

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav automatizace a měřicí techniky

Ing. Markéta Vaňková

ADAPTIVNÍ REGULÁTORY S PRVKY UMĚLÉ INTELIGENCE

**ADAPTIVE CONTROLLERS WITH ELEMENTS OF ARTIFICIAL
INTELLIGENCE**

Teze dizertační práce

Obor: Kybernetika, automatizace a měření

Školitel: Prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.

Klíčová slova

adaptivní systém, samočinně se nastavující regulátor, průběžná identifikace, identifikační algoritmus, identifikace v uzavřené smyčce, nelineární identifikace, heterogenní řídicí algoritmus, grafické prostředí, Matlab

Key Words

adaptive system, self-tuning control, on-line identification, identification algorithm, closed-loop identification, nonlinear identification, heterogenous control algorithm, graphics environment, Matlab

Obsah

1 ÚVOD.....	5
2 CÍLE DIZERTACE	6
3 NOVÝ IDENTIFIKAČNÍ ALGORITMUS PRO IDENTIFIKACI V UZAVŘENÉ SMYČCE	7
4 ADAPTIVNÍ ALGORITMUS S NOVÝM PŘÍSTUPEM K IDENTIFIKAČNÍ ČÁSTI.....	10
5 PRAKTICKÉ POZNATKY Z OVĚŘOVÁNÍ NOVÉHO PŘÍSTUPU K IDENTIFIKACI V RÁMCI ADAPTIVNÍHO SYSTÉMU	12
5.1 Penalizační parametr h a regulační děj.....	15
5.2 Perioda vzorkování a regulační děj	16
5.3 Řízení při různých výkonových úrovních procesu a na proměnnou žádanou hodnotu	17
5.4 Adaptivní algoritmus a novým přístupem k identifikaci vs. klasické adaptivní algoritmy	18
6 GRAFICKÉ PROSTŘEDÍ PRO OVĚŘOVÁNÍ VLASTNOSTÍ ŘÍDICÍCH ALGORITMŮ	20
7 ZÁVĚR.....	22

1 ÚVOD

Řízení je obecně oblastí, která je velmi úzce svázána s praxí a reálným světem. Toto odvětví vzniklo z důvodu potřeby přizpůsobit chování reálných procesů požadovaným vlastnostem. Proto by si měl každý při vývoji nových metod, postupů a algoritmů v oblasti řízení uvědomit, že výsledkem jeho činnosti by měl být algoritmus užitečný a použitelný v praxi. Tuto základní úvahu, jak se zdá, ovšem spousta prací postrádá. Je bezpochyby krásné, když nový algoritmus pracuje bezchybně v simulačním prostředí bez přítomnosti jakýchkoli poruchových signálů a nelinearit, ovšem pokud selhává při řízení reálného procesu, je tento algoritmus, ať už jakkoli složitý a matematicky podložený, v praxi naprosto nepoužitelný. Totiž navrhnout funkční řídicí algoritmus za předpokladu, že vlastnosti řízeného procesu zůstávají po celou dobu provozu neměnné, a známe-li dostatečně přesný model řízeného procesu, nebývá žádný problém. Ovšem v reálné praxi bohužel tento předpoklad často splněn není.

Oblast řízení prošla od svého počátku obrovským vývojem, od klasických pevně nastavených regulátorů až po moderní řídicí algoritmy, jako jsou adaptivní, optimální, prediktivní, stavové, fuzzy nebo například neuronové regulátory.

Proto stojí za zamyšlení fakt, že převážnou většinu (uvádí se, že přinejmenším 95 %) průmyslových regulátorů stále tvoří klasické regulátory typu PI nebo PID (resp. PS nebo PSD) [3], a to i přesto, že řízení na základě pevně nastavených klasických regulátorů není v mnoha případech z hlediska kvality regulace optimální, protože je třeba při použití regulátorů vzít v úvahu, že vlastnosti obecně nelineárního a nestacionárního reálného procesu se mění změnou vnějších podmínek, opotřebením, stárnutím materiálu nebo změnou pracovního režimu procesu, a je tedy nutné regulátory nastavit tak, aby se řízený proces i při nejhorších podmínkách nedostal do nedefinovaných stavů.

Logickým důsledkem výše uvedeného je snaha překonat nedostatky pevně nastavených klasických regulátorů a prosadit v praxi i jiné typy řídicích algoritmů a metod. Mezi ně bezpochyby patří i adaptivní systémy, jejichž průmyslové a aplikační využití je oproti pozornosti, která jim byla věnována v teoretických kruzích, velmi mizivé. To je samozřejmě škoda, a proto také v posledních letech směřuje vývoj adaptivního řízení k jednoduchým, spolehlivým a robustním adaptivním regulátorům, což má pomoci překonat bariéru mezi teorií a praxí.

Existuje řada přístupů k adaptivnímu řízení, práce je zaměřena na oblast adaptivních samočinně se nastavujících regulátorů, která by mohla nabízet zajímavé možnosti při využití v praxi.

Stávající adaptivní řídicí systémy s klasickou identifikací totiž mají samy o sobě několik nedostatků, zapříčiněných především omezeními kladenými identifikačním algoritmem na použitý adaptivní systém, které samozřejmě omezují nebo přímo brání nasazení adaptivních systémů do praxe. Proto se snažíme tyto nedostatky překonat využitím různých metod. Díky rozvoji nových moderních technik stojí za úvahu zvážit možnost využití těchto technik v adaptivním řízení za cílem zlepšení

kvality řízení. Tuto variantu ovšem umožňuje využít v plném rozsahu až nyní nástup moderních programovatelných automatů.

Podstatná část práce je zaměřena speciálně na slabé místo adaptivního algoritmu, kterým je právě identifikační část. Paradoxně je tato část ale také klíčová pro následný návrh řídicího algoritmu adaptivního systému, a má tedy zásadní vliv na funkčnost a kvalitu řízení celého adaptivního algoritmu.

Jako výsledek dlouhodobého výzkumu a ověřování a také současně jako nejdůležitější bod práce je představen nový identifikační algoritmus pro identifikaci v uzavřené smyčce. Tento nový identifikační algoritmus v kombinaci s vhodným řídicím algoritmem představuje velmi mocný nástroj v oblasti adaptivních systémů, což dokazují veškeré provedené testy s tímto identifikačním algoritmem. Navíc je tento algoritmus jednoduchý, funkční, stabilní, výpočetně nenáročný a přitom robustní a tudíž má nejlepší předpoklady k použití při řízení reálných procesů v praxi.

Ověřování tohoto identifikačního algoritmu v rámci adaptivního systému proběhlo na řadě simulačních i reálných modelů.

Zvláštní důraz je v práci kladen především na chování a vlastnosti nového identifikačního algoritmu v rámci adaptivního systému při řízení reálných procesů, protože primárním účelem nového identifikačního algoritmu je nasazení a použití v praxi.

Nedílnou součástí ověřování nového identifikačního algoritmu v rámci adaptivního systému byla samozřejmě také jeho implementace do programovatelného automatu.

Práce představuje i nové grafické prostředí pro ověřování vlastností řídicích algoritmů. Toto prostředí nabízí nástroj pro zobrazování, vzájemné porovnávání a analýzu vlastností řídicích algoritmů a má tak usnadnit vývoj a testování nových řídicích algoritmů a zároveň zkrátit čas potřebný pro vývoj nového algoritmu. Navíc je vytvořeno ve velmi rozšířeném programovém prostředí MATLAB, takže dokáže využívat veškerou jeho funkčnost včetně spolupráce s MATLAB/Simulink. Klíčovou vlastností vyvinutého prostředí je práce v reálném čase, čímž se při přímé implementaci řídicího algoritmu do programovatelného automatu stává nenahraditelným a velmi užitečným pomocníkem.

2 CÍLE DIZERTACE

Primárním cílem práce je zlepšit kvalitu řízení adaptivními algoritmy a přispět k rozšíření adaptivních systémů do praxe.

S tím souvisí snaha minimalizovat problémy spojené s adaptivním řízením za pomoci moderních metod řízení. Dále si práce klade za cíl vylepšit kvalitu řízení adaptivních systémů s ohledem na rušivé vlivy přítomné při řízení reálného procesu, a to takovým způsobem, aby byl tento řídicí algoritmus implementovatelný a použitelný v prostředí průmyslového řízení.

Pozornost je zaměřena především na hodnotnou identifikaci procesu tvořící základ kvalitního adaptivního řízení. Při identifikaci procesu v adaptivním systému

máme k dispozici pouze vstupy a výstupy z procesu v okamžicích vzorkování spolu s několika apriorními informacemi o procesu. Identifikace založená na klasických metodách totiž vykazuje nezanedbatelné nedostatky.

Cíle dizertační práce můžeme tedy shrnout do následujících bodů:

1. Snahou je navrhnout nový identifikační algoritmus pro identifikaci v uzavřené smyčce, který bude schopný se spolu s řídicím algoritmem vyrovnat s kvantizačním jevem, poruchami, šumem a nelinearitami v systému, atd. Při jeho vývoji se nabízí možnost využít znalosti moderních metod řízení. Navržený identifikační algoritmus musí nějakým způsobem přispět k zlepšení regulačního děje oproti stávajícím adaptivním technikám, aby bylo zaznamenáno zlepšení kvality řízení.
2. Použít navržený identifikační algoritmus v adaptivním systému, aby bylo možné sledovat a porovnávat jeho vlastnosti při řízení procesů vzhledem ke klasickým identifikačním metodám v adaptivním řízení.
3. V adaptivním systému v kombinaci s novým identifikačním algoritmem použít kromě často používaného Takahashiho regulátoru (4.1) jako řídicího algoritmu v adaptivních systémech některé kvalitní řídicí algoritmy vhodné pro klasické pevně nastavené regulátory.
4. Provést ověření nového identifikačního algoritmu v kontextu adaptivního systému při působení poruchových signálů, nelinearit, šumu a při přítomnosti kvantizačního jevu přímo na simulačních i reálných procesech. Dále prozkoumat vliv periody vzorkování a schopnost algoritmu pracovat na různých výkonových hladinách.
5. Úspěšně implementovat nový identifikační algoritmus v rámci adaptivního systému do programovatelného automatu a využít ho při řízení reálných procesů.
6. Vyvinout nástroj pro jednoduchou verifikaci identifikačního algoritmu v rámci adaptivního systému, v němž by bylo možné výsledky vzájemně porovnávat a analyzovat. Nástroj musí být univerzální pro širokou škálu řídicích algoritmů a musí umožňovat práci v reálném čase, aby byl použitelný při přímé implementaci verifikovaného algoritmu do programovatelného automatu.

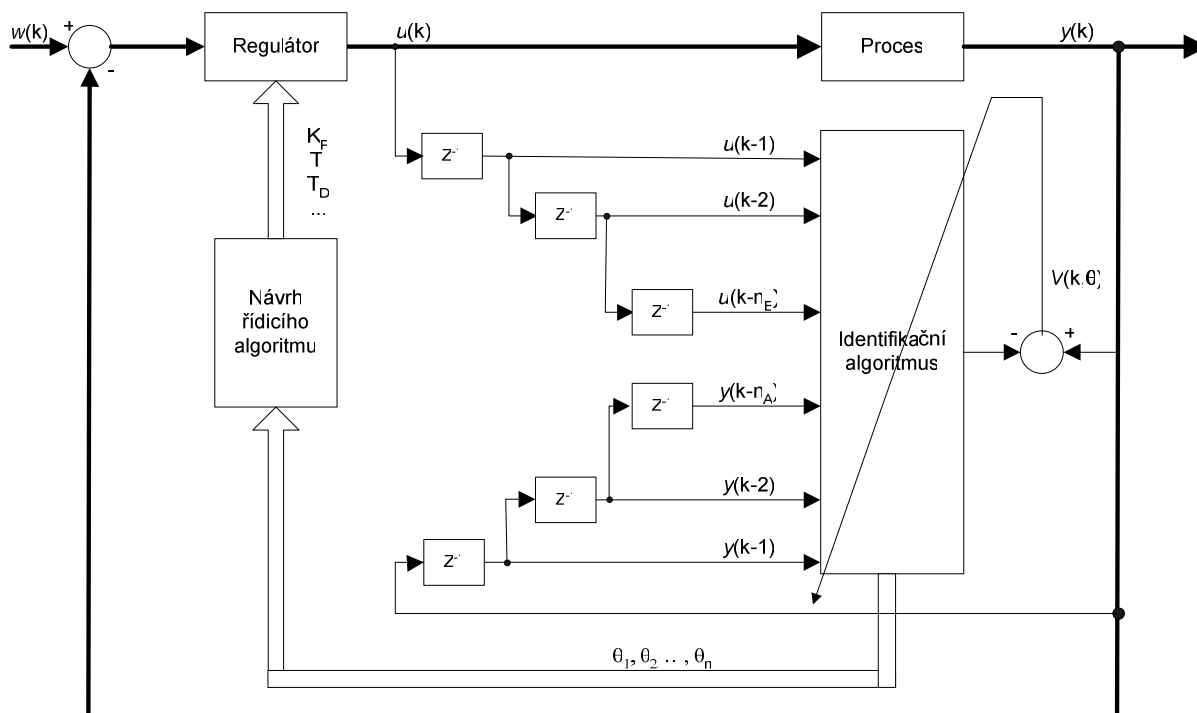
3 NOVÝ IDENTIFIKAČNÍ ALGORITMUS PRO IDENTIFIKACI V UZAVŘENÉ SMYČCE

Nový identifikační algoritmus je považován za stěžejní část celé práce.

Základní myšlenkou vývoje nového identifikačního algoritmu bylo využít znalosti moderní teorie řízení a navrhnout algoritmus, který bude funkční, stabilní, ale na druhou stranu výpočetně příliš nenáročný, rychlý, numericky spolehlivý a dostatečně rychlý tak, aby nekladl žádné speciální požadavky na programovatelný automat (řídicí systém), do kterého bude implementovaný. Tyto požadavky vycházejí především z požadavku adaptivních algoritmů na identifikaci neznámého procesu v reálném čase.

Moderní teorie řízení představuje zcela nový přístup a pohled na automatizaci. Především vzdálená podobnost neuronových sítí a adaptivních systémů vedla k myšlence využít některých vlastností neuronové sítě při vývoji nového identifikačního algoritmu.

Základní struktura nového identifikačního algoritmu v kontextu s celým adaptivním algoritmem je na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Blokové schéma adaptivního algoritmu s novým identifikačním algoritmem

Označme

$$\mathbf{V} = [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_j \quad \dots \quad v_n]^T \quad (3.1)$$

parametry nelineární části modelu,

$$\mathbf{W} = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_i \quad \dots \quad w_n]^T \quad (3.2)$$

parametry lineární části modelu a analogicky

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dots \quad \theta_j \quad \dots \quad \theta_n]^T = [\hat{b}_1 \quad \hat{b}_2 \quad \dots \quad \hat{b}_{n_B} \quad \hat{a}_1 \quad \hat{a}_2 \quad \dots \quad \hat{a}_{n_A}]^T \quad (3.3)$$

parametry linearizovaného modelu procesu (3.4) (model typu ARX), kde $n = n_A + n_B$, n_B je řád polynomu v čitateli linearizovaného přenosu modelu, n_A je řád polynomu ve jmenovateli linearizovaného přenosu modelu (3.4).

$$F_p(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_B} z^{-n_B}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_A} z^{-n_A}} \quad (3.4)$$

Strukturu modelu procesu používaného v novém identifikačním algoritmu pak lze popsat takto:

$$\hat{y}(k) = \frac{h}{1 + e^{-\lambda \mathbf{V}^T(k) \boldsymbol{\varphi}(k)}} \mathbf{W}^T(k) \boldsymbol{\varphi}(k) = \boldsymbol{\theta}^T(k) \boldsymbol{\varphi}(k) \quad (3.5)$$

Všimněme si, že struktura modelu lze rozdělit na nelineární a lineární část (3.6):

$$\hat{y}(k) = y_{nin}(k) y_{lin}(k) \quad (3.6)$$

Nelineární část modelu je tvořena sigmoidní funkcí se strmostí λ , která nabývá hodnot z intervalu $(0, h)$. Vliv a význam penalizačního parametru h bude diskutován dále. Lineární část modelu tvoří klasický ARX model.

Vstupem do identifikační části adaptivního algoritmu je regresní vektor

$$\boldsymbol{\varphi}(k) = [u(k-1) \quad u(k-2) \quad \dots \quad u(k-n_B) \quad -y(k-1) \quad \dots \quad -y(k-n_A)]^T, \quad (3.7)$$

výstupem je vektor parametrů linearizovaného modelu (3.3).

Na první pohled je patrná jistá podobnost ke zmiňované neuronové síti. Z této podobnosti vyjdeme a jako identifikační metodu pro tento model použijeme algoritmus vycházející z nejznámější metody pro učení neuronové sítě, což je vlastně metoda hledání minima nelineární funkce, kterou je backpropagation s výrazem momentum:

$$\boldsymbol{\theta}(k+1) = \boldsymbol{\theta}(k) - \eta(k) \cdot \frac{\partial V(k, \boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} + \alpha [\boldsymbol{\theta}(k) - \boldsymbol{\theta}(k-1)], \quad (3.8)$$

kde k je krok učení, $\eta(k)$ pak parametr učení, α je momentum. Hodnota parametru učení a momenta je volena z intervalu $(0;1)$. Momentum určuje vliv směru změny minulé aktualizace parametrů na aktuální aktualizaci parametrů. Zavedení výrazu momentum tlumí oscilace, čímž urychluje konvergenci parametrů.

Tento algoritmus byl vybrán hlavně z toho důvodu, že se jedná o rychlý, výpočetně nenáročný on-line identifikační algoritmus. Rychlost, nenáročnost a on-line verze jsou hlavní důvody, proč byla tomuto algoritmu dána přednost před jinými metodami.

Hodnoty koeficientů λ , η , α a výchozí hodnoty parametrů $\mathbf{W}(0)$ a $\mathbf{V}(0)$ jsou zvoleny univerzálně a není je třeba u každého procesu měnit, což je velmi příjemná vlastnost. Tato vlastnost je využita při ověřování algoritmu na všech použitých procesech. Tím dochází k výrazné redukci volitelných parametrů, jejichž nastavení je často časově velmi náročné a výpočet parametrů nově představeného modelu se tím stává velmi jednoduchým. Připomeňme, že u klasických metod identifikace je nutné výchozí nastavení upravovat.

Další velmi přínosnou vlastností nového identifikačního algoritmu je přítomnost penalizačního koeficientu h , význam tohoto koeficientu se plně promítne až v kontextu adaptivních systémů, protože tento parametr umožňuje přizpůsobit

vlastnosti systému dle aktuálních požadavků na regulační děj. Podrobnější rozbor tohoto parametru spolu s konkrétními ukázkami je uveden v kap. 5.1.

4 ADAPTIVNÍ ALGORITMUS S NOVÝM PŘÍSTUPEM K IDENTIFIKAČNÍ ČÁSTI

Vlastnosti adaptivního řídicího algoritmu jsou z převážné většiny závislé na schopnosti adaptivního systému identifikovat řízený proces. Při sebelépe navrženém řídicím algoritmu vycházejícím z parametrů nedostatečného modelu, který neodpovídá reálnému procesu v aspektech důležitých pro řízení, nemůžeme nikdy dosáhnout kvalitní regulace.

Stávající adaptivní algoritmy jsou převážně založené na klasických metodách identifikace. Tyto metody s sebou ale přináší řadu problémů a omezení, které brání použití adaptivních systémů v praxi.

Obecné požadavky na adaptivní řídicí algoritmus pro řízení reálných procesů můžeme shrnout do následujících bodů:

1. Schopnost identifikační části pracovat při krátké periodě vzorkování i při výskytu poruchových signálů a šumu působících na proces
2. Schopnost identifikační části vypořádat se s kvantizačním jevem v systému způsobeným přítomností A/D a D/A převodníků. Tento šum je deterministický a je možno ho predikovat. Například chyba má větší vliv, pokud amplituda vstupu do převodníku je menší [6].
3. Robustnost adaptivního algoritmu, schopnost se adaptovat na změnu dynamiky systému a zároveň se vypořádat i s typickými poruchovými signály působícími na reálný proces, schopnost identifikační části produkovat výsledky za různých pracovních podmínek procesu
4. Nekmitavost akčního zásahu řídicí části při řízení reálných procesů z důvodu ochrany akčních členů.
5. Numerická spolehlivost, rychlost, přítom jednoduchost a implementovatelnost do programovatelného automatu.

Ověření schopností a chování nového identifikačního algoritmu pro identifikaci v uzavřené smyčce provedeme v rámci adaptivního systému, tím můžeme zároveň komplexně prověřit i vlastnosti celého adaptivního algoritmu s novým přístupem k identifikaci a jeho předpoklady pro řízení reálných procesů.

Vytvořme tedy adaptivní systém, jehož identifikační část tvoří nový identifikační algoritmus představený v kap. 3, tak abychom předvedli jeho vlastnosti a schopnosti při řízení především reálných procesů i v kontextu se stávajícími adaptivními algoritmy založenými na klasické identifikaci.

V současnosti existuje pro klasické pevně nastavené regulátory řada kvalitních řídicích algoritmů, proto je na místě úvaha využít takto ověřené řídicí algoritmy v adaptivním řízení.

Z algoritmů pro pevně nastavené klasické regulátory uveďme ty, které jsou použity v této práci:

1. Takahashiho regulátor - typický S-PD regulátor:

$$K_P = 0,6K_{\text{krit}} - \frac{K_I}{2}, K_I = \frac{1,2K_{\text{krit}}T_S}{T_{\text{krit}}}, K_D = \frac{3K_{\text{krit}}T_{\text{krit}}}{40T_S} \quad (4.1)$$

$$u(k) = K_P [y(k-1) - y(k)] + K_I [w(k) - y(k)] + K_D [2y(k-1) - y(k-2) - y(k)] + u(k-1)$$

kde K_{krit} , T_{krit} je kritické zesílení a kritická perioda kmitů, $u(k)$ akční zásah řídicího členu, $w(k)$ žádaná hodnota a $y(k)$ výstup z řízeného procesu v kroku k , T_S je perioda vzorkování.

2. PSD regulátor s filtrací derivační složky a omezením překmitu výstupní veličiny při změně žádané hodnoty, pracující na principu S-PD regulátoru, prezentovaný např. v [4]:

$$U(z) = K_P \left[\beta W(z) - Y(z) + \frac{T_S z^{-1}}{T_I (1 - z^{-1})} [W(z) - Y(z)] - N \frac{1 - z^{-1}}{1 - e^{-\frac{T_S N}{T_D}} z^{-1}} Y(z) \right] \quad (4.2)$$

Pro $\beta = 0$ získáme S-PD regulátor s filtrací derivační složky, pro $\beta = 1$ diskretní PS-D regulátor. Zesilovací činitel N nabývá hodnot od 3 do 20 v závislosti velikosti rušivých signálů v systému.

3. nejnovější varianta PSD regulátoru s vylepšením filtrace derivační složky označená PSD s IAI („Impulse Area Invariant“) a publikovaná v [5]:

$$U(z) = K_P \left[\beta W(z) - Y(z) + \frac{T_S z^{-1}}{T_I (1 - z^{-1})} [W(z) - Y(z)] - \frac{T_D}{T_S} \left(1 - e^{-\frac{T_S N}{T_D}} \right) \frac{1 - z^{-1}}{1 - e^{-\frac{T_S N}{T_D}} z^{-1}} Y(z) \right] \quad (4.3)$$

Pro $\beta = 0$ opět získáme S-PD regulátor, pro $\beta = 1$ diskretní PS-D regulátor. Zesilovací činitel N nabývá hodnot od 3 do 20 v závislosti velikosti rušivých signálů v systému.

Využití těchto algoritmů pro klasické pevně nastavené regulátory v adaptivním algoritmu umožňuje on-line výpočet kritických parametrů systému pomocí modifikované metody zjištění kritických parametrů systému uvedené v [2]. Pro výpočet parametrů K_P , T_I , T_D použijeme známé vztahy odvozené pány Zieglerem a Nicholsem (4.4), resp. upravené vztahy pro kmitané děje (4.5).

$$K_P = 0,6K_{\text{krit}}, T_I = 0,5T_{\text{krit}}, T_D = 0,125T_{\text{krit}} \quad (4.4)$$

$$K_P = 0,3K_{\text{krit}}, T_I = T_{\text{krit}}, T_D = 0,125T_{\text{krit}} \quad (4.5)$$

Jako řídicí část adaptivního algoritmu tedy použijeme výše uvedené řídicí algoritmy.

Za představitele typických stávajících adaptivních systémů považujeme adaptivní systém, jehož identifikační část je tvořena rekurzivní metodou nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním, řídicí část tvoří Takahashiho regulátor.

Abychom v adaptivním systému využili i kvalitní řídicí algoritmy pro klasické pevně nastavené regulátory, vytvoříme adaptivní systému s novou identifikací, v němž jako řídicí algoritmus použijeme S-PD s IAI (4.3). V dalším textu budeme tedy pod pojmem adaptivní algoritmus s novým přístupem k identifikaci chápat tuto kombinaci.

Při porovnávání vlastností adaptivních algoritmů se vyskytnou i jiné varianty adaptivních systémů (např. klasická identifikace + S-PD regulátor s IAI nebo nový identifikační přístup + Takahashiho regulátor). Všechny tyto varianty mají zdůraznit chování nového identifikačního algoritmu a zároveň vyloučit, že by kvalitní regulační děj byl zásluhou pouze jiného řídicího algoritmu v řídicí části adaptivního systému. Pokud budou tyto varianty použity, budou srozumitelně označeny a okomentovány.

5 PRAKTICKÉ POZNATKY Z OVĚŘOVÁNÍ NOVÉHO PŘÍSTUPU K IDENTIFIKACI V RÁMCI ADAPTIVNÍHO SYSTÉMU

Velmi důležitá část práce vychází ze zkušeností s chováním obecně nového algoritmu při jeho ověřování v praxi. Pro praktické použití je tato část vývoje nového algoritmu nepostradatelná.

V této části jsou zkoumány a prověřovány vlastnosti nového identifikačního algoritmu v rámci adaptivního systému, tedy i samotného adaptivního systému, a je sledováno jeho chování při řízení různých typů simulačních a reálných modelů. Sada testovacích modelů byla vybrána tak, aby obsáhla co nejširší oblast možných typů procesů, se kterými je možné potkat se v praxi.

V rámci ověřování vlastností nového identifikačního algoritmu bude sledováno i plnění požadavků kladených na adaptivní řídicí algoritmus z kap. 4 , tedy zkoumání vlivu periody vzorkování, schopnosti identifikačního algoritmu poskytovat výsledky při různých výkonových úrovních procesu apod.

Součástí zkoumání chování nového identifikačního algoritmu bude i srovnání kvality řízení stávajících adaptivních systémů a adaptivního systému s novým přístupem k identifikaci.

Před fází sledování vlastností nového identifikačního algoritmu na reálných modelech došlo k úspěšné implementaci nového algoritmu do programovatelného automatu. Vlastní řízení poté probíhalo přes programovatelný automat.

Vlastní práce analyzuje nový identifikační algoritmus na celkem deseti modelech (čtyři typy simulačních modelů a šest typů reálných modelů), simulační modely jsou

vybrány ze sady systémů pro testování regulátorů [1], parametry jsou voleny tak, aby dané procesy byly složitější pro regulační proces. Reálné modely vycházejí ze SISO subsystémů modelu teplovzdušné pece, modelu trubice a třech soustav generovaných laboratorním přípravkem. Zde se kvůli rozsahu práce omezíme pouze na demonstraci vlastností na jednom simulačním a dvou reálných modelech.

S1. Simulační model - systém s násobnými póly

$$F_{S1}(s) = \frac{1}{(s+1)^{n_1}}, \quad n_1 = 4 \quad (5.1)$$

R1. Reálný model teplovzdušné pece – subsystém větrák – vrtulka

Fyzikální model pece je navrhnut pro praktickou ukázkou regulace teploty v peci. Laboratorní model teplovzdušné soustavy je vícerozměrný dynamický systém. Jeho schéma je na **Obr. 5.1**. Pro potřeby ověřování nového identifikačního algoritmu v rámci adaptivního systému byl vybrán SISO subsystém teplovzdušné soustavy větrák – vrtulka.

Pomocí otáček větráku řídíme proud vzduchu proudící tunelem. Ten roztáčí vrtulku snímače průtoku, jejíž otáčky jsou snímány čidlem. Otáčky jsou úměrné průtoku vzduchu. Jako poruchovou veličinu můžeme uvažovat pouze proudění způsobené větráčkem, tento příspěvek je ale relativně malý. Zapnutí žárovky má pak vliv téměř nepatrný. Systém větrák – vrtulka má dynamiku druhého řádu.

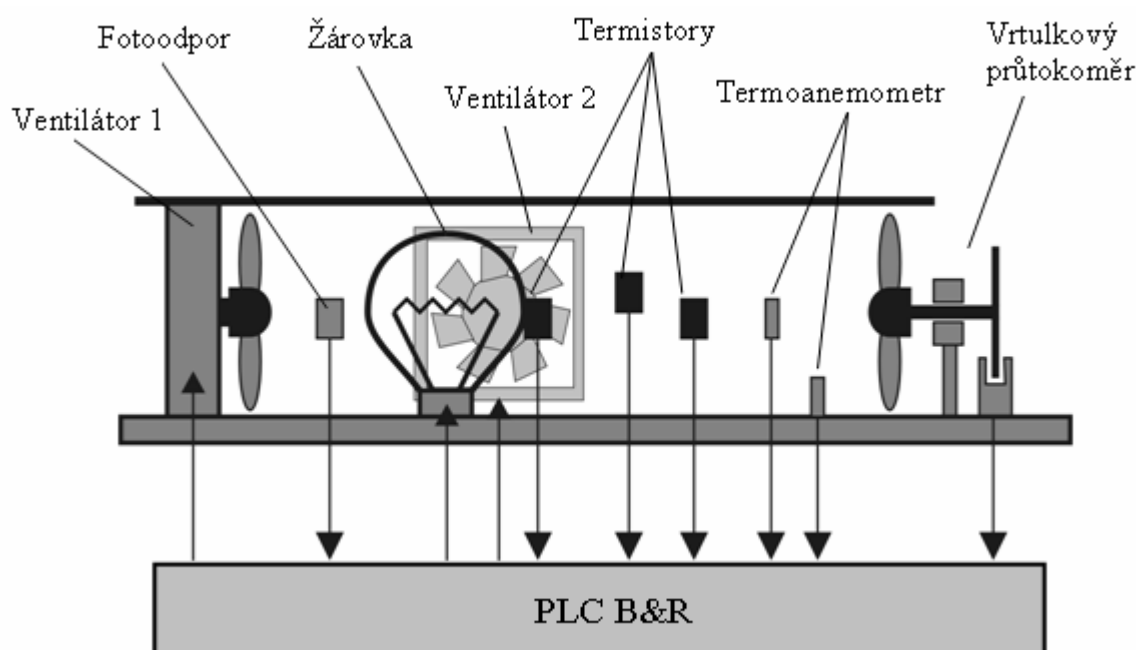
R2. Reálný model - laboratorní přípravek

Laboratorní přípravek modeluje řadu reálných procesů, záleží na jeho aktuálním nastavení. Nastavení se provádí pomocí tří přepínačů umožňujících volit přibližné chování přípravku volbou časových konstant, zesílení, resp. astatismu. Tento laboratorní přípravek je velmi vhodné použít pro ověření řídicích algoritmů, protože zastupuje reálné procesy spolu s přítomností neměřitelných šumů, poruch a nelinearit a jeho chování je v mnoha směrech nepředvídatelné.

V dalším textu budou prezentovány výsledky ověřování nového identifikačního algoritmu na soustavě:

$$F_{R2}(s) = \frac{1}{(0,5s+1)(2s+1)(3s+1)} \quad (5.2)$$

Je třeba podotknout, že se jedná opravdu o velmi hrubé a nastavení následujících parametrů.



Obr. 5.1: Schéma teplovzdušné soustavy

Při použití simulačních modelů se neomezujeme jen na sledování chování adaptivního algoritmu s novým přístupem k identifikaci při řízení daných simulačních soustav. V této fázi také zjišťujeme chování tohoto algoritmu při působení skokové poruchy působící na vstup do procesu nebo na výstupu z procesu, zkoumán je i vliv kvantizačního jevu a náhodného šumu s nenulovou střední hodnotou, které sice vytvoříme uměle, ovšem s určitým reálným podkladem, a určitou představu o chování algoritmu získáme.

U reálných modelů působí poruchy na systém již nativně a jsou v podstatě jejich neoddelitelnou částí. Abychom ale vyzkoušeli vlastnosti adaptivního systému, a tedy i vlastnosti nového identifikačního algoritmu za „extrémních podmínek“, jsou tyto soustavy rušeny navíc poruchami a šumy vygenerovanými uměle. Jedná se opět o skokové poruchy působící na vstup do procesu, na výstupu z procesu a vliv náhodného šumu s nenulovou střední hodnotou.

Pokud není uvedeno jinak, adaptivní algoritmy pracují dle následujícího implicitního nastavení.

Výstup z akčního členu regulátoru je omezen na $\langle -10;10 \rangle$ V, rozlišení A/D převodníku je 12 bitů. Adaptivní algoritmus pracuje s periodou vzorkování 0,1 s.

Na vstup řízeného procesu je přiváděn Gaussovský šum v_1 se střední hodnotou 1 V a rozptylem 0,005 V, na výstup zase skoková porucha v_2 o velikosti 0,5 V.

Identifikační a tedy i adaptivní algoritmus je nakonfigurován včetně počátečního nastavení tak, že ho lze použít pro všechny testované procesy bez změny výchozího nastavení.

V novém identifikačním algoritmu je linearizovaný ARX model identifikovaného procesu volen třetího řádu, což se při jeho ověřování v rámci adaptivního algoritmu

ukázalo jako naprosto dostačující pro všechny použité modely, které z velké části reprezentují průmyslové systémy, proto není důvod používat v praxi vyšší řád modelu.

V následujícím textu bude zástupce stávajících adaptivních technik (jako identifikační část použita metoda nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním, jako řídicí část Takahashiho regulátor) zjednodušeně označován jako SAA, analogicky bude adaptivní systém s novým identifikačním algoritmem (nový identifikační algoritmus jako identifikační část a S-PD regulátor s IAI jako řídicí část) označen jako NAAX (kde x je hodnota penalizačního parametru).

Ještě uveďme, že při posuzování kvality řízení a vlastností identifikačního algoritmu v rámci adaptivního systému se budeme vycházet z rychlého přechodového děje s maximálně jedním překmitem, ideálně bez překmitu a nekmitavým akčním zásahem.

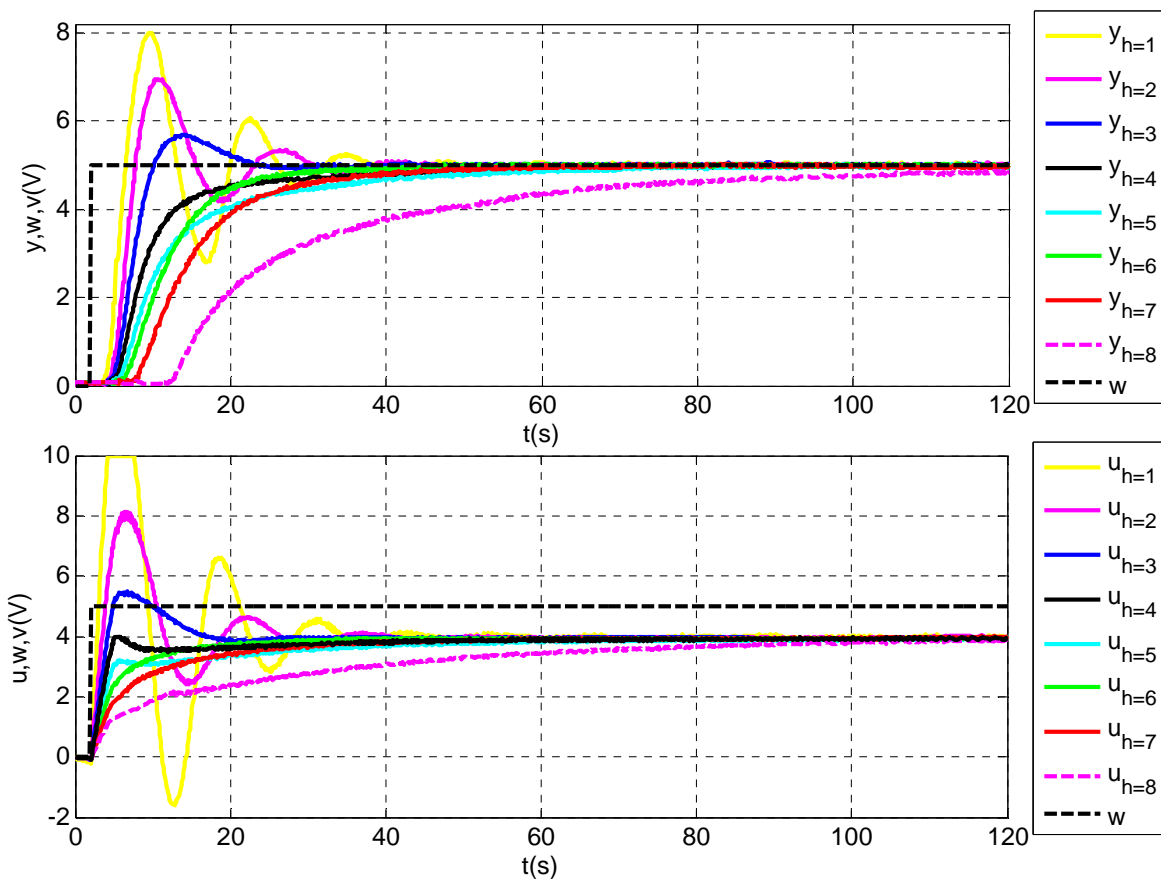
5.1 PENALIZAČNÍ PARAMETR h A REGULAČNÍ DĚJ

Vliv penalizačního parametru h na regulační děj je zde demonstrován na reálné soustavě druhého řádu (R1 - Obr. 5.2).

Volba penalizačního parametru h při řízení procesů nabízí možnost v podstatě nastavit průběh regulačního děje podle individuálních požadavků – od rychlého přechodového děje s několika překmity po striktní děj bez překmitu. Volba tohoto parametru se také promítá do průběhů akčních zásahů i schopnosti vypořádat se s poruchovými signály a šumem, proto ho lze s úspěchem využít i při individuálních požadavcích na tvar a vlastnosti těchto přechodových průběhů.

Z uvedených průběhů je možné učinit několik závěrů.

Penalizační parametr h působí na daný proces jako filtrační článek – se zvětšující se hodnotou parametru se zvyšuje vliv tlumení přechodových průběhů daného procesu, zpomaluje se odezva systému na skokové změny působící na proces (žádaná hodnota, poruchy), částečně dochází ke zpomalení přechodového děje. Nízké hodnoty penalizačního parametru h mohou v extrémních případech (např. při řízení velmi kmitavých soustav nebo soustav s astatismem) vést až k nestabilitě systému. Příliš vysoká hodnota parametru h na druhou stranu může způsobit, že daný systém se stane přetlumeným, což je spojeno s pomalou reakcí řídicího algoritmu na změnu žádané hodnoty a podstatným zhoršením regulačního děje (patrné u vyšších hodnot penalizačního parametru u níže uvedených soustav). Opět tedy platí, že správná volba penalizačního parametru může zásadním způsobem ovlivnit vlastnosti regulačního děje.



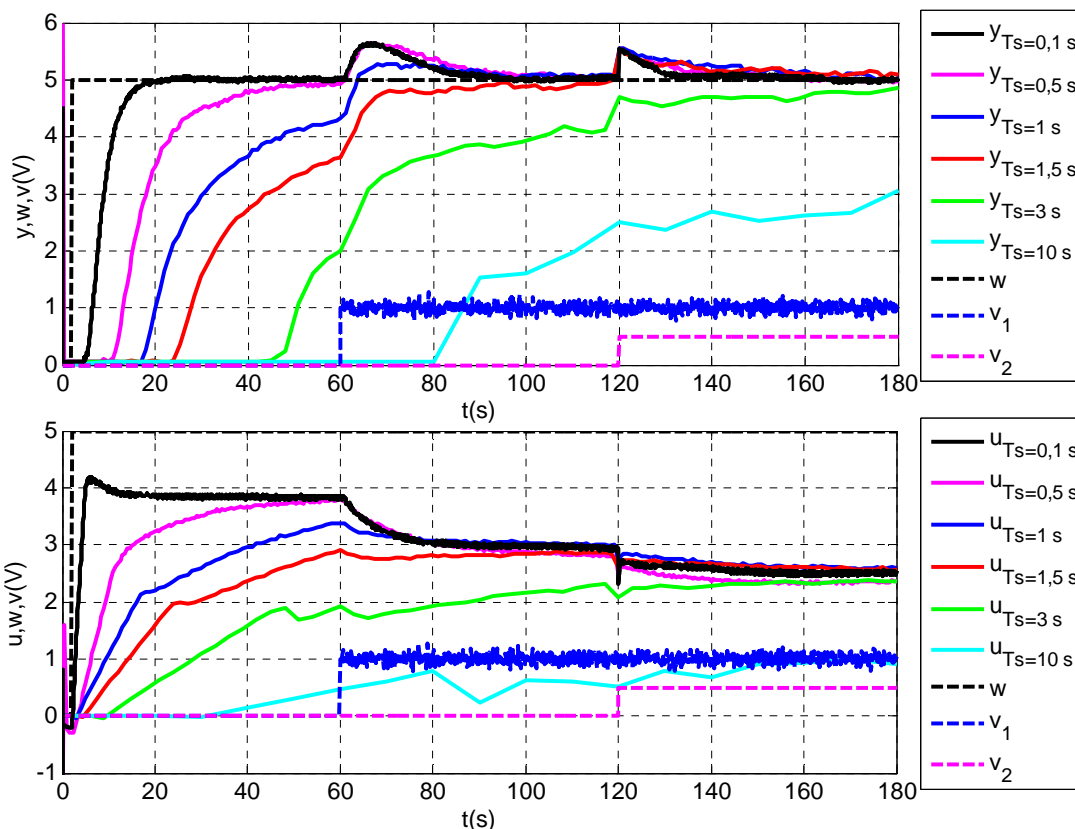
Obr. 5.2: Soustava R1 - Vliv volby penalizačního parametru h na regulační děj

5.2 PERIODA VZORKOVÁNÍ A REGULAČNÍ DĚJ

Jedním z požadavků jmenovaných v kap. 4 na kvalitní adaptivní systém pro řízení reálných procesů, je právě bezproblémová funkčnost identifikačního algoritmu při krátkých periodách vzorkování za působení poruchových signálů a šumu na proces.

Nový identifikační algoritmus pro identifikaci v uzavřené smyčce nám v tomto ohledu přináší do oblasti adaptivních systémů nové možnosti, protože umožňuje bez problémů splnit tento požadavek. Nutnost volby delší periody vzorkování při použití nového identifikačního algoritmu odpadá, jak to ostatně dokazují i následující testy na modelech. Problém volby periody vzorkování se v plném rozsahu projeví až při řízení reálných procesů.

Přínos nového identifikačního algoritmu v tomto ohledu je patrný při řízení reálné soustavy R1 (**Obr. 5.3**). Chování adaptivního systému s novou identifikací jen potvrzuje výše uvedený závěr, že u adaptivních algoritmů založených na klasických identifikačních metodách je nutné při volbě periody vzorkování zvolit kompromis mezi identifikační a řídicí částí, naproti tomu u adaptivních systémů s novým přístupem k identifikaci obecně platí, čím menší perioda vzorkování, tím kvalitnější je regulační děj.

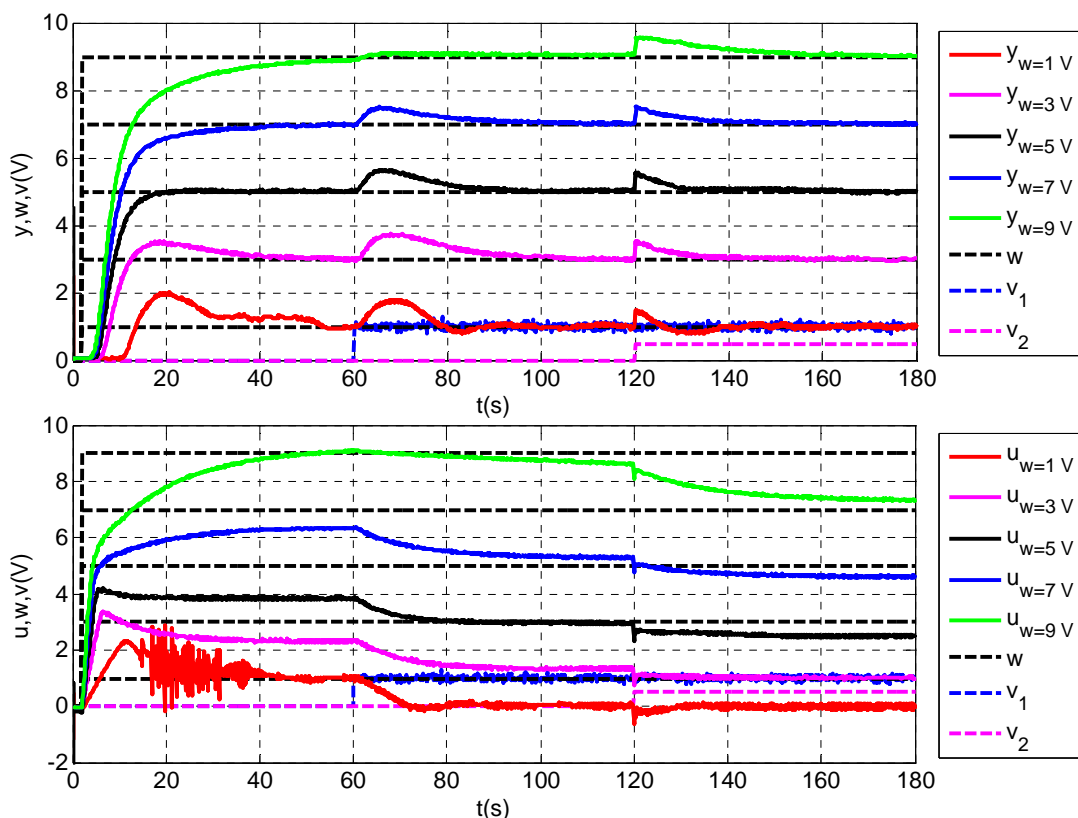


Obr. 5.3: Soustava R1 - Vliv periody vzorkování adaptivní algoritmu NAA4 na regulační děj

5.3 ŘÍZENÍ PŘI RŮZNÝCH VÝKONOVÝCH ÚROVNÍCH PROCESU A NA PROMĚNNOU ŽÁDANOU HODNOTU

Nepostradatelnou vlastností adaptivního systému je schopnost pracovat na různých výkonových úrovních procesu. Identifikační část adaptivního systému musí být schopná produkovat výsledky za různých pracovních podmínek procesu, a to i v období relativního stacionárního stavu, při poruchách nebo přechodech mezi různými stavy. Schopnost algoritmu pracovat na různých výkonových úrovních je názorně prezentována při řízení reálné soustavy druhého řádu R1 (**Obr. 5.4**). Jasně vidíme, že na různých výkonových úrovních se daný reálný systém chová jako systém různých procesů. Odlišné reakce adaptivního algoritmu s novým přístupem k identifikaci si lze všimnout především na přechodových charakteristikách systému (výstupní veličiny i akčního zásahu) od přechodového děje s jedním překmitem po přechodový děj bez překmitu a v různé rychlosti přechodového děje. Kvalita řízení je ale ve všech případech vysoká a vždy je splněn námi kladený požadavek na regulační děj bez překmitu, maximálně s jedním překmitem a nekmitavý akční zásah.

U systému R1 při řízení na výkonové úrovni o žádané hodnotě 1 V se jedná o řízení na hranici citlivosti systému, přesto můžeme říci, že i tak je regulační děj poměrně kvalitní. Opravdu se tedy tato schopnost nového identifikačního algoritmu pro identifikaci v uzavřené smyčce při řízení reálných procesů vyplatí.



Obr. 5.4: Soustava R1 – Reg. děj na výkonových úrovních pro adaptivní algoritmus NAA4

5.4 ADAPTIVNÍ ALGORITMUS A NOVÝM PŘÍSTUPEM K IDENTIFIKACI VS. KLASICKÉ ADAPTIVNÍ ALGORITMY

Velmi důležitou částí ověřování nového identifikačního algoritmu je srovnání kvality regulačního děje adaptivního systému s novým přístupem k identifikaci s jinými typy adaptivních algoritmů při řízení různých typů procesů. Obecně by měl nový identifikační algoritmus určitým způsobem přispět ke zlepšení kvality řízení v rámci adaptivního systému oproti stávajícím adaptivním technikám, jinak téměř ztrácí význam jeho eventuální budoucí nasazení do praxe.

Z důvodu omezeného rozsahu práce zde bude demonstrována schopnost adaptivních algoritmů řídit dva reálné modely – R1 a R2.

Různých kombinací adaptivních systémů i přes výběr uvedený v kap. 4 je poměrně hodně, to už ale neplatí o jejich schopnosti řídit dané procesy.

Adaptivní algoritmus s novou identifikací je ve všech grafech označen NAA x , kde x je hodnota penalizačního parametru h , a je vykreslen plnou černou čarou.

Ještě připomeňme, že cílem regulace je přechodný děj bez překmitů v kombinaci s rychlým přechodným dějem a nekmitavým akčním zásahem.

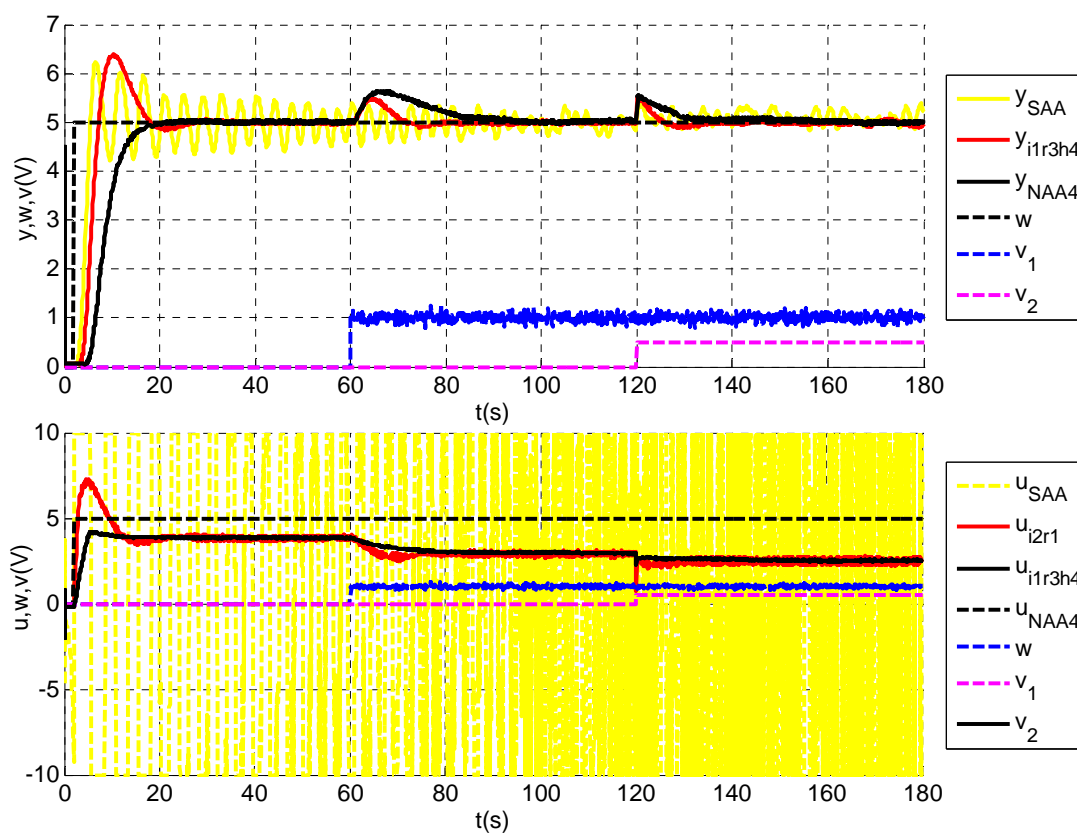
Robustnost a mimořádné schopnosti nového identifikačního algoritmu se projevují už při použití simulačních modelů, stejně tak bohužel i slabá místa adaptivních systémů s klasickou identifikací. Nový identifikační algoritmus má tak

velmi dobré předpoklady pro použití při řízení reálných procesů, naopak pro klasickou identifikaci vyhlídky pro řízení reálných procesů nejsou vůbec růžové.

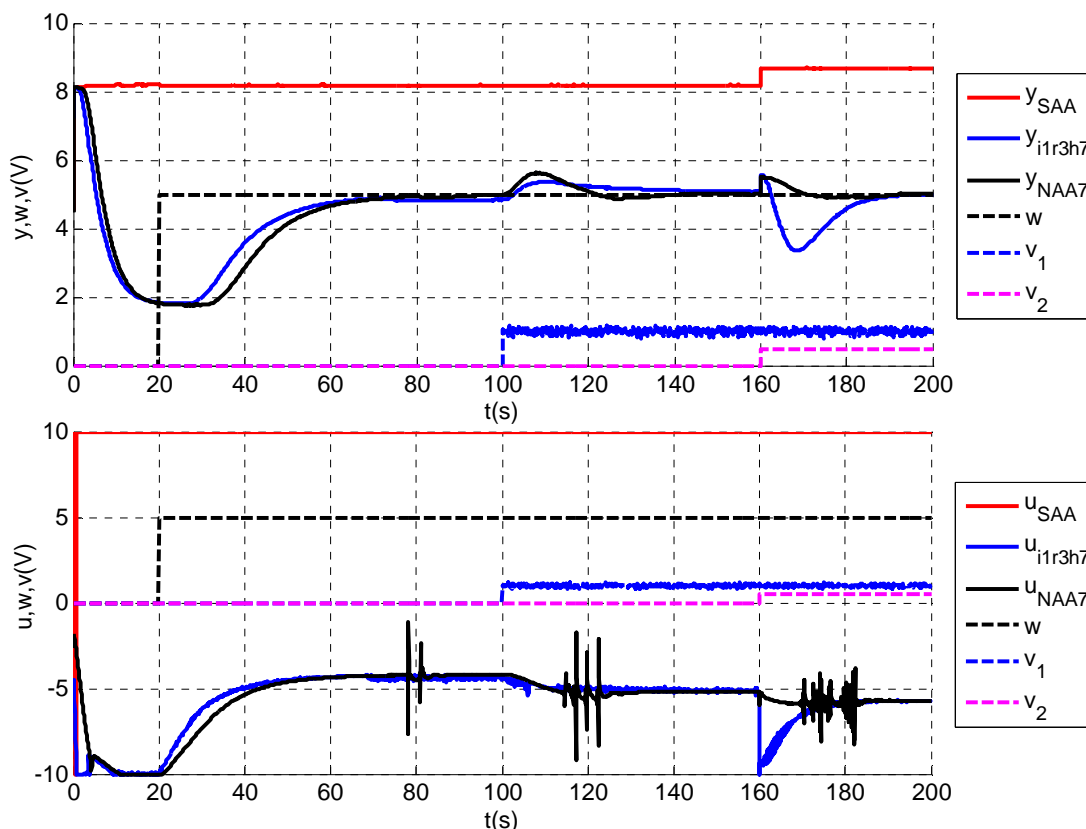
Při řízení reálných modelů (R1 - **Obr. 5.5** a R2 - **Obr. 5.6**) se již výrazně začínají projevovat nedostatky klasické identifikace, stávající adaptivní systém je pro řízení těchto soustav naprosto nepoužitelný už jen z důvodu nepřijatelného kmitání akčního zásahu. Naproti tomu nový identifikační algoritmus nemá s daným reálným procesem absolutně žádný problém, v kombinaci s řídicím algoritmem S-PD s IAI je jeho kvalita řízení na velmi vysoké úrovni a striktně splňuje všechny požadavky na kladené na regulační děj. Pokud se spokojíme s o něco nižší kvalitou řízení, je pro řízení vhodná i varianta nového řídicího algoritmu s Takahashiho regulátorem.

Bohužel ani v jednom případě nebyly stávající adaptivní systémy schopny řídit žádný z reálných modelů uspokojujícím způsobem. Adaptivní algoritmy s klasickou identifikací jasně vykazují výrazně horší vlastnosti, a to nejen při řízení reálných modelů, což je pro rozšíření do praxe velmi závažný nedostatek.

Naproti tomu nový identifikační algoritmus byl schopen ve všech případech neznámý proces identifikovat a poskytnout dostatek informací řídicím algoritmům v adaptivním systému, který následně velmi kvalitně řídil všechny předložené simulační a reálné modely.



Obr. 5.5: Soustava R1 – Srovnání regulačních dějů různých adaptivních algoritmů



Obř. 5.6: Soustava R3.3 – Srovnání regulačních dějů různých adaptivních algoritmů

6 GRAFICKÉ PROSTŘEDÍ PRO OVĚŘOVÁNÍ VLASTNOSTÍ ŘÍDICÍCH ALGORITMŮ

K ověřování a verifikaci vlastností obecně řídicích algoritmů a eventuálně i k výběru vhodného algoritmu je nezbytné použít některý z programů, umožňujících znázornění jednotlivých průběhů a závislostí, nejčastěji formou grafů. Většinou lze všechny požadované průběhy získat, často však velmi složitou cestou. Navíc hlavním nedostatkem při vývoji adaptivních systémů je způsob interpretace výsledků identifikace. To se stalo hlavními podněty k vytvoření vlastního grafického prostředí pro ověřování vlastností heterogenních řídicích algoritmů.

Grafické prostředí je vyvinuto v dnes nejrozšířenějším výpočetním a simulačním nástroji MATLAB. Výhodou tohoto prostředí je, že využívá široké možnosti MATLABu, jeho nástavby MATLAB/Simulink i ostatních toolboxů. Dokáže pracovat se MATLAB/Simulink, získávat z něj data a pomocí svých rozsáhlých funkcí a toolboxů je zpracovávat, zobrazovat a ukládat.

Jednou z hlavních předností grafického prostředí, související s prací v reálném čase, je jeho schopnost *on-line* vyhodnocovat vlastnosti heterogenních řídicích a identifikačních algoritmů a vzájemně výsledky porovnávat. Data z MATLAB/Simulink jsou průběžně získávána, zpracovávána a zobrazována. Jako nástroje v nově vyvinutém prostředí byly mimo jiné implementovány možnosti třídímníonálního zobrazení hodnot prvků matic, průběhy změn nul pólů

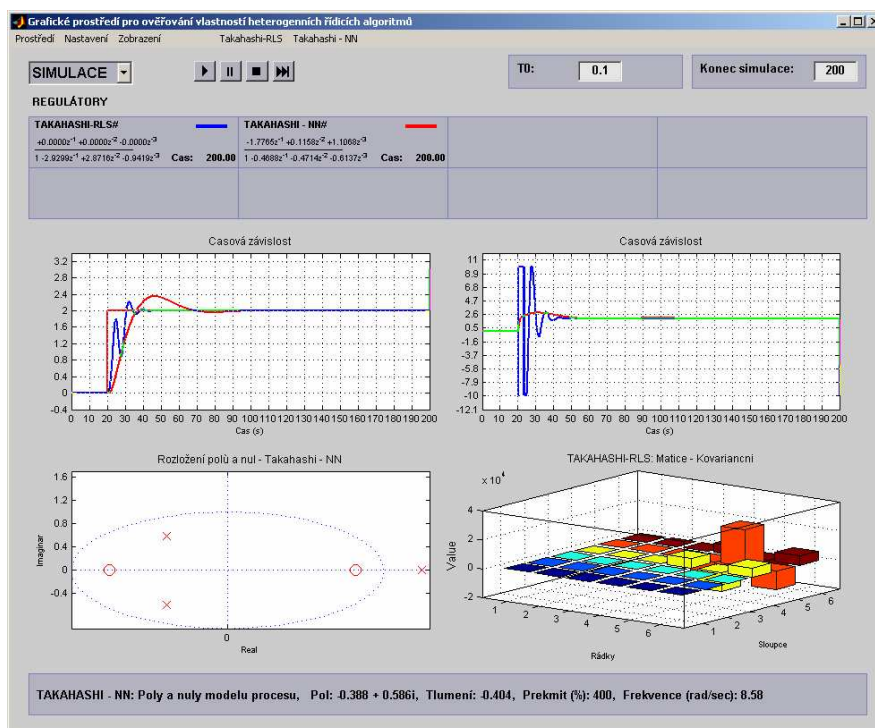
v identifikovaných procesech, časový vývoj parametrů souvisejících s ověřováním řídicích algoritmů.

Grafický modul pracuje v reálném čase a ve spojení s programovatelným automatem může představovat silný nástroj pro přímou implementaci a ověřování řídicích algoritmů pracujících v reálném čase. Navíc umožňuje výsledky získané při řízení procesů ukládat do svých interních struktur a následně přehrávat s možností krokování a umožnit tak podrobnou analýzu vlastností nových algoritmů při řízení procesů (reálných i simulačních).

Všechna data získaná při ověřování řídicích algoritmů lze vzájemně porovnávat a navíc lze získaná data exportovat do programu Excel pro archivaci nebo následné zpracování.

Stejně tak lze jednoduše ukládat uživatelská nastavení prostředí a stejným způsobem lze tato nastavení načítat zpět do uživatelského prostředí, což podstatně zrychluje a usnadňuje práci s grafickým prostředím.

Velmi důležitou vlastností prostředí je i fakt, že toto prostředí neklade žádné zvláštní požadavky na strukturu modelu v MATLAB/Simulink ani na typ heterogenního řídicího algoritmu, lze tedy toto prostředí použít naprosto univerzálně. V grafickém prostředí lze tedy verifikovat algoritmy od klasických pevně nastavených regulátorů, přes adaptivní a prediktivní řídicí algoritmy, až po algoritmy využívající neuronové sítě a mnoho dalších.

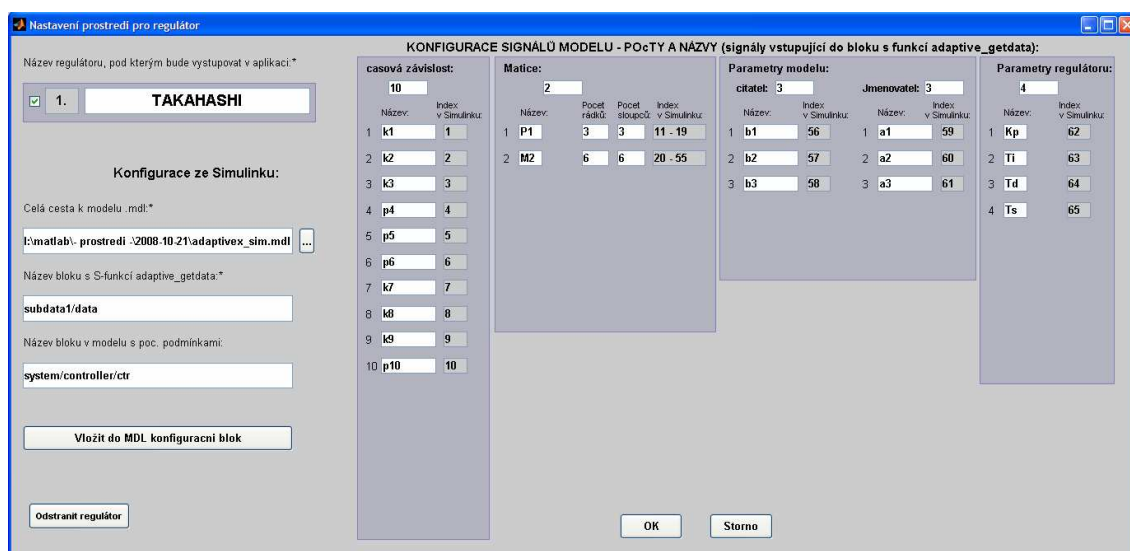


Obr. 6.1: Hlavní okno grafického prostředí

Nejdůležitější část grafického prostředí tvoří hlavní okno aplikace (**Obr. 6.1**), které umožňuje základní nastavení programu, volbu pracovního módu, ovládání řídicích algoritmů, nastavení periody vzorkování nebo délky kroku pro krokování

řídícího algoritmu. Hlavní okno obsahuje i stručné informace o modelu procesu (vhodné pro řídicí algoritmy založené na identifikaci procesu). Jeho nejdůležitější částí jsou však grafy (volitelně až 6) vhodné pro zobrazení časových průběhů signálů, rozložení pólů a nul v modelu procesu nebo pro zobrazení 3D matic (např. kovarianční matice). Všechny grafy je možné ukládat, modifikovat a tisknout, exportovat apod. Při kliknutí na libovolný průběh v libovolném grafu se zobrazí informace o daném bodu na křivce.

Z mnoha dalších pomocných oken pro nastavování prostředí a zobrazování podrobnějších informací o řídicím algoritmu uveďme okno pro konfiguraci řídicích algoritmů, pomocí něž lze i automaticky nakonfigurovat příslušný model (**Obr. 6.2**).



Obr. 6.2: Okno grafického prostředí nastavení řídicích algoritmů

7 ZÁVĚR

Hlavním podnětem pro práci byla snaha zlepšit kvalitu řízení stávajících adaptivních algoritmů. Zvýšení kvality řízení adaptivních systémů má pak následně přispět k rozšíření nasazení adaptivních systémů do praxe a překonání bariér, které jsou způsobeny stávajícími adaptivními systémy.

V současné době totiž bohužel stávající adaptivní techniky založené na klasických metodách identifikace obsahují omezení, jejichž nedodržení znehodnocuje činnost adaptivního systému, a v podstatě rozšíření do praxe brání. Identifikační část adaptivního algoritmu představuje v současné době u stávajících adaptivních technik slabé místo, paradoxně právě na schopnosti identifikovat neznámý proces závisí schopnost celého adaptivního algoritmu kvalitně tento proces řídit.

V kap. 4 byly stanoveny obecné požadavky na adaptivní systém, které jsou předpokladem pro kvalitní řízení reálných procesů v praxi. Mezi nimi jsou ovšem požadavky, které nelze s pomocí klasických metod identifikace splnit.

Řešením tohoto problému byl vývoj nového identifikačního algoritmu, který všechny tyto požadavky splňuje, jak se můžeme sami přesvědčit z výsledků ověřování tohoto algoritmu na simulačních a reálných soustavách (kap. 5).

Nový identifikační algoritmus je funkční, stabilní a robustní, ale na druhou stranu je výpočetně nenáročný, rychlý, numericky spolehlivý a dostatečně rychlý, je schopen práce v reálném čase a neklade žádné speciální požadavky na programovatelný automat, do kterého byl i v rámci ověřování algoritmu úspěšně implementován. Proto vykazuje nejlepší předpoklady pro nasazení do praxe, čemuž je v práci věnována velká pozornost.

K nezanedbatelným přednostem nového identifikačního algoritmu patří fakt, že po celou dobu testování a ověřování algoritmu bylo vždy použito stále stejné výchozí nastavení, které se projevilo jako velmi univerzální.

Nespornou výhodou je přítomnost laditelného parametru, na jehož základě lze uživatelsky měnit tvar přechodového děje podle konkrétních požadavků uživatele. Pomocí jediného parametru lze tedy přizpůsobit regulační děj daného procesu podle aktuálních požadavků.

Nově vyvinutý identifikační algoritmus pro identifikaci v uzavřené smyčce byl použit v adaptivním systému, testován na řadě simulačních a reálných procesů a bylo mimo jiné sledováno, jak jsou plněny uvedené požadavky na adaptivní systém pro řízení reálných procesů. Nyní si výsledky této analýzy přehledně shrneme:

1. Schopnosti práce identifikačního algoritmu při krátké periodě vzorkování při výskytu poruchových signálů a šumu působících na proces se věnuje kap. 5.2, z níž jednoznačně vyplývá, že u nového identifikačního algoritmu platí, čím kratší perioda vzorkování, tím kvalitnější regulační děj celého adaptivního systému (na rozdíl od adaptivních systémů s klasickou identifikací). Krátká perioda vzorkování v kombinaci s přítomností šumu a poruchových signálů v žádném případě nesnižuje schopnost identifikace neznámého procesu novým identifikačním algoritmem, spíše naopak.
2. Kvantizační jev je přítomen při řízení všech použitých simulačních i reálných modelů. V případě simulačních modelů je použita 12-ti bitová kvantizace signálů, u reálných modelů jsou použity I/O moduly s 12-ti, resp. 14-ti bitovými A/D a D/A převodníky. Adaptivní systém s novou identifikací byl schopen ve všech případech řídit předložené modely, a to při vysoké kvalitě regulačního děje, nikde nebyla pozorována kmitavost akčního zásahu nebo výstupní veličiny z důvodu přítomnosti kvantizačního jevu.
3. Robustnost nového identifikačního, a tedy i celého adaptivního algoritmu, je demonstrována při řízení všech předložených modelů. V případech, kdy stávající adaptivní algoritmy s průběžnou identifikací nebyly schopny vůbec daný proces identifikovat, natož řídit, adaptivní systém s novým identifikačním algoritmem vykazoval vysokou kvalitu regulačního děje. Navíc schopností identifikačního algoritmu produkovat výsledky za různých pracovních podmínek procesu se zabývá kap. 5.3, kde je prezentována i bezchybná činnost identifikačního

algoritmu při řízení na proměnnou po částech konstantní a po částech lineární žádanou hodnotu, navíc za přítomnosti uměle vytvořených poruch a šumu působících na systém.

4. Nekmitavost akční veličiny byla jednou z požadavků na kvalitní regulační děj. Ani v jednom případě se nestalo, že by adaptivní systém s novou identifikací vykazoval abnormální kmitavost akčního zásahu, která by mohla vést ke zvýšenému opotřebování akčního členu.
5. Numerická spolehlivost, rychlost a jednoduchost byla prověřena úspěšnou implementací algoritmu do programovatelného automatu a jeho schopností řídit reálné modely.

Adaptivní systém s novým identifikačním algoritmem tedy splňuje všechny požadavky kladené na adaptivní systém pro řízení reálných soustav. A právě i důsledkem tohoto poznatku je fakt, že je tento algoritmus schopen velmi kvalitně řídit reálné modely, jak jsme se ostatně mohli přesvědčit v kap. 5.4.

Při zhodnocování celé práce nesmíme zapomenout na plnění vlastních cílů dizertační práce uvedených v kap. 2 :

1. Hlavním z cílů práce bylo navrhnout nový identifikační algoritmus pro identifikaci v uzavřené smyčce, který bude schopný vyrovnat se s kvantizačním jevem, poruchami, šumem a nelinearitami v systému. Navíc musí nově navržený identifikační algoritmus musí nějakým způsobem přispět k zlepšení regulačního děje oproti stávajícím adaptivním technikám, aby bylo zaznamenáno zlepšení kvality řízení. Nový identifikační algoritmus, který splňuje všechny tyto požadavky, se podařilo vyvinout (kap. 3). Jeho robustnost a příspěvek ke zvýšení kvality řízení je neoddiskutovatelná vzhledem k výsledkům z ověřování adaptivního systému s novou identifikací vůči stávajícím adaptivním systémům s klasickou identifikací (kap. 5.4). Navíc adaptivní systém s novým identifikačním algoritmem splňuje všechny požadavky kladené na adaptivní systém pro řízení reálných procesů.
2. Nový identifikační algoritmus byl použit v rámci adaptivního systému (kap. 4) a tento adaptivní systém s novým přístupem k identifikaci byl využit pro ověření vlastností nového identifikačního algoritmu při řízení sady simulačních a reálných modelů. Při porovnání se stávajícími adaptivními systémy s klasickou identifikací vykazoval adaptivní systém s novou identifikací výrazně vyšší kvalitu řízení, byl bez problémů schopen řídit všechny předložené modely, což se v žádném případě nedá říci o stávajících adaptivních technikách (kap. 5.4).
3. Jako kombinace k novému adaptivnímu algoritmu byl v adaptivním systému použit jednak klasický Takahashiho řídicí algoritmus (4.1), zároveň byl použit i výkonný řídicí algoritmus S-PD s IAI (4.3) vhodný pro klasické pevně nastavené regulátory. Jako nejvhodnější kombinace řídicího algoritmu k novému identifikačnímu algoritmu se jeví řídicí algoritmus S-PD s IAI s nastavením parametrů dle (4.5).
4. Ověření adaptivního systému s novým identifikačním algoritmem proběhlo na simulačních a reálných modelech za „extrémních“ podmínek. Do modelů byly

uměle přiváděny skokové poruchy na vstup, na výstup procesu a šum s nenulovou střední hodnotou. Se všemi těmito znesnadňujícími prvky si adaptivní systém s novou identifikací poradil velmi dobře (kap. 5.4). Zkoumání vlivu periody vzorkování a řízení na různých výkonových úrovních bylo zhodnoceno již při analýze požadavků na adaptivní systém pro řízení reálných procesů výše s kladným výsledkem.

5. Nový identifikační algoritmus v rámci adaptivního systému byl úspěšně implementován do programovatelného automatu a využit při řízení reálných procesů.
6. Pro snadnou verifikaci identifikačního algoritmu v rámci adaptivního systému byl vyvinut univerzální nástroj v prostředí MATLAB, který umožňuje výsledky získané při testování řídicích algoritmů vzájemně porovnávat, analyzovat a zobrazovat. Nástroj umožňuje práci v reálném čase, čímž v kombinaci s přímou implementací řídicího algoritmu do programovatelného automatu představuje nepostradatelný nástroj (kap. 6).

Na základě výše uvedené vyčerpávající analýzy nového identifikačního algoritmu, můžeme konstatovat, že se podařilo nejen výrazným způsobem zlepšit kvalitu řízení adaptivními systémy oproti stávajícím adaptivním technikám s klasickou identifikací, ale také odstranit nedostatky klasické identifikace. Zároveň myšlenka použít v adaptivním řízení řídicí algoritmy klasických pevně nastavených regulátorů se velmi vyplatila právě v kombinaci s novým identifikačním algoritmem.

Identifikační algoritmus splňuje všechny požadavky na funkční a robustní algoritmus pro použití při řízení v reálných systémech. V kombinaci s vhodným řídicím algoritmem představuje opravdu velmi mocný nástroj pro řízení reálných procesů.

Seznam použité literatury (výťah)

- [1] ÅSTRÖM, Karl Johan, HÄGGLUND, Tore. Benchmark Systems for PID Control. In *Proceedings of IFAC Workshop on Digital Control – Past, Present and Future of PID Control*. Terrassa, Španělsko : [s.n.], 2000. s. 3.
- [2] BOBÁL, Vladimír, BOHM, Josef, PROKOP, Roman. *Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů: algoritmy a implementace*. 1. vyd. Brno : VUTIUM, 1999. 242 s. ISBN 80-214-1299-2.
- [3] KLÁN, Petr. Kongres IFAC v Praze a některé současné problémy automatizace. *Automa : Časopisy a knihy navazující na tradici české odborné literatury [online]*. 2005, 3 [cit. 2005-07-16], s. 50-55. Dostupný z WWW: <odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30405 >.
- [4] PIVOŇKA, Petr. *Číslicová řídicí technika*. Brno : FEKT VUT v Brně, 2003. 151 s. Dostupný z WWW: <https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/uamt/Cislicova_ridici_tehnika_S.pdf>.
- [5] SCHMIDT, Michal. Derivative Action in Discrete PID Controllers. In *Sborník prací konference a soutěže Student EEICT 2007*. Brno : FEKT VUT v Brně, 2007. s. 101-105. Dostupný z WWW: <http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2007/sbornik/03-doktorske_projekty/03-kybernetika_a_automatizace/12-xschmi00.pdf>.
- [6] ŠVANCARA, Kamil. *Adaptive Optimal Controller with Identification Based on Neural Network*. Brno : FEKT VUT v Brně, 2004. 105 s. Vedoucí dizertační práce Prof. Petr Pivoňka.
- [7] ÅSTRÖM, Karl Johan. Adaptive Feedback Control. *Proceedings of the IEEE*. 1987, vol. 75, is. 2, s. 185-217.
- [8] ÅSTRÖM, Karl Johan, ÅRZÉN, Karl-Erik, WITTENMARK, Björn. *Computer Control : An Overview*. [s.l.] : [s.n.], 2002. 93 s. IFAC Professional Brief.
- [9] ÅSTRÖM, Karl Johan, WITTENMARK, Björn. *Adaptive control*. [s.l.] : Addison-Wesley Publ. Co, 1995. 592 s. ISBN 0-13-314899-8.
- [10] FORSSELL, Urban, LJUNG, Lennart. Closed-loop Identification Revisited. *CiteSeer* [online]. 1998 [cit. 2009-05-31]. Dostupný z WWW: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.30.2207&rep=rep1&type=pdf> >.

- [11] GEVERS, Michel. *Forever Ljung in System Identification*. T. Glad and G. Hendeby. Lund, Švédsko : [s.n.], 2006. ISBN 91-44-02051-1. System Identification without Lennart Ljung: what would have been different?, s. 61-85.
- [12] GEVERS, Michel. Towards a Joint Design of Identification and Control? *Essays on Control : Perspectives in the Theory and its Applications*. 1993, s. 111-151.
- [13] HAKL, František, HOLEŇA, Martin. *Úvod do teorie neuronových sítí*. [s.l.] : [s.n.], 1998. 210 s. ISBN 80-01-01716-8.
- [14] HANUŠ, Bořivoj, MODRLÁK, Osvald, OLEHLA, Miroslav. *Číslicová regulace technologických procesů : Algoritmy, matematicko-fyzikální analýza, identifikace, adaptace*. Brno : VUTIUM, 2000. 316 s. ISBN 80-214-1460-X.
- [15] IOANNOU, Petros, SUN, Jing. *Robust Adaptive Control*. [s.l.] : Prentice Hall, Inc, 1996. 834 s. Dostupný z WWW: <http://www-rcf.usc.edu/~ioannou/RobustAdaptiveBook95pdf/Robust_Adaptive_Control.pdf>.
- [16] JOHANSSON, Rolf. *System Modeling and Identification*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall, 1993. 512 s. ISBN 0-13-482308-7.
- [17] LJUNG, Lennart. *Learning, Control and Hybrid Systems*. Vol. 241/1999. Heidelberg : Springer Berlin, 1999. ISBN 978-1-85233-0. Identification for Control — What Is There to Learn? , s. 207-225.
- [18] LJUNG, Lennart. *System Identification : Theory for the User*. Thomas Kailath. 2nd edition. Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall PTR, 1999. 609 s. Information and system science series. ISBN 0-13-656695-2.
- [19] SJÖBERG, J., HJALMARSSON, H., LJUNG, L. Neural Network in System Identification. *CiteSeer* [online]. 1994 [cit. 2009-05-31]. Dostupný z WWW: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=4729E8763318AFAD8FD9645504412A5B?doi=10.1.1.30.3798&rep=rep1&type=pdf>>.
- [20] VAN DEN HOF, Paul, SCHRAMA, Ruud. Identification and Control - Closed-loop Issues. *Automatica : Journal of IFAC*. 1995, vol. 31, is. 12, s. 1751-1770.
- [21] WITTENMARK, Björn. Adaptive Dual Control Methods : An Overview. In 5th IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing. Budapest (Hungary) : [s.n.], 1995. s. 67-72.

Životopis autora

Jméno: Markéta Vaňková
Datum narození: 14. 4. 1981
Bydliště: Oslavička 34, 675 05 Rudíkov
Email: mvankova@ic-energo.eu

Vzdělání:
2004 - současnost Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky (dálkové postgraduální studium)
1999 – 2004 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky (magisterské studium)

Zaměstnání:
2004 - současnost I & C Energo a.s., Třebíč
Pozice: samostatný programátor analytik
Náplň práce: řízení projektů, tvorba SW PLC, tvorba vizualizací, programování (C, C++), verifikace a validace dat, tvorba modelů, tvorba algoritmů

Výpis publikací:

VAŇKOVÁ, Markéta. Process Identification In Self-Tuning Controllers. *Transaction of the VŠB-Technical university of Ostrava : Mechanical series*. 2006, vol. 52, is. 2, s. 203-208. ISSN 1210-0471.

VAŇKOVÁ, Markéta. Neural Network Based Model Parameter Estimation in Self-Tuning Controllers. In *Proceedings of 7th International Carpathian Control Conference*. Ostrava : VŠB - Technická universita Ostrava, 2006. s. 593-596. ISBN 80-248-1066-2.

VAŇKOVÁ, Markéta. Adaptive Controllers with Process Identification Based on Modern Control Methods. In *Proceedings the 7th International Scientific-Technical Conference PROCESS CONTROL 2006*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2006. s. 54-59. ISBN 80-7194-860-8.

VAŇKOVÁ, Markéta. Graphics Environment Developed for Verifying Heterogeneous Control Algorithms. In *Proceedings the 7th International Scientific-Technical Conference PROCESS CONTROL 2006*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2006. s. 231-235. ISBN 80-7194-860-8.

VAŇKOVÁ, Markéta. Identification in Adaptive Control, Neural Network for Linear Model Parameter Estimation. In Proceedings of the 12th Conference STUDENT EEICT 2006. Brno: VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií a Fakulta informačních technologií, 2006. s. 17-21. ISBN 80-214-3162-8.

VAŇKOVÁ, Markéta. Possibility of Using Neural Network Based Identification in Adaptive Controllers. In Proceedings of the 11th Conference STUDENT EEICT 2005. Brno: VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií a Fakulta informačních technologií, 2005. s. 66-70. ISBN 80-214-2889-9.

VAŇKOVÁ, Markéta. Adaptivní regulátory v prostředí Matlab-B&R. In Proceedings of the 10th Conference STUDENT EEICT 2004: Volume 1. Brno: VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií a Fakulta informačních technologií, 2004. s. 70-72. ISBN 80-214-2634-9.

Abstract

The aim of the thesis is to improve the control quality of the adaptive systems (Self-Tuning Controllers). The thesis mainly deals with problematical identification part of the adaptive system. This part demonstrates a weak point for existing adaptive systems. Paradoxically, the quality of the adaptive system depends mainly on the identification part because on the basis of the process model obtained by identification are worked out parameters of a control part, afterwards the control action plan is established.

Knowledge of the modern control methods is used and a new identification algorithm for closed-loop identification is proposed. This simple, fast and efficient algorithm overcomes all disadvantages of current classical identification methods based on least mean-square algorithms. The possibility of the choice of a short sample time, one tuning parameter ability to adjust the control process, the ability to identify processes in real use belong to its main goals. This algorithm was built in the adaptive system and then it was tested on a set of simulation and real models with surprisingly excellent results. The successful implementation of the algorithm into the programmable logic controller was also realized.

One part of the thesis introduces a new universal graphics environment for testing and verifying control algorithms.

Abstrakt

Cílem dizertace je zlepšit kvalitu řízení adaptivních systémů s průběžnou identifikací. Práce se zaměřuje především na problematickou identifikační část, která představuje slabé místo celého adaptivního systému. Paradoxně ale závisí kvalita adaptivního systému právě na identifikační části, protože na základě modelu procesu získaného identifikací jsou vypočteny parametry řídicí části a následně akční zásah do systému.

S využitím znalostí moderních metod řízení byl proto vyvinut nový identifikační algoritmus pro identifikaci v uzavřené smyčce. Tento jednoduchý, rychlý a výkonný algoritmus překonává všechna omezení stávajících klasických identifikačních metod založených na metodě nejmenších čtverců. Mezi jeho přednosti mimo jiné patří schopnost práce při krátké periodě vzorkování, přítomnost jediného parametru schopného přizpůsobit regulační děj konkrétním požadavkům nebo schopnost algoritmu identifikovat proces v reálné praxi. Algoritmus byl použit v adaptivním systému, a poté testován na sadě simulačních a reálných modelů s překvapujícími výsledky. V rámci ověřování byl nový algoritmus úspěšně implementován do programovatelného automatu.

V rámci práce je také představeno nové univerzální grafické prostředí pro testování a verifikaci řídicích algoritmů.