty kvality regulační smyčky v poměru k referenčnímu indexu (index, který je dosažen pomocí robustního PID regulátoru pro daný systém). Pokud model systému znám není, lze index používat a sledovat jeho změny.

- **Identifikace v uzavřené smyčce**

Nová metoda umožňuje online i offline identifikaci řízeného systému v uzavřené smyčce za běžného provozu. Metoda identifikuje body frekvenční charakteristiky řízeného systému (typicky 2 - 16). Je zde opět využit algoritmus běžící diskrétní Fourierovy transformace, výsledky (identifikované body frekvenční charakteristiky) jsou validovány pomocí speciálního heuristického algoritmu, který využívá vypočtené chyby odhadu a hodnoty amplitud měřených frekvencí ve vstupním signálu. Díky tomu lze provádět identifikaci za běžného provozu, protože nerelevantní výsledky nejsou použity. Ze změřených bodů (pokud je jich více) jsou vybrány dva vhodné, ze kterých je vypočten model systému ve formě přenosu (obecně neceločíselného řádu). Tento model je možné využívat k detekci změny řízeného systému, pro výpočet relativního indexu kvality nebo po pečlivém uvážení k i návrhu regulátoru. Je nutné podotknout, že tato metoda nemůže být tak přesná jako identifikace pomocí pulsního experimentu použitá k návrhu PID regulátoru ve standardních případech; ta ovšem probíhá v otevřené smyčce.

- **Navržení struktury systému pro monitorování kvality regulační smyčky**

Byla navržena komplexní struktura systému pro monitorování kvality jednoduché regulační smyčky. Tento systém obsahuje výše uvedené algoritmy – robustní PID autotuner, ohodnocování kvality řízení a identifikaci v uzavřené smyčce, které spolu vzájemně spolupracují a doplňují se. Systém umožní automatické vyhodnocování kvality regulace, v případě problému (rozladění smyčky, porucha čidla nebo akčního členu) signalizuje problém obsluze které zvolí vhodné řešení – (automatické) přeladění regulátoru, oprava,... Systém lze realizovat propojením jednotlivých funkčních bloků nebo implementovat jako celek. Výše uvedené algoritmy sice lze samozřejmě provozovat samostatně, není ale možné využívat výhody plynoucí z jejich spolupráce.

- **Implementace algoritmu běžící diskrétní Fourierovy transformace**

Nové metody identifikace v uzavřené smyčce a ohodnocování kvality regulace využívají algoritmus běžící diskrétní Fourierovy transformace. Tento algoritmus byl implementován jako nedílná součást výše uvedených metod a také jako samostatný funkční blok. Při implementaci bylo využito inovativního přístupu, který eliminuje kumulaci numerických chyb, čímž je umožněno dlouhodobé používání tohoto algoritmu v řídicím systému bez rizika vzniku velkých numerických chyb.

- **Implementace pomocných a doplňkových metod**

Byly implementovány další pomocné a doplňkové metody vhodné k aplikaci v oblasti monitorování a ohodnocování kvality regulace. Jsou to například plovoucí střední hodnota a rozptyl, plovoucí maximum/minimum – zde byl opět využit postup pro eliminaci kumulace numerických chyb. Dále byly implementovány vybrané jednoduché metody pro monitorování/ohodnocování kvality řízení.

Výsledky mohou být použity v oblasti řízení průmyslových procesů, všechny metody byly důkladně otestovány jak simulačně, tak na reálných laboratorních experimentech. Metody byly implementovány do řídicího systému v podobě funkčních bloků a jsou připraveny k praktickému nasazení.

Literatura

- Bauer, M. & Craig, I. K. (2008). Economic assessment of advanced process control—a survey and framework. *Journal of Process Control*, 18(1), 2–18.
- Bonavita, N., Bovero, J. C., & Martini, R. (2004). Control loops: performance and diagnostics. In *Presented at: 48th ANIPLA Conference*, volume 14.
- Čech, M. (2008). *Návrh robustních regulátorů s omezenou strukturou pro systémy neceločíselného řádu*. Plzeň: Disertační práce, ZČU Plzeň.
- Choudhury, M. S., Thornhill, N., & Shah, S. (2005). Modelling valve stiction. *Control Engineering Practice*, 13(5), 641 – 658.
- Daneshwar, M. & Noh, N. (2012). Valve stiction in control loops - a survey on effective methods of detection and compensation. In *Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), 2012 IEEE International Conference on*, (pp. 155–159).
- Desborough, L. & Miller, R. (2002). Increasing customer value of industrial control performance monitoring - Honeywell's experience. In *Preprint of Chemical Process Control, CPC-6*, (pp. 153–186), Tucson, Arizona.
- Ender, D. B. (1993). Process control performance: Not as good as you think. *Control Engineering*, 40(10), 180–190.
- Garcia, C. (2008). Comparison of friction models applied to a control valve. *Control Engineering Practice*, 16(10), 1231 – 1243.
- Grimble, M. & Uduehi, D. (2001). Process control loop benchmarking and revenue optimization. In *American Control Conference, 2001. Proceedings of the 2001*, volume 6, (pp. 4313–4327 vol.6).
- Harris, T., Seppala, C., & Desborough, L. (1999). A review of performance monitoring and assessment techniques for univariate and multivariate control systems. *Journal of Process Control*, 9(1), 1 – 17.
- Harris, T. J. (1989). Assessment of control loop performance. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 67(5), 856–861.
- Harris, T. J. & Seppala, C. T. (2002). Recent developments in controller performance monitoring and assessment techniques. In *AICHE Symposium Series*, (pp. 208–222). New York; American Institute of Chemical Engineers; 1998.
- Hoo, K. A., Piovoso, M. J., Schnelle, P. D., & Rowan, D. A. (2003). Process and controller performance monitoring: overview with industrial applications. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 17(7-9), 635–662.
- Horch, A. (2006). Oscillation diagnosis in control loops stiction and other causes. In *American Control Conference, 2006*, (pp. 2086 –2096).
- Huang, B. & Kadali, R. (2008). *Dynamic modeling, predictive control and performance monitoring: A data-driven subspace approach*, volume 374. Springer.
- Huang, B. & Shah, S. L. (1999). *Performance assessment of control loops: theory and applications*. Springer.
- Hugo, A. J. (1999). Process controller performance monitoring and assessment. Technical report, Control Arts Inc.
- Jelali, M. (2006). An overview of control performance assessment technology and industrial applications. *Control Engineering Practice*, 14(5), 441 – 466.
- Jelali, M. (2013). *Control Performance Management in Industrial Automation: Assessment, Diagnosis and Improvement of Control Loop Performance*. Advances in industrial control. Springer.

LITERATURA

- Kano, M. & Ogawa, M. (2010). The state of the art in chemical process control in japan: Good practice and questionnaire survey. *Journal of Process Control*, 20(9), 969 – 982.
- Karra, S. & Karim, M. N. (2009). Comprehensive methodology for detection and diagnosis of oscillatory control loops. *Control Engineering Practice*, 17(8), 939 – 956.
- Kozub, D. J. (2002). Controller performance monitoring and diagnosis. industrial perspective. In *Proc. 15th IFAC Triennial World Congress*.
- Olkkonen, H. (1995). Running discrete fourier transform for time-frequency analysis of biomedical signals. *Medical Engineering & Physics*, 17(6), 455 – 458.
- Ordys, A., Uduehi, D., & Johnson, M. A. (2007). *Process control performance assessment: from theory to implementation*. Springer.
- Paulonis, M. A. & Cox, J. W. (2003). A practical approach for large-scale controller performance assessment, diagnosis, and improvement. *Journal of Process Control*, 13(2), 155 – 168.
- Qin, S. J. (1998). Control performance monitoring – a review and assessment. *Computers & Chemical Engineering*, 23(2), 173 – 186.
- Qin, S. J. (2012). Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis. *Annual Reviews in Control*, 36(2), 220 – 234.
- Qin, S. J. & Yu, J. (2007). Recent developments in multivariable controller performance monitoring. *Journal of Process Control*, 17(3), 221 – 227.
- Rice, R. (2012). Monitoring controller performance and production reliability. Presentation.
- Salahshoor, K. & Khalil Arjomandi, R. (2010). Comparative evaluation of control loop performance assessment schemes in an industrial chemical process plant. In *Control and Decision Conference (CCDC), 2010 Chinese*, (pp. 2603–2608).
- Schlegel, M. (2000). *Nový přístup k robustnímu návrhu průmyslových regulátorů*. Habilitační práce, ZČU Plzeň.
- Schlegel, M. (2008). Robustní identifikace procesů pro automatické ladění regulátorů. In *ARTEP*.
- Schlegel, M., Balda, P., & Štětina, M. (2003). Robustní PID autotuner - momentová metoda. *Automatizace*, 4, 242–246.
- Schlegel, M. & Večerek, O. (2005). Robust design of Smith predictive controller for moment model set. In *Proceedings of IFAC 2005*, Prague, Czech Republic.
- Shah, S., Mitchell, W., & Shook, D. (2005). Challenges in the detection, diagnosis and visualization controller performance data. In *Control Loop Assessment and Diagnosis, 2005. The IEE Seminar on (Ref. No. 2005/11008)*, (pp. 7–21).
- Shardt, Y., Zhao, Y., Qi, F., Lee, K., Yu, X., Huang, B., & Shah, S. (2012). Determining the state of a process control system: Current trends and future challenges. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 90(2), 217–245.
- Stein, G. (2003). Respect the unstable. *IEEE Control Systems Magazine*, 23(4), 12–25.
- Torres, B. S., de Carvalho, F. B., de Oliveira Fonseca, M., & Seixas Filho, C. (2006). Performance assessment of control loops—case studies. In *IFAC ADCHEM, Gramado, Brasil*.
- Yu, W., Wilson, D. I., & Young, B. R. (2012). A comparison of nonlinear control performance assessment techniques for nonlinear processes. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 90(6), 1442–1449.
- Yuan, Q., Lennox, B., & McEwan, M. (2009). Analysis of multivariable control performance assessment techniques. *Journal of Process Control*, 19(5), 751 – 760.

Seznam publikací autora

- [1] ŠKARDA, R., ČECH, M., SCHLEGEL, M. Simultaneous Control Loop Performance Assessment and Process Identification Based on Fractional Models. In Proceedings of 9th IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes ADCHEM 2015. IFAC, 2015. s. 859-864. ISSN: 2405-8963
- [2] SCHLEGEL, M., ŠKARDA, R., ČECH, M. Bode-Like Control Loop Performance Index Evaluated for a Class of Fractional-Order Processes. In IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). Cape Town, South Africa: International Federation of Automatic Control, 2014. s. 10622-10627. ISBN: 978-3-902823-62-5, ISSN: 1474-6670
- [3] ŠKARDA, R., ČECH, M., SCHLEGEL, M. Minimally invasive control loop performance evaluation. In 2014 IEEE International Conference on Control Applications. Danvers, MA, USA: IEEE, 2014. s. 468-473. ISBN: 978-1-4799-7405-4
- [4] ŠKARDA, R. Systém pro monitorování včelstev s automatickou detekcí rojové nálady. In Sborník rozšířených abstraktů SVK FAV 2014. 2014. ISBN: 978-80-261-0365-3
- [5] SCHLEGEL, M., ŠKARDA, R., ČECH, M. Running discrete Fourier transform and its applications in control loop performance assessment. In Proceedings of the 2013 International Conference on Process Control, PC 2013. New York: IEEE, 2013. s. 113-118. ISBN: 978-1-4799-0927-8
- [6] GOUBEJ, M., SCHLEGEL, M., ŠKARDA, R. Mechatronic models for education - Robotic sea lion. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), 2011, roč. 18, č. 1, s. 1-6. ISSN: 1474-6670
- [7] ŠKARDA, R. Extremální řízení. ZČU, Plzeň : 2011, 71 s.
- [8] ŠKARDA, R., GOUBEJ, M. Self tuning algorithm for motion control applications using extremum seeking method. In 11th International Carpathian Control Conference. Eger, Hungary: REKATEL Bt., Miskolc, Hungary, 2010. s. 157-160. ISBN: 978-963-06-9289-2
- [9] GOUBEJ, M., ŠKARDA, R., SCHLEGEL, M. Input shaping filters for the control of electrical drive with flexible load. AT&P journal, 2009, č. 2, s. 116-121. ISSN: 1336-5010
- [10] GOUBEJ, M., ŠKARDA, R., SCHLEGEL, M. Input shaping filters for the control of electrical drive with flexible load. In Proceedings of the 17th International Conference on Process Control '09. Bratislava: Slovak University of Technology, 2009. s. 595-601. ISBN: 978-80-227-3081-5
- [11] GOUBEJ, M., ŠKARDA, R. Sliding mode controller for heating-cooling processes, testing results, MATEO Workshop, 2007