

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní

Czech Technical University in Prague
Mechanical Engineering Faculty

Doc. Ing. Bohumil ŠULC, CSc.

Hodnocení úlohy modelování v moderním průmyslovém řízení

Assessment of the Role of Modelling in Modern Industrial Control

Summary

Development of modern control theory and application of its results would never be possible without utilization of models. Modelling has made possible to design and test function of many devices, guarantee their safety, effectiveness and reliability when performing control not requiring human actions. On the other hand, various offers and strong background of the used mathematical tools have caused that many of theoretical procedure are not exploited in industrial practice at all, or in a few isolated cases. This situation is not good, of course and it should be changed. In scientific investigations, it is necessary to strengthen awareness that the object of performed research is control of a real device (existing or developed) and not control of its abstract model. Universities can indirectly have an important persuasive role in influencing practice if in their courses and tutorials they are able to transform difficult theoretical background of newly developed methods into a form which will be for participants of this educative process so internally persuasive that the methods will be push forward by themselves. Computer simulation represents one of the most effective persuasive tools supposing that the models used in simulation provide us with as authentic behaviour as the professionals knowing the real process regard as acceptable. In such engineering conceived simulators, special means offered by simulation programs are used of. MATLAB/Simulink proved good in this job.

All these aspects important for control quality improvement are mentioned in the next text. Modelling applied in simulation has to strengthen mutual linkage of three basic components: theory – practice – simulation influencing progress in control. In a short overview, utilization of linear models in control quality assessment is shown. Standard procedures based on the linear models of control circuits are confronted with occurrence of the wind-up phenomenon both in control and simulation. Importance of modelling for engineering and operator simulators is hinted inclusive a demonstration of pedagogical approach applied in design of a tank cascade simulation providing conditions for control algorithms testing close to the real conditions. In conclusion, the next working goals are mentioned, especially development of a PID controllers equipped with auto-tuning designed as an alternative attractive for practice because no model of the controlled object is required. Under a standard equipment of this controller belongs detection of deterioration in quality of control sensor function.

Souhrn

Rozvoj moderní teorie řízení a aplikace jejich výsledků do průmyslové praxe by nikdy byl možný bez využití modelů. Modelování umožnilo navrhnout a otestovat funkci řady zařízení, zajistit jejich bezpečnost, efektivnost a spolehlivost při řízení bez stálých lidských zásahů. Na druhé straně různé možnosti a silné zázemí použitých matematických nástrojů vedlo k vzniku mnoha teoretických postupů, které nejsou v průmyslové praxi využívány vůbec, nebo ojediněle. Tento stav není pochopitelně dobrý a je třeba ho změnit. Ve vědeckém bádání je třeba posílit vnímání, že předmětem výzkumu je řízení nějakého reálného zařízení (projektovaného nebo existujícího), nikoliv pouze řízení jeho abstraktního modelu. Významnou přesvědčovací úlohu v působení na praxi, aby akceptovala nové metody, mohou nepřímo sehrát vysoké školy, jestliže při výchově studentů nebo při organizaci odborných akcí vhodnými postupy dokáží přetřansformovat obtížně srozumitelné teoretické zázemí nově vyvinutých metod do podoby, s níž se účastníci tohoto popularizačního procesu natolik vnitřně ztotožní, že je budou dále v praxi prosazovat. Jedním z nejúčinnějších přesvědčovacích nástrojů je počítačová simulace za předpokladu, že modely, které se při ní využívají, vykazují v dané úrovni aproximace natolik věrohodné chování, že výsledky akceptují odborníci se znalostí reálného provozu. U takto inženýrsky pojatých modelů se využívají speciální prostředky nabízené simulačními programy. V tomto směru se osvědčil program MATLAB/Simulink.

Na všechny tyto aspekty důležité pro zlepšení kvality regulace upozorňuje následující text. Modelování uplatňované v simulaci musí posílit vzájemné vazby mezi třemi základními komponentami: teorií – praxí – simulací. V stručné přehledové charakteristice jsou ukázáno využití lineárních modelů při hodnocení kvality regulace. Standardní postupy založené na lineárních modelech regulačních obvodů jsou konfrontovány s výskytem jevu wind-up jak v reálné regulaci, tak při její simulaci. Je naznačen význam modelování pro inženýrské nebo operátorské simulátory včetně ukázky pedagogického přístupu při návrhu simulace kaskády nádrží jako modelu pro testování regulačních algoritmů v podmínkách velmi blízkých reálným. V závěr jsou pak zmíněny nejbližší pracovní cíle, zejména vývoj PID regulátorů vybavených samoseřizováním, které je navrhováno jako atraktivní alternativa pro praxi, protože nevyžaduje model regulované soustavy. K vybavení regulátoru by měla patřit i detekce zhoršené funkce způsobená změnou parametrů senzoru regulované veličiny.

Klíčová slova: modelování, model regulačního obvodu, optimalizace, hodnocení kvality regulace, wind-up

Keywords: modelling, control circuit model, optimization, control quality assessment, wind-up

České vysoké učení technické v Praze

Název: Hodnocení úlohy modelování v moderním průmyslovém řízení

Autor: doc. Ing. Bohumil Šulc, CSc.

Počet stran : 36

Náklad: 170 výtisků

© Bohumil Šulc 2008

ISBN

OBSAH

Obsah	5
1. Obecný význam modelování.....	7
2. Motivy pro výběr tématu.....	9
3. Role modelování při návrhu standardních regulačních obvodů.....	11
4. Vlastní koncepty uplatněné při modelování pro zlepšení regulace.....	17
Modely dynamicky složitých tepelně-energetických soustav.....	17
Přidání nelineární statické charakteristiky do lineárních modelů	18
Pokračující integrace při saturaci (wind-up)	19
5. Modely pro investigativní a pedagogické účely při návrhu algoritmů ..	21
Matematický model.....	21
Výchozí rovnovážný stav	24
Statické charakteristiky	25
Lineární stavový model kaskády nádrží.....	26
6. Závěry a nejbližší cíle.....	29
7. Literatura	32

1. OBECNÝ VÝZNAM MODELOVÁNÍ

Jedním z hlavních úkolů vědního oboru zabývajícího se řízením strojů a zařízení je poskytnout teoretické i praktické prostředky, které umožňují garantovat požadovanou funkci automatického řízení s očekávanými bezpečnostními a kvalitativními nároky převážně ještě před vlastní technickou realizací. Pochopitelně, že takový požadavek je možné zajistit pouze na základě modelování zákonitostí jevů, ke kterým dochází v souvislosti s funkcí obvodů řízení. Povaha těchto modelů může být velmi různorodá. Od původně převažujících modelů na bázi fyzikálních analogií, v současnosti vývoj dospěl k zcela dominujícím sofistikovaným způsobům matematického modelování opírajícího se o různé formalizmy. Vývoj teorie automatického řízení jako oboru založeném na matematickém modelování tak dosáhl velmi vysokého stupně rozvoje a abstrakce, často vzdáleného reálným potřebám praxe. Pozitivním faktorem vývoje směrem k matematické abstrakci je mohutný nárůst možností počítačové výpočetní techniky umožňující v současnosti většinu matematicky formulovaných souvislostí ověřit výpočtem a simulací na počítači. Výhodou počítačového modelování je, že, vedle zvládnutí jinak analyticky velmi obtížně řešitelných matematických vztahů, může efektivně doplnit modelovanou realitu o modely zásahů inženýrského charakteru ať už se týkají změn parametrů, konfigurace nebo jiných způsobů konstrukčního řešení nebo provozních podmínek. Inženýrské modelování nabývá tak stále více charakteru inženýrské simulace, kdy v uživatelsky přívětivém prostředí jednoúčelově vyvinutých programů nebo za použití univerzálního simulačního softwaru se dostává vývojovým pracovníkům zcela nových možností jak v počtu ověřovaných alternativ, tak v rychlosti a kvalitě závěrů. Není překvapením, že tento trend není spojen výlučně s oblastí řízení, nýbrž že zasáhl prakticky všechny technické a přírodovědné obory. V oblasti strojírenství jej pak lze také vnímat jako přechod od dříve převažujícího statického dimenzování a snahy docílit požadované provozní charakteristiky k pohledu na chování a vlastnosti v průběhu dynamických změn. Protože dynamický pohled pro automatické řízení je typický od začátku jeho existence, lze rozšíření role dynamických modelů ve strojařských oborech považovat za jeden z nejvýznamnějších obecných dopadů teorie automatického řízení. Proto výuka jejích základů na strojních fakultách si získala nezpochybnitelný význam a přispěla k poznání úlohy a významu dynamických modelů v porovnání s dominujícím statickým pohledem.

Z pohledu automatického řízení lze vnímat dva směry ve využití modelování. Tradiční použití je spojeno s návrhem regulačních obvodů, kde se stalo tak

zažitým prostředkem, že se např. běžně jako regulační obvod uvádí jeho blokové schéma. Použití idealizovaných matematických modelů může přinést zkreslené interpretace dosažených výsledků, avšak rozvoj většiny metod v teorii automatického řízení je založen na jejich použití se snahou dosáhnout identifikací co nejpřesnější matematický popis modelu.

Vedle toho se v současnosti rozvíjí i další směr využití modelování. Provoz a používané technologické postupy mnoha výrobních a zpracovatelských zařízení jsou dnes natolik složité a náročné na dodržení správného postupu, že provoz ani obsluha nejsou zvládnutelné bez plné automatizace. To přináší kromě jednoznačných výhod paradoxně i jeden negativní dopad. Při plné automatizaci se operátorská obsluha takových zařízení stává dosti rutinní záležitostí pouhého dohledu nad funkčností zařízení. Za běžného provozu se od obsluhy se nevyžadují okamžitá samostatná rozhodnutí. Klesají tak nároky na její kvalifikaci a přestává být ekonomické zaměstnávat pracovníky s vysokou kvalifikací, kterou uplatní ojediněle za mimořádných okolností případně při spouštění a odstavování, změnách technologických podmínek výroby atp. Přesto je důležité, aby obsluha měla určité dovednosti a hlavně je neztrácela. Stále významnější úlohu tak nabývají operátorské simulátory zejména v nízkonákladových provedeních, kdy k tréninku jsou využívána standardní řídicí operátorská pracoviště a v době technologických odstávek místo připojení k vlastnímu technologickému zařízení jsou tato pracoviště napojena na simulační model řízeného procesu. Tento model charakterizují specifické vlastnosti: nemusí být přesný v hodnotách, ale ve vzájemných relacích, trendech musí i u zkušeného operátora vyvolávat dojem, že řídí skutečný proces. Obecně úkolem operátorských simulátorů je trénovat reakce na vznik nebezpečných situací, neočekávaný a nepředpokládaný souběh náhodných okolností, na které není řídicí systém naprogramován. Podstatná není jenom bezrizikovitost takového tréninku, ale možnost realizace cvičení v dodržování havarijních a provozních předpisů. Správnost řešení kritické situace se totiž posuzuje nejenom podle dosaženého efektu, ale velmi často podle míry dodržení předepsaných postupů. Počítačové realizace operátorských simulátorů vedle modelů dynamických systémů musejí podporovat přímé využití empirických znalostí a experimentálních dat, simulaci funkcí připojeného řídicího systému a případně emulaci vizualizace a operátorských obrazovek. Jejich zajištění bylo ověřeno programem MATLAB a jeho toolboxů nap. v [7], [12], [14], [15].

[7] Neuman, P., Šulc, B., Jarolímeck, A. (1999): Engineering Simulator of a Coal Fired Steam Boiler Applied to Optimum Combustion Control. Preprints of the 14th IFAC World Congress. Beijing, July 5-9, 1999. Edited by Han-Fu Chen, Dia-Zhan Cheng and Ji-Feng Zhang. Volume Editors: T. McAvoy, S. L. Jamsa-Jounela, H. W. Weber, S. Shiuya O-7c-03-6 Elsevier Science, Amsterdam 1999, pp 167-172. ISBN 0-08-043248-4.

[12] Šulc, B., Jan, A. J. (2001): User Friendly Simulink Thermal Power Plant Modelling Using Object Oriented Non-linear Dynamic Model Library. Proceedings of the 5th IASTED International Conference Power and Energy Systems PES'2001. November 17-23, 2001, Tampa, Florida, USA. ACTA Press, Anaheim – Calgary – Zürich, pp 253-256. ISBN 0-88986-317-2.

[14] Šulc, B., Neuman, P., Hrdlička, P., (2002): Process Instrumentation Modular Models of a Thermal Power Plant for Operator Training Simulators. Preprints of the 15th IFAC World Congress Proceedings. Editors: E. F. Camacho, L. Basáñez, J. A. dela Puente. Barcelona, July 21-26, 2002. Elsevier, Oxford.

[15] Jan, J. A. (2002): Soft Computing in an Object Oriented Nonlinear Modelling and Control of Thermo-Fluid Dynamic Systems. PhD Thesis. CTU in Prague, March, 2002.

2. MOTIVY PRO VÝBĚR TÉMATU

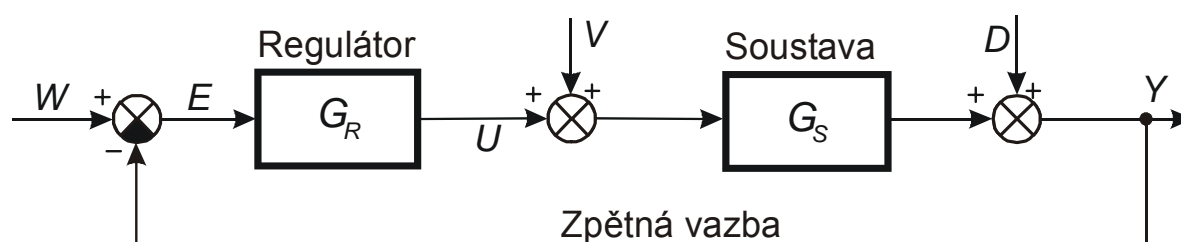
Volbu tématu přednášky zřejmě nejvíce ovlivnila skutečnost, že návrh regulačních obvodů a simulace řízených procesů jako nejtýpější rys náplně osobních celoživotních odborných aktivit se neobejde bez použití simulace a s ní spojenou tvorbou zejména matematických modelů. V rámci hodnotícího pohledu na použité přístupy k modelování je také možné s určitým nadhledem bez nutnosti popisu specifických detailů zmínit postupy syntézy řízení, u nichž bylo modelování využito. Tím se otevírá možnost vyjádřit i určitý vývoj vlastních názorů nad smyslem některých teoretických metod tak, jak k němu došlo v souvislosti s poznáním o jejich využitelnosti v praxi. To je zřejmě největší problém současné teorie řízení, která, opíraje se o extrémně bohatou nabídku formalizmů matematického popisu, se čím dále více vzdaluje svému původnímu poslání – být teoretickým předvojem realizovaného technické pokroku v oblasti řízení procesů a zařízení.

Cílem textového zpracování přednášky je prezentovat určité utřídění způsobů uplatnění matematického modelování při návrhu řízení se současným zhodnocením předností a nedostatků při reálném nasazení. Při návrhu automatického řízení se uplatňuje vysoký stupeň abstrakce vyplývající z povahy principů, na nichž je řízení založeno. Proto je třeba, možná daleko více než v jiných technických oborech, upřednostnit to, aby se pomocí modelování dospělo k zobecněnému řešení reálných problémů, než naopak, aby se k získanému elegantnímu abstraktnímu matematickému řešení na bázi modelu teprve následně hledalo nějaké praktické uplatnění. Tento pohled na úlohu modelování byl autorem vždy vnímán jako důležitý, prosazován ve výuce a výzkumu a nakonec je vyjádřen programem v současnosti rozpracovávané koncepci bezmodelového přístupu k seřizování nejrozšířenějšího PID regulátoru.

S ohledem na dominující postavení PID regulátorů v průmyslových aplikacích, vychází hodnocení možností využití modelování především z pohledu potřeb optimalizace funkce standardního regulačního obvodu. Pro praxi asi tím nejsilnějším argumentem, proč si může dovolit zpochybňovat potřebu modelování, je okolnost, že ve standardních aplikacích při použití PID regulátoru, zejména po vyřazení D příp. I složky a opatrném počátečním seřizení, regulační obvod může plnit svoji funkci ihned po připojení regulátoru. S velkou pravděpodobně s nekvalitním výsledkem, ale ten dodavatel při troše zkušeností zlepší seřizením na místě. Kromě toho, skutečná optimální funkce regulačního obvodu nebývá zákazníkem dostatečně jasně specifikována, natož kontrolována.

3. ROLE MODELOVÁNÍ PŘI NÁVRHU STANDARDNÍCH REGULAČNÍCH OBVODŮ

Při hodnocení úlohy modelování v moderním průmyslovém řízení by se přednostně mělo přistupovat z pohledu nejčastěji se vyskytujících typů regulátorů. Těmi jsou PID regulátory. Uvádí se, že jsou použity až u 90 % dodavatelsky realizovaných regulačních obvodů. Vysoký stupeň jejich uplatnění vyplývá z ekonomických zájmů, protože tyto standardní regulační obvody jsou bez nebo s malými šancemi, že někdo poskytne čas a dodatečné prostředky na experimentování se optimalizací seřízení nebo hledání vhodnějšího algoritmu, které je obvyklé u zbývajících 10 % případů, kdy se jedná o zcela nově vyvíjené technologie nebo technologie s vysokou investiční náročností a nároky na bezpečnost provozu. Míra, s jakou je určitý návrhový nebo seřizovací postup akceptován v praxi, je proto limitován těmito faktory, které se stávají se tak hlavním kritériem v posuzování potřebnosti modelování.



Obr. 1 Blokové schéma uzavřeného regulačního obvodu

Je jistě zřejmé, že na výsledných vlastnostech obvodu a jeho chování se kromě elementárního požadavku uzavření zápornou zpětnou vazbou se hlavně podílejí obě části sériové spojení dvou základních částí obvodu: regulátoru a soustavy (viz obr. 1). Z teoretického hlediska jeví ideální znalost matematických modelů obou částí, nejlépe v lineární podobě, která umožňuje k nim zavést přenosy (regulátoru G_R a soustavy G_S) a pro ně odvodit výsledný přenosový model chování celého regulačního obvodu (např. model řízení $G_{wy} = G_R G_S / (1 + G_R G_S)$). Na tomto principu je postavena celá teorie lineární regulace, která do detailu je schopna předem analyzovat očekávané výsledky z hlediska stability, předpokládaného chování, optimálního seřízení regulátorů atd. s jednou velmi zásadní okolností - reálné výsledky ne vždy odpovídají teoretické předpovědi a ne vždy prostředky nabízené teorii reálná praxe je ochotna využít. Příkladem může být návrh regulačního obvodu na principu kompenzace dynamiky regulované sou-

stavy. Tento postup, při kterém je hledán přenos regulátoru tak, aby se s ním dosáhlo optimalizace funkce celého obvodu $G_R = 1/G_S(1 - G_{wy})/G_{wy}$, je zcela závislý na znalosti přenosu soustavy a možnosti k danému přenosu soustavy realizovat adekvátní přenos regulátoru. V současných číslicových realizacích je to vlastně pouze otázka naprogramování. Je velkým překvapením, že ačkoliv podle vlastních autorových zkušeností návrh fungoval velmi dobře a bylo možné dosáhnout požadovaných ukazatelů chování, nepodařilo se zjistit známky masovějšího použití tohoto postupu v praxi. Zásadní roli při tom hraje zřejmě nedůvěra praxe založit funkci regulátoru na jiném principu, tj. v daném případě na principu kompenzace dynamiky regulované soustavy, protože jsou zvyklí, že s PID regulátorem, pokud neudělají fatální chybu, regulace bude fungovat vždy a s možností zasáhnout jim dobře známým (heuristickým) postupem nastavování zesílení, integrační a derivační časové konstanty. Je také třeba připustit, že přínos kvalitního seřízení se v ekonomických hodnoceních obvykle pohybuje v řádu procent, zatímco zásahy do technologie lze dosáhnout úspor řádově vyšších.

Z pohledu jedné komponenty regulačního obvodu – regulátoru lze regulační obvody rozdělit na dvě skupiny:

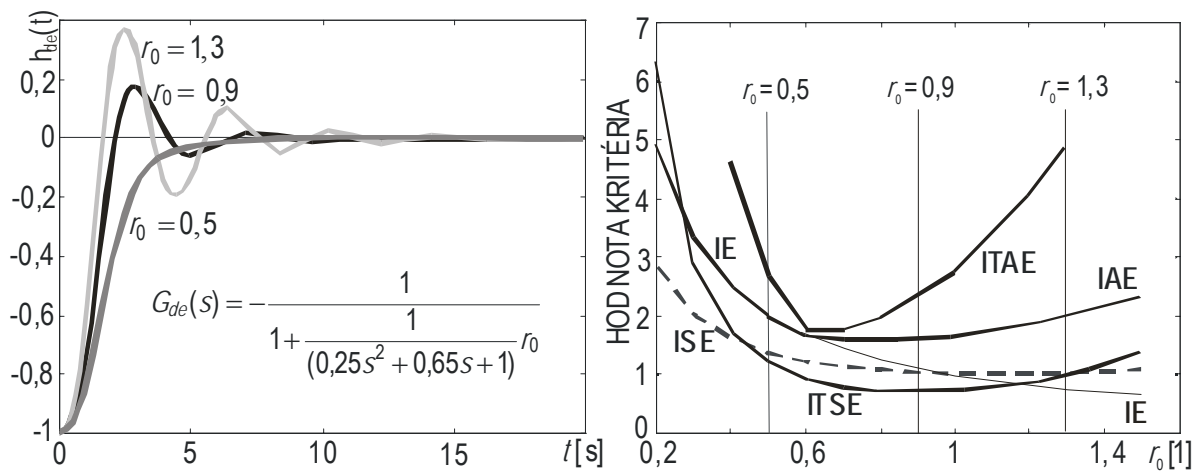
- obvody s optimalizovanou strukturou,
- obvody s pevně danou strukturou.

Zatímco první skupina se neobejde bez znalosti přenosového modelu regulované soustavy, druhá skupina pracuje s regulátory, jejichž přenos je předem znám (PID regulátory) a obejde se v zásadě bez modelu soustavy, pokud není využíván k analytickému podloženému seřízení parametrů regulátoru.

Využití modelu soustavy k analytickému seřízení regulátoru má dvě základní koncepce hodnocení kvality regulace. První, **odezvo**vá, staví hodnocení na kritériích založených na zjištění průběhu regulační odezvy. Tento průběh lze zjistit:

- analyticky výpočtem (většinou s využitím lineárního modelu regulačního obvodu),
- simulací na počítači, kdy lze obzvláště dobře kombinovat zjištění odezvy pomocí analytického výpočtu s analyticky neuvěřitelnou částí výpočtu většinou spojenou s výskytem nelinearit
- experimentálně přímo na reálném regulačním obvodu s nejrealističtějšími výsledky často ovšem s nerealizovatelnými požadavky na proveditelnost.

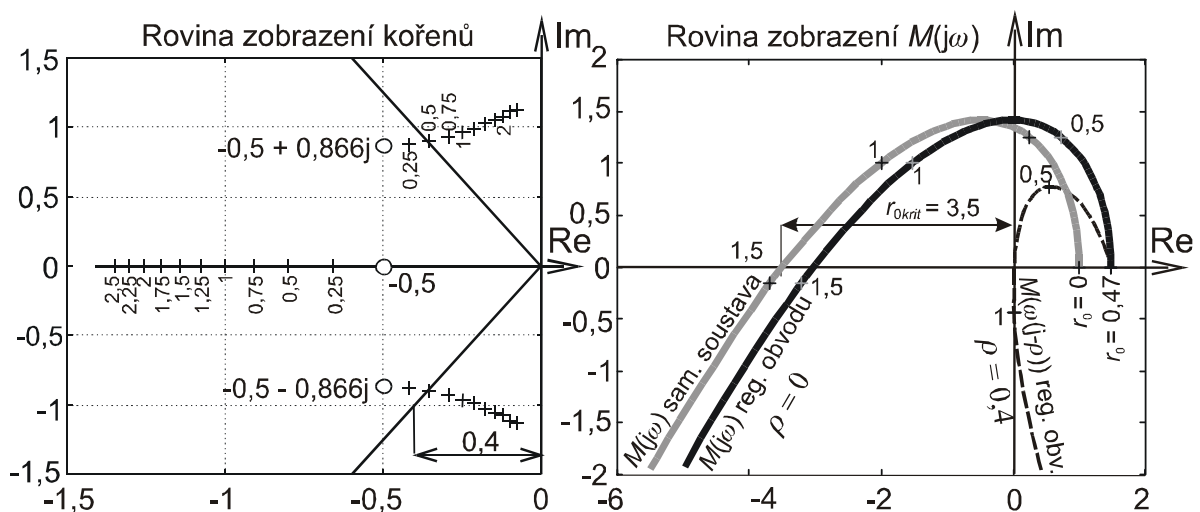
Standardním nástrojem pro porovnání a vyhodnocení nejlepší odezvy jsou integrální kritéria, z nichž kritérium kvadratické (příp. lineární) regulační plochy mají nejbohatší zázemí výpočtového zjištění. Všechna integrální kritéria jsou bezproblémově využitelná při simulaci. Porovnání průběhu hodnot kritérii v závislosti na jednom seřizovaném parametru ukazuje *obr. 3*, z něhož je mimo jiné patrná i nejednoznačnost výsledku.



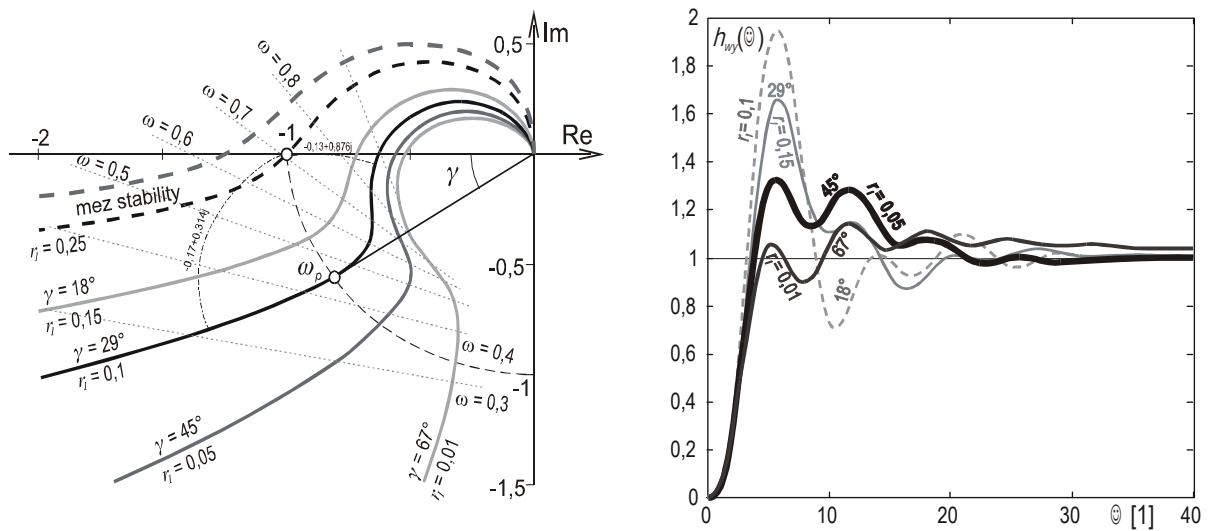
Obr. 3 Porovnání průběhu odezev v závislosti na nastaveném zesílení s ohledem na hodnocení kvality regulace různými integrálními kritérií

Nevýhodou odezvového hodnocení je silné zaměření většiny postupů na přechodové odezvy, tj. na reakce na obtížně realizovatelnou ideální skokovou změnu a problémy s rozdílnými závěry pro seřízení regulátoru, je-li regulační obvod ve funkci sledování žádané veličiny nebo odstraňování účinku poruchy.

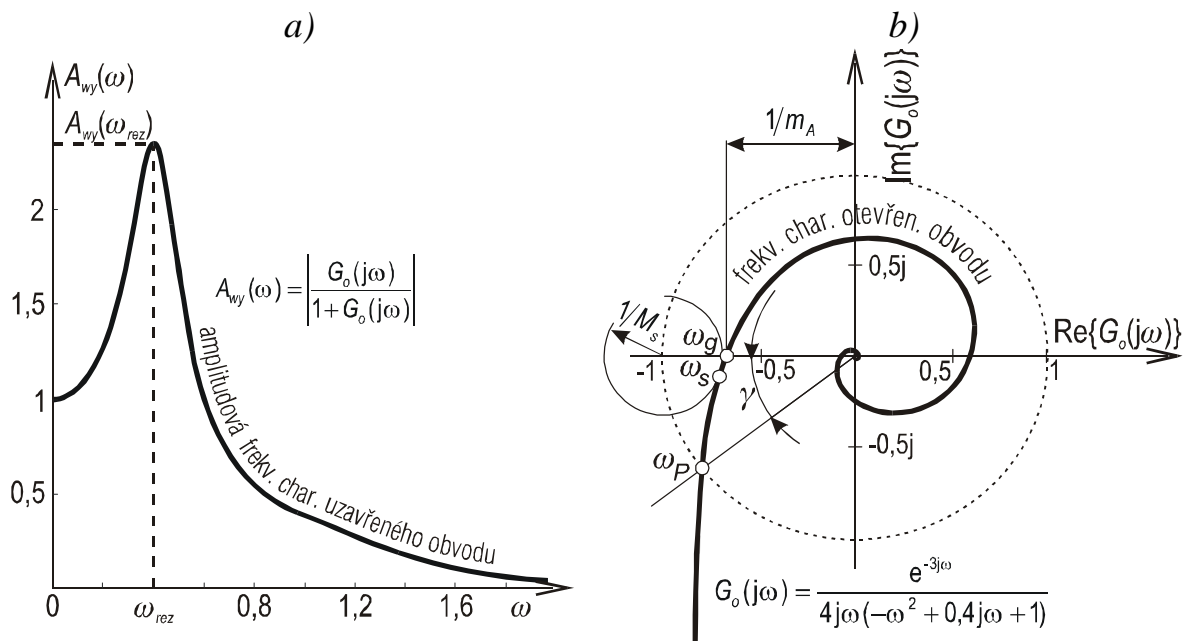
Vedle odezvové koncepce hodnocení kvality regulačního pochodu existuje druhá forma přístupu. **Globální** koncepce klade důraz místo na odezvu na vlastní dynamiku regulačního obvodu. Z pohledu reakce dynamického systému v regulační odezvě lze vymezit dvě složky: relaxovanou jako reakci na vnější podnět při nulových počátečních (stavových) podmínkách a homogenní jako pokračování vývoje stavu směrem k rovnovážnému stavu v důsledku nenulového stavu v daném čase. Odezvový přístup je spojen s první, relaxovanou složkou odezvy, globální přístup využívá nástrojů, kterými lze ovlivnit průběh homogenní složky odezvy. Jedná se zejména o charakteristickou rovnici a její kořeny, ale i o jiné prostředky, jimiž je tato informace ekvivalentně vyjádřena (např. gra-



Obr. 2 Souvislost mezi rovinou kořenů a jejího zobrazení charakteristickým polynomem



Obr. 4 Nyquistovy křivky pro různé hodnoty integrační konstanty r_I s vyznačením příslušné hodnoty úhlu γ bezpečnosti ve fázi a průchozí frekvence ω_p a souvislost s časovým průběhem přechodové odezvy fíckým zobrazením Michajlovovy (obr. 2) nebo Nyquistovy (obr. 4) křivky



Obr. 5 Základní ukazatele používané pro ohodnocení kvality regulace založené na průběhu frekvenční charakteristiky:
 a) uzavřeného regulačního obvodu
 b) otevřeného regulačního obvodu

uplatněním konformního zobrazení v komplexní rovině).

S jejich pomocí se definují ukazatelé kvality regulace, z nichž nejznámějšími jsou:

- maximální rezonanční převýšení $A_{wy}(\omega_{rez})$
- rezonanční úhlová frekvence ω_{rez}

- maximum modulu M_s citlivostní funkce $S(j\omega)$
- amplitudová bezpečnost m_A a fázová bezpečnost γ

s grafickou interpretací na *obr. 5*

a vztahy

$$A_{wy}(\omega_{rez}) = \max_{0 \leq \omega < \infty} A_{wy}(\omega),$$

$$A_{wy}(\omega) = \text{mod } G_{wy}(j\omega) = |G_{wy}(j\omega)|$$

$$M_s = |S(j\omega_s)| = \max_{0 \leq \omega < \infty} |S(j\omega)|,$$

$$S(j\omega) = \frac{1}{1 + G_o(j\omega)},$$

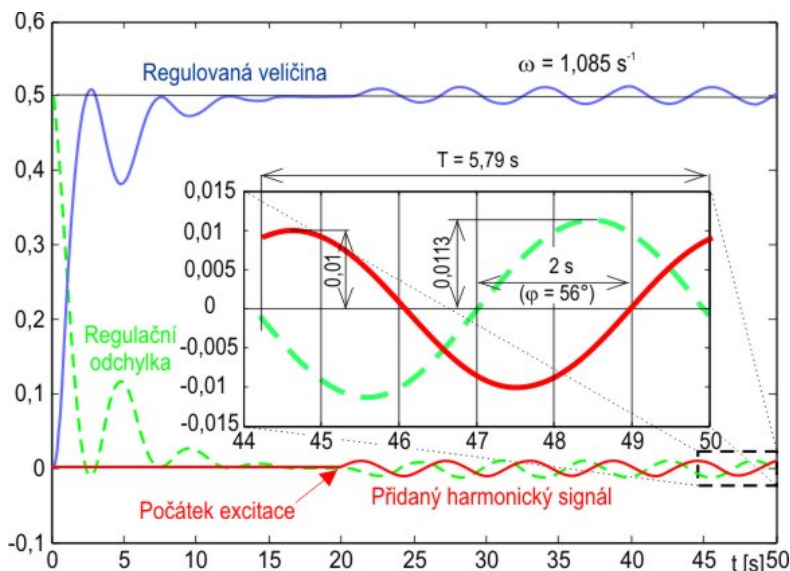
$$A_o(\omega_p) = 1 \Rightarrow \omega_p \quad \Rightarrow \gamma = \pi - |\varphi_o(\omega_p)|,$$

$$A_o(\omega) = \text{mod } G_o(j\omega) = |G_o(j\omega)|,$$

$$\varphi_o(\omega) = \arg G_o(j\omega),$$

$$\varphi_o(\omega_g) = -\pi \quad \Rightarrow \quad \omega_g, \Rightarrow m_A = \frac{1}{A_o(\omega_g)}.$$

Výhodou globálního přístupu je nezávislost optimálního seřízení regulátoru na konkrétním působení vstupu, ale i možnost definovat toto optimální nastavení přímo, např. na principu kompenzace dynamiky, hodnocením pomocí ukazatelů kvality regulace jako jsou bezpečnost ve fázi amplitudě atp. Nevýhodou je, že zatímco hodnocení pomocí odezvových kritérií je omezeno hlavně proveditelností experimentu pro zjištění odezvy, globální hodnocení se většinou neobejde bez lineárního matematického modelu chování regulačního obvodu.



Obr. 6 Ukázka odezvy regulačního obvodu před a po zavedení buzení harmonickým signálem

Logickým krokem se jeví spojit a využít výhod obou koncepcí. Specifickou kategorií vytváří přístup zmíněný v habilitační práci [33] v souvislosti se samoseřizovací funkcí regulátoru, který svým způsobem kombinuje oba přístupy.

Vnesení přídavného amplitudově malého harmonického signálu k regulační odchylce vyvolá frekvenční odezvu, tj. fázově a

[33] Šulc, B. (2007): Využitelnost modelování a regulace složitých tepelně-energetických zařízení v praxi. Habilitační práce předkládaná na Fakultě strojní ČVUT v Praze.

amplitudově pozměněné kmity zjistitelné na průběhu regulované veličiny po odeznění přechodových reakcí, které se dají vyhodnotit i v případě, že obvod bude ve svém chování vykazovat znaky nelinearity. Přestože se zdá, že se zjišťuje odezva a tudíž že se jedná odezvový přístup, není tomu tak. Vyhodnocení kvality seřízení neprobíhá přímo z odezvy na vnesený harmonický signál, nýbrž na základě ukazatelů vyhodnocených ze zjištěného amplitudového zesílení a fázového posunu ve vztahu k empiricky definovaným optimálním hodnotám bezpečnosti ve fázi, bezpečnosti v amplitudě nebo maximální citlivosti. V případě, že tyto indikátory nedosahují požadovaných hodnot, lze provádět autokorekce v seřízení regulátoru tak dlouho, dokud není dosaženo požadovaného optima [32].

[32] Šulc, B. (2007): Utilization of Maximum Sensitivity in Control Quality Indication.
In: Proceedings of the 11th WSEAS International Multiconference on CSCC. Athens: WSEAS Press, 2007, s. 56-60. ISSN 1790-5117.

4. VLASTNÍ KONCEPTY UPLATNĚNÉ PŘI MODELOVÁNÍ PRO ZLEPŠENÍ REGULACE

Modelování vytvoří exaktní, většinou matematickými prostředky podložené zázemí pro předpověď chování a funkci regulačního obvodu, na jejímž základě lze oprávněně realizovat výsledky návrhu, provést ohodnocení očekávaného výsledku exaktně zavedenými kritérii pro posuzování kvality regulace a v případě jeho nedosažení cílevědomě postupovat při hledání a odstraňování příčin. Znalost modelu regulované soustavy umožňuje zlepšit funkci regulátoru průběžnou optimalizací parametrů, návrhem náročnějšího algoritmu a využitím informací z minulých zásahů. V habilitační práci [33] je uveden výběr ukázek výsledků z uvedených tří cest jako demonstrace příspěvku ke zlepšení výsledků funkce regulačního obvodu. Úloha modelu soustavy zejména jeho potřebnost v lineární teorii regulace byla naznačena v předchozí části. Z hlediska tvorby modelu soustavy a jeho využití při simulaci jsou důležité další otázky. Ty, které představují původní přínos k vlastní tvorbě modelů se týkají

- modelování dynamicky složitých soustav v oblasti tepelně-energetických procesů,
- metodiky snižování řádu podrobných modelů s využitím simulace
- hybridního spojení nelineárních a lineárních částí v jednom simulačním modelu,
- respektování potřeby zastavit integraci v simulačních modelech při saturaci.

Modely dynamicky složitých tepelně-energetických soustav

V oblasti tvorby modelů regulovaných soustav a dynamických modelů vůbec se jednalo o přínos zaměřující se ve své podstatě na způsob, jak určitým schůdným, ale zjednodušujícím postupem zajistit vytvoření modelu, který pro účely řízení a simulace bude dostatečně věrným reprezentantem podstatných a zjevných projevů modelovaného zařízení a zároveň následně umožní schůdnou syntézu řízení. Vedle deduktivně koncipovaného přístupu k identifikaci složitých regulovaných soustav na principu separace a soustředění tepelně-energetických jevů [1] se ukázalo jako nezbytné nasazení induktivního přístupu, který umožňuje pro realizaci dalšího zjednodušení a aproximace matematického modelu regulované soustavy [2].

Byl vytvořen metodický postup uplatněný na modelech potrubní sítě uni-kátní turboexhaustorové stanice s několika spolupracujícími axiálními a radiálními kompresory extrémních výkonů, který se skládá z následujících kroků:

1. vytvoření podrobného počítačového modelu s uplatněním kompartmentového principu vedoucího na vysoký řád a nelineární chování,

2. získání přechodových charakteristik jako odezev na změny v otevření ventilů realizujících akční zásah a poruchový odběr,

3. použití identifikační metody postupné integrace přechodových charakteristik k získání koeficientů přenosů do lineární aproximaci nižšího řádu (vznik koeficientu s opačným znaménkem než předchozí došlo k automatickému omezení řádu obvykle na třetí),

4. upřesnění hodnot koeficientů získané „hrubé“ přenosové aproximace z bodu 3 gradientovou metodou.

Popsaným postupem získané přenosové aproximace z různých pracovních režimů byly využívány k seřízení regulátoru a následné mu simulačnímu ověření použitelnosti regulace. Na vlastním díle bylo ještě třeba seřízení doladit, avšak pracovníci dodavatele, kteří prošli počítačovými simulacemi, zvládali tuto činnost excelentně s obdivem od stálých operátorů provozovatele stanice.

Přidání nelineární statické charakteristiky do lineárních modelů

Simulátory, zejména operátorské, mohou využívat modely, ve kterých je oddělena dynamická část od statické. Model dynamické části bývá lineární s neměnnou dynamikou, avšak do statické části jsou začleněny nelineární vztahy, často opírající se o reálná data. Bylo ověřováno jak uplatnění principů Hammersteinova modelu [11], tak i speciální realizace modelů přenosů, v návrhu regulátoru nebo operátorských simulátorů v oblasti tepelně-energetických zařízení [13]. S ohledem na téma přednášky nebude v tomto textu této oblasti věnována speciální pozornost.

[1] Šulc, B. (1979): Syntéza řízení systémů transportu vzdušiny.

Kandidátská disertační práce. České vysoké učení technické, katedra automatického řízení, Praha.

[2] Šulc, B., Rosický, M. (1983): Aproximace dynamicky složitých objektů z přechodových charakteristik.

Automatizace 26 (1983), č. 12, 305-310.

[11] Šulc, B., Neuman, P., Zítek, P., Vyhlídal, T. (2001): Coal Boiler Engineering Simulators Using Transfer Functions in Nonlinear Modeling.

Proceedings of the 12th IASTED International Conference Modelling, Identification and Control MIC'2001, February 19-22, 2001, Innsbruck, Austria. ACTA Press, Anaheim – Calgary – Zürich, pp 137-142. ISBN 0-88986-316-4.

[13] Šulc, B., Hrdlička, F., Dlouhý, T. (2002): Simulated Boiler Pressure Pulsation in Comparison with Experimental Measurement.

Preprints of the 15th IFAC World Congress Proceedings. Editors: E. F. Camacho, L. Basáñez, J. A. dela Puente. Barcelona, July 21-26, 2002. Elsevier, Oxford.

[33] Šulc, B. (2007): Využitelnost modelování a regulace složitých tepelně-energetických zařízení v praxi.

Habilitační práce předkládaná na Fakultě strojní ČVUT v Praze.

Pokračující integrace při saturaci (wind-up)

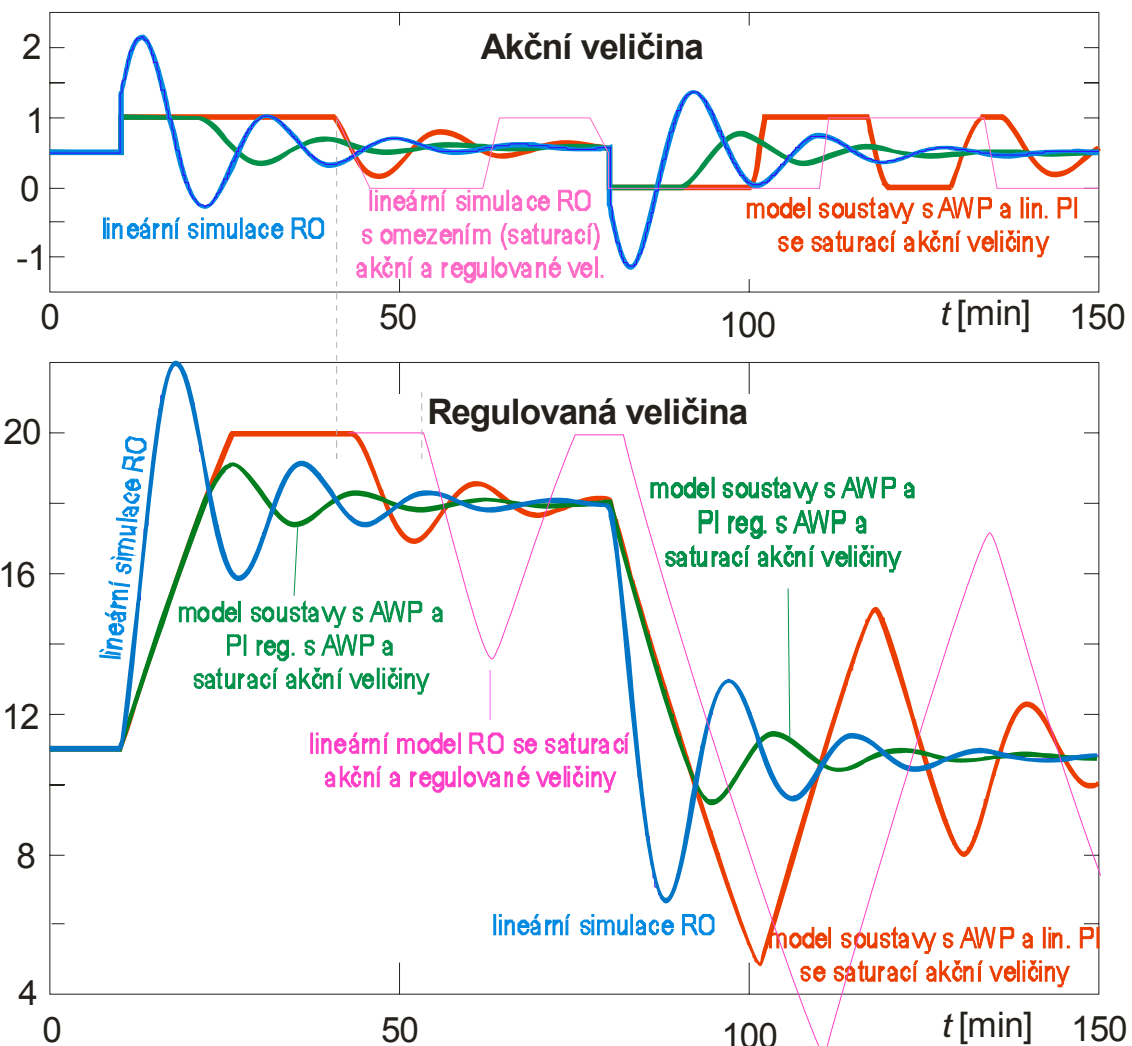
Druhou oblastí angažovanosti v oblasti s vazbou na modelování s původními přínosy reprezentuje problematika pokračující integrace při saturaci, tzv. integral wind-up. Informovanost o původně poměrně neznámém a donedávna opomíjeném jevu s negativním dopadem na kvalitu regulace, je-li integrace součástí regulačního algoritmu a v průběhu regulace dojde k omezení akční veličiny [4], [5], se v posledních letech podařilo poměrně úspěšně rozšířit. Avšak v oblasti modelů regulovaných soustav zůstává významnou příčinou zkreslujících výsledků a chybných závěrů ze simulace. V simulačních modelech akumulárních jevů nebo pohybových zákonitostí využívaná operace integrace vyžaduje v souladu s realitou zastavení, jakmile fyzikální nebo mechanické omezení brání jejich pokračování. Obvykle se taková omezení jako jsou např. dorazy, parametry napájení nebo fyzikálními zákonitostmi dané podmínky pro skupenské změny, vznik nasycení atd. v modelech respektují a realizují různými nelineárními prvky a omezovači, avšak integrátor, jehož výstup je spojen s generováním proměnné, která je následně omezována, tuto proměnnou na svém výstupu generuje bez zastavení. V důsledku toho vzniká při simulaci nereálná situace, kdy po pominutí důvodů, které vedly ke vzniku saturace, je třeba před tím pokračující integrací hodnoty výstupu z integrátoru zpětně odintegrovat a to tak dlouho, dokud se opět nedostanou zpět pod mezní hodnotu. Skutečná fyzikální veličina, která je reprezentována v simulačním modelu výstupem z integrátoru se však od své mezní hodnoty odpoutá okamžitě, jakmile pominou důvody jejího omezení. Čas potřebný k odintegrování významně zkreslí výsledky simulace a jak ukáže příklad může vést na chybné závěry.

Při realistické simulaci je třeba do simulačních modelů takové zastavení integrace dodatečně zavést. Standardní metodiky tvorby simulačních modelů zejména založené na realizaci přenosů pomocí bloků tuto okolnost nezdůrazňují a mnohé simulační programy donedávna ani nenabízely u bloků realizujících integraci příslušné prostředky pro zastavení.

Na *obr. 7* je společně zachyceno několik výsledků ze simulace funkce regulačního obvodu. Ve všech případech byla jak soustava, tak regulátor modelovány pomocí lineárních přenosových bloků. Modely se lišily pouze mírou vybavení omezovači a rozsahem opatření proti vzniku jevu wind-up (použití antiwindupu je vyznačeno zkratkou AWP), které bylo použito postupně jak u regulátoru (typu PI), tak pak i modelu soustavy. Model regulačního obvodu (RO) byl vybaven omezovači akční veličiny na interval 0 až 1 a regulovaná veličina na interval 0 až 20 dm (regulovaná veličina představovala výšku hladiny v nádrži, která při

[4] Šulc, B. (1994): Integral Wind-up in Control and System Simulation. Proceedings of the 3rd Symposium on Advances in Control Engineering Education. Tokyo, Japan. Published by Elsevier, Oxford, United Kingdom.

[5] Šulc, B. (1997): Integral Wind-up in Control and System Simulation. In: Control Engineering Solutions. A Practical Approach. (Albertos, P., Strietzel, R., Mort, N. - Editors). IEE Control Engineering Series Vol. 54, pp 61-76. The Institution of Electrical Engineers, London.



Obr. 7 Výsledky lineární simulace chování regulačního obvodu při různé míře respektování omezení a zastavení integrace (hodnotě 20 dm začne přetékat).

Omezíme-li analýzu výsledků na dva vzájemně nejvíce kontrastní případy – čistě lineární model regulačního obvodu a model s omezeními a opatřeními proti vzniku pokračující integrace (AWP), je zřetelný rozpor v hodnocení dosažených výsledků. Průběhy u čistě lineární simulace vyvolávají dojem celkem uspokojivě fungující regulace, dokud nejsou zasazeny do rámce neodchylkového sledování hodnot, v němž je pak zcela evidentní, že jak akční, tak i regulovaná veličina překračují reálné mezní hodnoty se závěrem, jak se ukáže chybným, že regulátor s daným nastavením není použitelný. Vybaví-li se regulátor prostředky pro zastavení integrace (AWP – antiwind-up) a provede-li se realistická simulace zahrnující jak omezení, tak i zastavení integrace v modelu soustavy, je závěr zcela opačný – regulátor je použitelný a požadovaná změna výšky hladiny proběhne bez přetečení nádrže. Protože sledování v neodchylkových souřadnicích bývá v literatuře poměrně vzácné, je třeba prezentované výsledky ilustračních příkladů brát s velkou opatrností a rezervou.

5. MODEL Y PRO INVESTIGATIVNÍ A PEDAGOGICKÉ ÚČELY PŘI NÁVRHU ALGORITMŮ

Při vývoji pokročilých algoritmů regulace je nutné provádět testy funkčnosti na simulačních modelech. Častým nešvarem vzdalujícím takové algoritmy reálnému nasazení je používání intuitivně odhadnutých změn hodnot parametrů, které se sice snadno simulují, ale vůbec neodpovídají reálným změnám podloženými fyzikálními zákonitostmi. Proto se osvědčily a jsou standardně využívány modely reálných zařízení, u nichž je možné opřít o dostatečně přesný matematický popis probíhajících procesů. Příkladem může být např. výměník tepla, pneumomotor nebo kaskáda nádrží.

Výhodou kaskády nádrží, kromě její časté realizace jako laboratorního fyzikálního modelu, je poměrně exaktní popis procesu akumulace a průtoku odpory vykazující dostatečnou mírou nelinearity vlastností. Následující text je proto koncipován jako detailní ukázka postupů a úkolů požadovaných od studentů ve výuce, mezi něž patří mimo jiné odvození matematického modelu a jeho úpravy využívající symbolického toolboxu programu MATLAB, numerickou přípravu parametrů kaskády v programu Excel a simulační výpočty v programu Simulink.

Matematický model

Zápis bilance objemových průtoků pro každou nádrž zvlášť vede na rovnice

$$\begin{aligned} F_1 \dot{h}_1(t) &= k_1 l_1(t) \sqrt{h_0 - s_1 h_1(t)} - k_2 l_2(t) \sqrt{h_1(t) - s_2 h_2(t)} \\ F_2 \dot{h}_2(t) &= k_2 l_2(t) \sqrt{h_1(t) - s_2 h_2(t)} - k_3 l_3(t) \sqrt{h_2(t)} \end{aligned} \quad (1)$$

kde F_i ($i = 1, 2$) jsou plochy hladin v nádržích, k_i ($i = 1 \dots 3$) průtokový součinitel ventilu, který má rozměr průtoku vztaženého na rozměr zdvihu kuželky $l_i(t)$ ($i = 1 \dots 3$) a odmocniny z rozdílu výšek hladin $h_i(t)$ ($i = 1, 2$). Číselně udává velikost průtoku vody při maximálním otevření a jednotkovém rozdílu výšek hladin. Proměnné s_1 a s_2 fungují jako přepínače indikující způsob propojení nádrží; je-li $s_1 = 1$, je přiváděna kapalina do první nádrže pod hladinou h_1 , je-li $s_1 = 0$, je přítok volný. Obdobný význam má s_2 pro přítok do druhé nádrže.

Volby číselných hodnot parametrů usnadní bezrozměrné vyjádření, kterými se absolutní číselné hodnoty převedou na relativní. Pro výšky hladin je

vhodné použít jako vztažnou veličinu (fiktivní) výšku hladiny ve zdroji h_0 . Pro zdvihy kuželek ventilů je použita hodnota maximálního možného zdvihu l_{imax} . Při této volbě se nabízí jako přirozená vztažná hodnota průtoku Q_{max} , která je vůbec maximální dosažitelnou hodnotou ustáleného průtoku. Číselně je rovna volnému (hydrostatickým protitlakem neovlivněnému) průtoku prvním ventilem při jeho plném otevření a napojení na zdroj. Zápis rovnic modelu (1) v bezrozměrném tvaru je

$$\begin{aligned} F_1 h_0 \dot{x}_1(t) &= Q_{max} u_1(t) \sqrt{1 - s_1 x_1(t)} - k_2 l_{2max} \sqrt{h_0} u_2(t) \sqrt{x_1(t) - s_2 x_2(t)} \\ F_2 h_0 \dot{x}_2(t) &= k_2 l_{2max} \sqrt{h_0} u_2(t) \sqrt{x_1(t) - s_2 x_2(t)} - k_3 l_{3max} \sqrt{h_0} u_3(t) \sqrt{x_2(t)} \end{aligned} \quad (2)$$

kde $Q_{max} = k_1 l_{1max} \sqrt{h_0}$, $x_i(t) = \frac{h_i(t)}{h_0}$, $i = 1, 2$, $u_j(t) = \frac{l_j(t)}{l_{jmax}}$, $j = 1, 2, 3$.

Je zřejmé, že tak, jak Q_{max} vyjadřoval objemovým průtokem měřenou maximální propustnost ventilu jedna po připojení ke zdroji, vyjadřuje

$$Q_{jmax} = k_j l_{jmax} \sqrt{h_0}, \quad j = 2, 3$$

maximální propustnosti ventilů dva a tři při jejich samostatném připojení ke zdroji. Podělí-li se rovnice (2) Q_{max} , lze definovat časové konstanty T_1 , T_2 a bezrozměrné průtokové konstanty q_2 a q_3 ($q_1 = 1$)

$$T_i = \frac{F_i h_0}{Q_{max}}, \quad i = 1, 2, \quad q_j = \frac{k_j l_{jmax} \sqrt{h_0}}{Q_{max}} = \frac{Q_{jmax}}{Q_{max}}, \quad j = 2, 3 \quad (3)$$

v bezrozměrném zápisu nelineárního (stavového) modelu kaskády dvou nádrží

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \frac{1}{T_1} \left\{ u_1(t) \sqrt{1 - s_1 x_1(t)} - q_2 u_2(t) \sqrt{x_1(t) - s_2 x_2(t)} \right\} \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{1}{T_2} \left\{ q_2 u_2(t) \sqrt{x_1(t) - s_2 x_2(t)} - q_3 u_3(t) \sqrt{x_2(t)} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

V uvedeném modelu není předpokládán jiný než lineární tvar otevírací charakteristiky ventilu. Poměrně realistický tvar „motýlkový“ nebo S tvar charakteristiky umožňuje zavést modifikace funkce hyperbolický tangens

$$\tanh(x) = \frac{\exp(x) - \exp(-x)}{\exp(x) + \exp(-x)}$$

jehož standardní průběh lze snadno vykreslit v programu MATLAB příkazy

```
x = -5:0.01:5;
plot(x,tanh(x))
```

Průběh tvarem sice vyhovuje, ale neodpovídá rozsahu možných hodnot otevření u , které v bezrozměrném vyjádření mohou nabývat hodnot 0 až 1. Úpravou souřadnic, po které původní bod symetrie charakterizovaný hodnotami

0, 0 bude spojen s hodnotou $u = 0,5$, tzn. že pro $u < 0,5$ půjde o zápornou větev průběhu funkce hyperbolický tangens, přičemž rychlost změny hodnot lze ovlivnit volbou konstanty v násobící argument funkce $\tanh(v*(u-0,5))$. Odečtením, tedy vlastně přičtením nejmenší dosahované (záporné) hodnoty funkce hyperbolický tangens získáme průběh, jemuž chybí pouze normalizace hodnot na interval 0 až 1, jak už je provedena ve vzorci

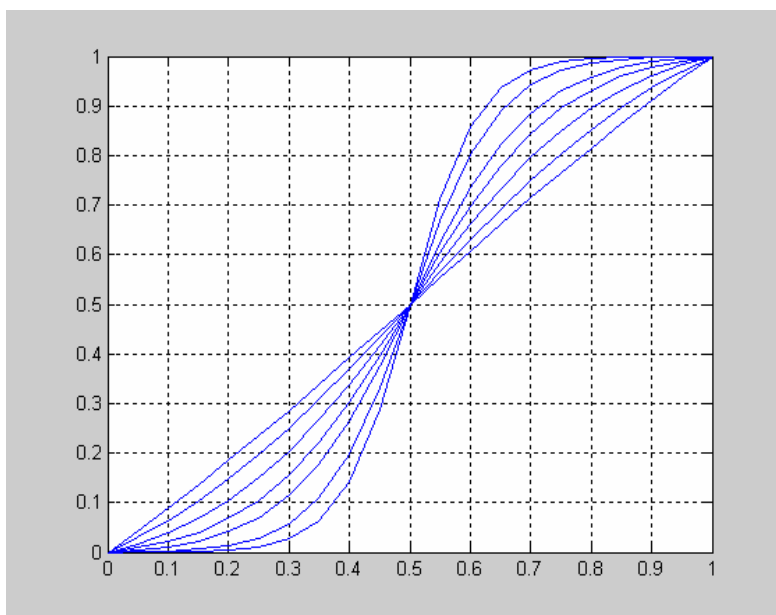
$$\frac{\tanh(uv - 0,5v) - \tanh(-0,5v)}{\tanh(0,5v) - \tanh(-0,5v)}$$

resp. po úpravě

$$\frac{\tanh((u - 0,5)v)}{2 \tanh(0,5v)} + 0,5$$

Zajímavé porovnání vlivu velikosti faktoru v na charakter průběhu otevírací charakteristiky ukazuje *obr. 8*, který vznikl jako zobrazení výsledku výpočtu v Matlabu podle zápisu:

for v=1:2:8, plot(u,(0.5+tanh((u-0.5)*v)/2/tanh(0.5*v)),hold on,end



Obr. 8 Průběh otevírací charakteristiky v závislosti na hodnotě parametru v

ukazující snadnou definici míry nelinearity otevírací charakteristiky sahající od čistě lineární závislosti pro $v = 1$ až po téměř „dvoupolohovou“ charakteristiku pro $v = 10$.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \frac{1}{T_1} \left\{ u_1(t) \sqrt{1 - s_1 x_1(t)} - q_2 u_2(t) \sqrt{x_1(t) - s_2 x_2(t)} \right\} \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{1}{T_2} \left\{ q_2 u_2(t) \sqrt{x_1(t) - s_2 x_2(t)} - q_3 u_3(t) \sqrt{x_2(t)} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

Ve vztazích (2) až (5) uváděné zdvihy kuželky ventilu je nutné nahradit hodnotami získanými přepočtem z hodnot zadaných a to podle určité, volbou v určené otevírací charakteristiky

$$u_i(t) = \frac{\tanh((z_i(t) - 0,5)v)}{2 \tanh(0,5v)} + 0,5, \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

Pro vztahy charakterizující rovnovážné podmínky je přehlednější uvažovat hodnoty u_i tj. po přepočtu z hodnot z_i .

$$x_{1_0} = \frac{s_2 u_{1_0}^2 u_{2_0}^2 q_2^2 + u_{1_0}^2 u_{3_0}^2 q_3^2}{s_1 u_{1_0}^2 u_{3_0}^2 q_3^2 + u_{2_0}^2 q_2^2 u_{3_0}^2 q_3^2 + s_1 s_2 u_{1_0}^2 u_{2_0}^2 q_2^2} \quad (7)$$

$$x_{2_0} = \frac{u_{1_0}^2 u_{2_0}^2 q_2^2}{s_1 u_{1_0}^2 u_{3_0}^2 q_3^2 + u_{2_0}^2 q_2^2 u_{3_0}^2 q_3^2 + s_1 s_2 u_{1_0}^2 u_{2_0}^2 q_2^2}$$

Pak je ovšem třeba provést inverzní přepočet

$$z_i = 0,5 + \frac{a \tanh(2 \tanh(0,5v)u_i - \tanh(0,5v))}{v} \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

Výchozí rovnovážný stav

Výchozí rovnovážný stav je možné definovat výchozí hodnotou otevření všech ventilů,

$$u_{1_0} \sqrt{1 - s_1 x_{1_0}} = q_2 u_{2_0} \sqrt{x_{1_0} - s_2 x_{2_0}} = q_3 u_{3_0} \sqrt{x_{2_0}} = q_0 \quad (9)$$

kteřému pak odpovídají ustálené výšky hladin v nádržích závisující na průtočných vlastnostech jednotlivých ventilů, tj. na konstantách q_2, q_3

U modelu kaskády nádrží používaného v úlohách regulace je vhodnější definovat rovnovážný stav přes požadovanou bezrozměrnou hodnotu regulované veličiny a rozsah jejich nastavitelných v závislosti na velikosti zátěže, tj. na ustáleném průtoku kaskádou q_0 . Standardně je v uvažovaném příkladu kaskády za regulovanou veličinu y pokládána výška hladiny v druhé nádrži. S ventilem 2, s kterým lze ovlivňovat přítok z první do druhé nádrže, se nemanipuluje (fixní otevření $u_{2_0} = \text{konst}$). Ventil 1 slouží k nastavování přítoku do kaskády a změny jeho otevření z_1 se mění regulovaná veličina požadovaným způsobem; reprezentuje tedy akční veličinu u . Tlak před ventilem 1 je předpokládán fixní a je udáván výškou hladiny h_0 fiktivního zdroje, odkud je teoreticky možný maximální odběr až Q_{\max} . Model kaskády je spojen s představou laboratorní realizace, ve které je médiem voda s průtoky měřenými v l/min a hodnotami tlaku v řádech stovek kPa. Výhodné je použití bezrozměrného vyjádření veličin. U výšek hladin je referenční hodnotou $h_0 = 40$ dm bezrozměrné výšky hladin menší než jedna odpovídají fyzikálním hodnotám několika desítek dm. Jedinou po-

ruchovou veličinou d je odběr, jehož velikost charakterizuje otevření ventilu 3 u_3 resp. z_3 . Odtud se také odvíjí určení rovnovážných stavů, jestliže k zadané výchozí hodnotě (rozsahu hodnot) y_0 regulované veličiny, která je identická se stavovou veličinou x_{20} , se najde stav odpovídající maximálnímu otevření přítokového ventilu tj. pro $u_{10} = z_{10} = 1$. Z velikosti průtoku mezi nádržemi, který se mj. musí rovnat ustálenému rovnovážnému průtoku q_0

$$q_0^2 = u_{1_0}^2 (1 - s_1 x_{1_0})$$

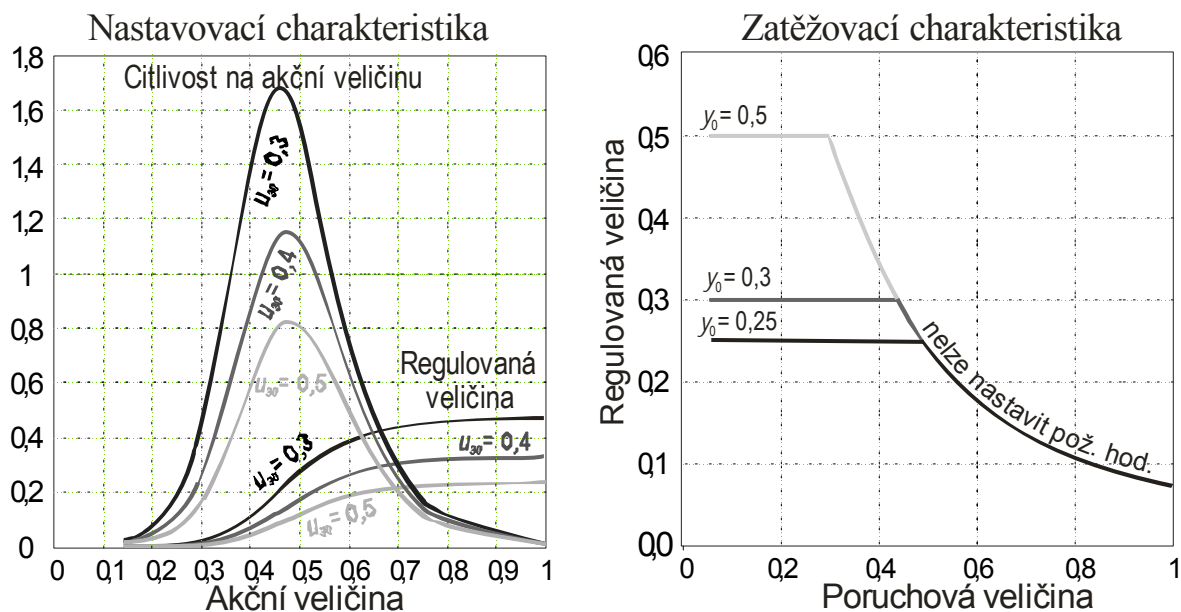
vyplývá hodnota x_{10} při $u_{10} = z_{10} = 1$ a maximální přípustné otevření ventilu u_{30} ,

$$x_{1_0} = \frac{u_{1_0}^2 + s_2 q_2^2 u_{2_0}^2 y_0}{q_2^2 u_{2_0}^2 + s_1 u_{1_0}^2} \quad u_{3_0} = \frac{u_{1_0} \sqrt{1 - s_1 x_{1_0}}}{q_3 \sqrt{y_0}} \quad (10)$$

při němž je ještě možné udržet požadovanou hodnotu výšky hladiny y_0 v druhé nádrži. Výpočet pro nižší hodnoty průtoku q_0 , tj. takové, při nichž je u_{30} menší než přípustná maximální hodnota zaručující ještě udržení požadované výšky y_0 , příp. výpočet jejího poklesu, jestliže se u_{30} otevře více než zjištěná maximálně přípustná hodnota, pak už probíhá podle vztahů (7).

Statické charakteristiky

Graficky tyto informace znázorňují nejlépe statické charakteristiky. Ve způsobu volby souřadnicového systému se mohou dosti lišit, ale v principu by vždy měly umožňovat odečtení, na jakých hodnotách musí být nastaveny (ve výchozím rovnovážném stavu) akční a poruchová veličiny, aby se regulovaná veličina mohla ustálit na požadované hodnotě (nominální režim).



Obr. 9 Ukázka statické závislosti výšky hladiny v 2. nádrži charakteristik kaskády nádrží (regulovaná veličina) na nastavení přítoku (akční veličina) a odtoku (poruchová veličina)

Obr. 8 zahrnuje též průběh citlivosti regulované veličiny na změny akční veličiny. Nelineární závislosti dalších parametrů přenosového modelu se získají v lineárního stavového modelu kaskády nádrží.

Lineární stavový model kaskády nádrží

Linearizací založené na náhradě nelineárních vztahů lineárními v okolí rovnovážného stavu vznikne z (4) lineární formulace stavového modelu, v němž proměnné reprezentují odchylky od rovnovážných hodnot označených přidáním indexu 0. Výhodně lze využít možnosti symbolického toolboxu programu MATLAB, který sérií příkazů provede potřebné symbolické diferenciální výpočty

```
syms z1 z3 v T1 T2 s1 s2 x1 x2 q2 q3 a11 a12 a21 a22 u2
u3=tanh((z3-0.5)*v)/2/tanh(0.5*v)+0.5
u1=tanh((z1-0.5)*v)/2/tanh(0.5*v)+0.5
a1_1 =u1*(1-s1*x1)^(1/2)/T1
a1_2=-q2*u2*sqrt(x1-s2*x2)/T1
a2_1=q2*u2*sqrt(x1-s2*x2)/T2
a2_2=-q3*u3*sqrt(x2)/T2
A11=diff(a1_2,x1)+diff(a1_1,x1)
A12=diff(a1_1,x2)+diff(a1_2,x2)
A21=diff(a2_1,x1)+diff(a2_2,x1)
A22=diff(a2_1,x2)+diff(a2_2,x2)
B11=diff(a1_1,z1)+diff(a1_2,z1)
B13=diff(a1_1,z3)+diff(a1_2,z3)
B21=diff(a2_1,z1)+diff(a2_2,z1)
B23=diff(a2_1,z3)+diff(a2_2,z3)
```

z nichž po převedení do standardního zápisu úpravách s použitím (9) vyplynou koeficienty do stavové matice lineární stavové formulace

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -\frac{1}{2}q_2^2u_2/(x_1-s_2x_2)^{(1/2)}/T_1-1/2*(1/2*\tanh((z_1-1/2)*v)/\tanh(1/2*v)+1/2)/(1-s_1*x_1)^{(1/2)}/T_1*s_1 \\
 &= -\frac{q_2u_{2_0}}{2T_1\sqrt{x_{1_0}-s_2x_{2_0}}}-\frac{\tanh((z_{1_0}-0,5)v)+0,5}{2T_1\tanh(0,5v)}\frac{1}{2\sqrt{1-s_1x_{1_0}}}s_1 \\
 &= -\frac{q_0}{2T_1(x_{1_0}-s_2x_{2_0})}-\frac{1}{2T_1}\frac{q_0}{1-s_1x_{1_0}}s_1 = -\frac{1}{T_1}(a_{12}+a_1s_1)
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 A_{12} &= 1/2*q_2^2*u_2/(x_1-s_2*x_2)^{(1/2)}/T_1*s_2 \\
 A_{12} &= \frac{q_2u_{2_0}}{2T_1\sqrt{x_{1_0}-s_2x_{2_0}}}s_2 = \frac{q_0}{2T_1(x_{1_0}-s_2x_{2_0})}s_2 = \frac{1}{T_1}a_{12}s_2
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$A_{21} = \tag{13}$$

$$1/2 * q_2 * u_2 / (x_1 - s_2 * x_2)^{(1/2)} / T_2$$

$$A_{21} = \frac{q_2 u_2}{2T_2 \sqrt{x_1 - s_2 x_2}} = \frac{q_0}{2T_2 (x_1 - s_2 x_2)} = \frac{1}{T_2} a_{12}$$

$$A_{22} =$$

$$-1/2 * q_2 * u_2 / (x_1 - s_2 * x_2)^{(1/2)} / T_2 * s_2 - 1/2 * q_3 * (1/2 * \tanh((z_3 - 1/2) * v) / \tanh(1/2 * v) + 1/2) / x_2^{(1/2)} / T_2$$

$$A_{22} = -\frac{q_2 u_2}{2T_2 \sqrt{x_1 - s_2 x_2}} s_2 - \frac{1}{T_2} \frac{\tanh((z_3 - 0,5)v) + 0,5}{2 \tanh(0,5v)} \frac{q_3}{2\sqrt{x_3}} \quad (14)$$

$$= -\frac{q_0}{2T_2 (x_1 - s_2 x_2)} s_2 - \frac{1}{T_2} \frac{q_0}{2x_3} = -\frac{1}{T_2} (a_{12} s_2 + a_2)$$

provede potřebné symbolické diferenciální výpočty. Obdobně pro matici **B**

$$B_{11} =$$

$$1/2 * (1 - \tanh^2((z_1 - 1/2) * v)^2) * v / \tanh(1/2 * v) * (1 - s_1 * x_1)^{(1/2)} / T_1$$

$$B_{11} = \frac{(1 - \tanh^2((z_1 - 0,5)v))v}{2 \tanh(0,5v)} \frac{\sqrt{1 - s_1 x_1}}{2T_1} = b_1 \quad (15)$$

$$B_{23} =$$

$$-1/2 * q_3 * (1 - \tanh^2((z_3 - 1/2) * v)^2) * v / \tanh(1/2 * v) * x_2^{(1/2)} / T_2$$

$$B_{23} = -\frac{(1 - \tanh^2((z_3 - 0,5)v))v}{2 \tanh(0,5v)} \frac{q_3 \sqrt{x_2}}{2T_2} = b_3 \quad (16)$$

Stavové rovnice stavového popisu používající nové zkrácené označení koeficientů pak vychází následovně

$$AA =$$

$$[A_{11}, A_{12}]$$

$$[A_{21}, A_{22}]$$

$$BB =$$

$$[BB_{11}, 0]$$

$$[0, BB_{23}]$$

$$C =$$

$$0 \quad 1$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_1(t) \\ \Delta \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} (a_{12} + a_1 s_1) & \frac{1}{T_1} a_{12} s_2 \\ \frac{1}{T_2} a_{12} & -\frac{1}{T_2} (a_{12} s_2 + a_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$+ \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & -B_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z_1(t) \\ \Delta z_3(t) \end{bmatrix} \quad \Delta y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \end{bmatrix}$$

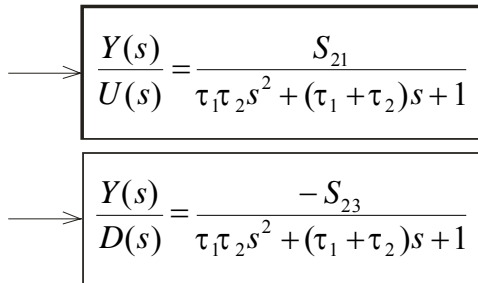
Převod stavového modelu na matici přenosů

Zápis přechodu od lineárního stavového modelu na přenosové vyjádření je v symbolickém zápisu jednoduchý a odpovídá maticovému zápisu matice přeno-

sů $G(s)$ ze stavové formulace

$$Y(s) = \{C(Is - A)^{-1}B + D\}U(s) \Rightarrow G(s) = C(Is - A)^{-1}B + D$$

$$G = [A21/(s^2-s*A22-A11*s+A11*A22-A12*A21)*BB11, (s-A11)/(s^2-s*A22-A11*s+A11*A22-A12*A21)*BB23]$$
(18)

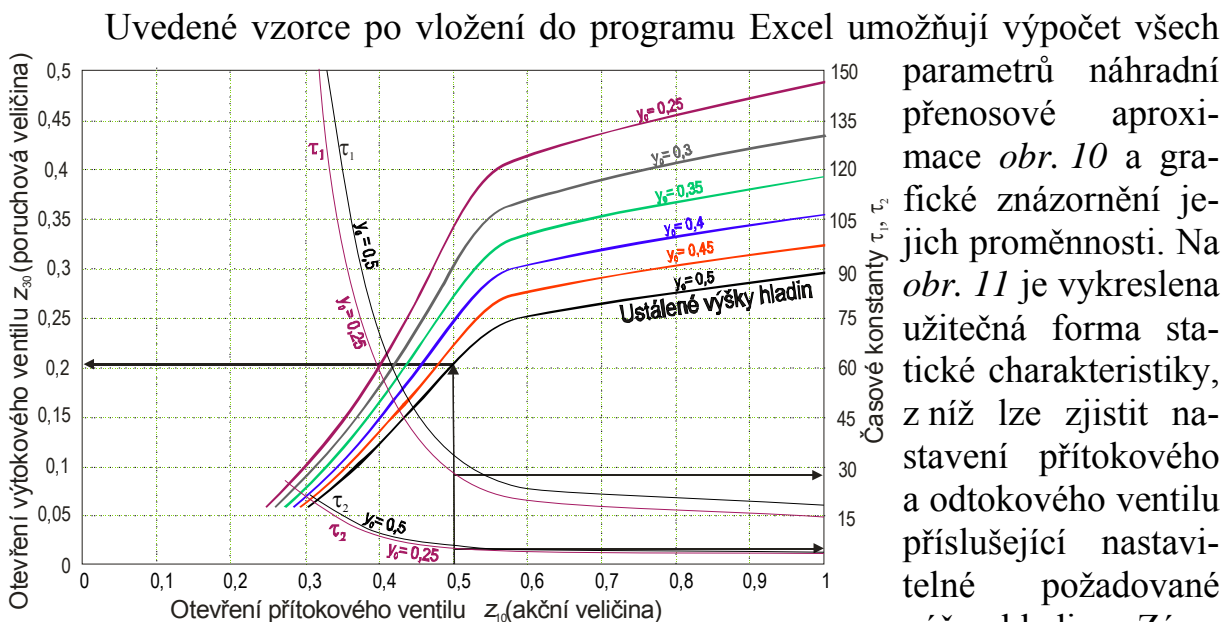


První prvek v sloupcové matici přenosů $G(s)$ reprezentuje přenos akční veličiny na regulovanou; druhý pak přenos poruchové veličiny na regulovanou. Proporcionální konstanty – citlivosti S_{21} S_{23} se určí substitucí $s = 0$ snadno realizovatelnou příkazem

Obr. 10 Náhradní přenosová reprezentace kaskády nádrží
 $\text{subs}(G,s,0) = [A21/(A11*A22-A12*A21)*BB11, -A11/(A11*A22-A12*A21)*BB23]$

Časové konstanty τ_1, τ_2 se odvodí z převrácených hodnot kořenů charakteristického polynomu, který přímo ze stavové matice vytvoří příkaz *poly*

```
poly(AA,s)=
s^2-s*A22-A11*s+A11*A22-A12*A21
-1./solve('s^2-s*A22-A11*s+A11*A22-A12*A21')
ans =
-1/(1/2*A22+1/2*A11+1/2*(A22^2-2*A11*A22+A11^2+4*A12*A21)^(1/2))
-1/(1/2*A22+1/2*A11-1/2*(A22^2-2*A11*A22+A11^2+4*A12*A21)^(1/2))
```



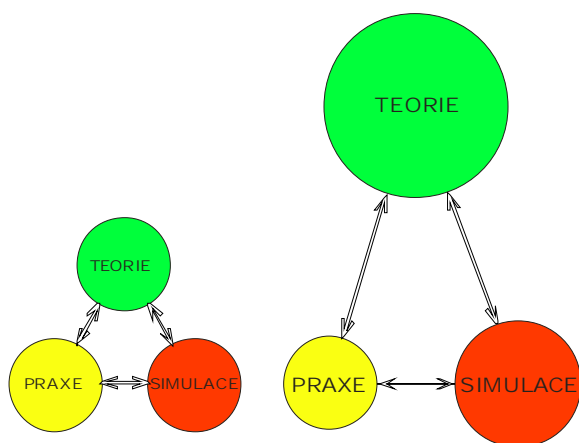
Obr. 11 Statické charakteristiky realizovatelného nastavení pracovních bodů s možností odečítat hodnoty časových konstant lineárního modelu příslušných vybranému bodu

Uvedené vzorce po vložení do programu Excel umožňují výpočet všech parametrů náhradní přenosové aproximace obr. 10 a grafické znázornění jejich proměnnosti. Na obr. 11 je vykreslena užitečná forma statické charakteristiky, z níž lze zjistit nastavení přítokového a odtokového ventilu příslušející nastavitelné požadované výšce hladiny. Zároveň obsahuje grafy hodnot časových konstant lineárního modelu vzniklého

linearizací v pracovních bodech, které se tolik nemění s výškou hladiny jako s velikostí průtoku.

6. ZÁVĚRY A NEJBLIŽŠÍ CÍLE

Modelování se stalo neodmyslitelným nástrojem současného pokroku v mnoha oborech. V oblasti technické kybernetiky se výrazně rozvinula jeho teoretická složka – matematické modelování. Paradoxně naproti tomu v běžných



Obr. 12 Cílový a současný stav vyváženosti mezi složkami podílejšími se na rozvoji automatického řízení

realizacích regulačních obvodů dochází v praxi k odmítání aplikovat i užitečné výsledky teorie. Hlavní příčinou jsou ekonomické důvody. Částečně tento nezáměr podporují i sami tvůrci nových teoretických postupů. Vedení vědeckými ambicemi nepovažují realizaci svých řešení za hlavní cíl a nevěnují proto náležitou pozornost usnadnění transferu do praxe. Nabízí se, aby úlohu zprostředkovatele plnily technické univerzity jak ve výchově specialistů, tak při organizaci popularizačních seminářů a konferencí. Simulace realizovaná jako modelování na počítači poskytuje efek-

tivní a nenákladnou formou takového působení. Počítačové nebo simulační modely reálných zařízení a procesů přitahují zájem i těch studentů, kteří jinak nesledují náročné teoretické zázemí s velkým nadšením. Inženýrské nebo operátorské simulátory určené pro využití v praxi mohou být realizovány i se vzdáleným přístupem po internetu. Současný stav disproporce a vzájemného vzdalování, zřetelný např. z porovnání vzájemných proporcí výskytu odpovídajících témat v odborných časopisech, se snaží graficky vyjádřit obr. 12. K návratu do stavu vzájemné vyváženosti mají přispět aktivity, které byly prezentovány v tomto textu. Jsou vyjádřením dlouhodobých snah o větší provázanost teorie a praxe, které se autor snaží uplatnit jak ve výzkumu, tak hlavně v pedagogické praxi.

Z prezentovaných postupů vyplývá, že:

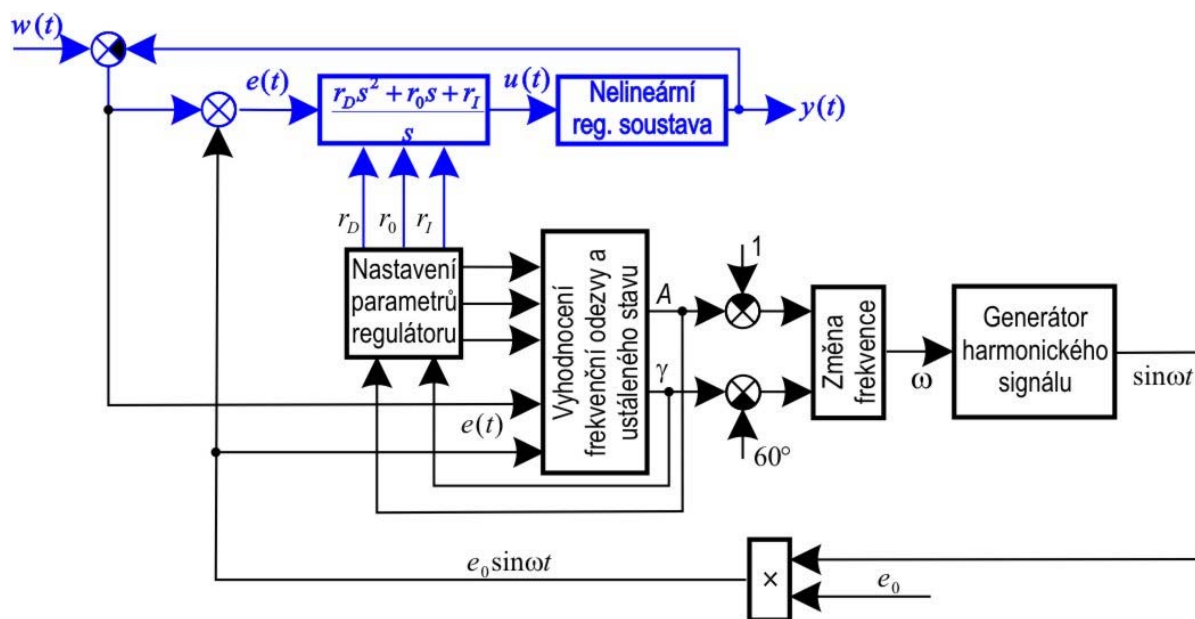
- v praxi ověřená **metodika získání náhradní přenosové aproximace** z podrobného simulačního modelu sestaveného na kompartmentovém principu je fungující cesta pro uplatnění standardních ukazatelů kvality regulace, které má smysl vyhodnocovat na přenosech nižšího řádu
- je reálný vznik chybných závěrů ze simulace funkce regulačních obvodů a soustav v důsledku nezastavení integrace při saturaci, kdy **její za-**

nedbání může být větším zdrojem odchylek mezi simulovaným a reálným chováním, než např. zanedbání běžných nelinearit

- při tvorbě simulátorů se dají úspěšně použít zjednodušené **lineární modely doplněné možností využít vypočtených nebo získaných provozních dat**, které zachycují nelineární statické charakteristiky
- pro ověřování adaptačních schopností regulačních algoritmu je správné využívat modely zařízení, u nichž proměnnost parametrů není náhodně volena, ale je výsledkem namodelovaných vzájemných fyzikálních interakcí
- praxi asi nepřesvědčí nabídka algoritmů, ve které nemá důvěru a které vyžadují další náročné teoretické studium; lépe je vytvořit takový algoritmus, který z hlediska uživatele při implementaci nic nevyžaduje další úsilí, např. získání dobrého modelu regulované soustavy.

Ačkoliv současný vývoj teorie řízení se orientuje převážně na teoretický vývoj nových algoritmů, není hledání vhodných postupů pro zkvalitnění zcela převažující PID regulace ukončeno. Průmyslová praxe, s výjimkou unikátních řešení, nemá dostatek času, prostředků a odborných kapacit pro to, aby se vývoji nových seřizovacích postupů systematicky věnovala. Avšak rozsáhlá automatizace provozů nebo zajištění bezpečné funkce složitých zařízení je ovšem spojena s potřebou nastavit regulátory v desítkách až stovkách regulačních obvodů. Dodavatelské firmy proto vítají jakékoli usnadnění seřizovací činnosti, do které se nebudou muset sami nijak aktivně zapojovat. To se postupně daří použitím algoritmů pro samoseřizování regulátorů nebo vývojem sofistikovaných algoritmů např. prediktivního řízení, pokud už budou naprogramovány tak, aby nevyžadovaly od obsluhy téměř žádné přípravné práce jako např. identifikaci modelu soustavy, hledání parametrů, jejichž volba vyžaduje porozumění funkci algoritmu, atp. Regulátory jsou zároveň jsou vybavovány funkcemi, které vylepšují provoz v reálných podmínkách. Vedle prezentované antiwind-up ochrany je to např. detekce poruchových stavů snímače regulované veličiny, pohonu, atd.

Bezprostředním výzkumným cílem autora, který je součástí programu grantového projektu GAČR 101/07/1667 „Provozně zajištěná pokročilá regulace tepelně-energetických zařízení“, je vývoj algoritmů s důrazem na bezmodelovost postupu, aplikovatelnost na reálném regulačním obvodu a alternativní kombinovaná hlediska posuzování kvality regulace. Jedním rozpracovávaných mechanismů je samoseřizování prostřednictvím softwarově generované a vyhodnocované frekvenční odezvy [28]. Princip funkce je vyznačen blokovým schématem na *obr. 13*, ve kterém je vyznačeno seřízení pouze pro dosažení požadovaného úhlu bezpečnosti ve fázi. Vzhledem k experimentálnímu způsobu zjišťování frekvenční odezvy je možné postup aplikovat i na regulované soustavy s nelineárním chováním. Další detaily pak jsou v publikacích [26], [27]. Téma je součástí doktorského programu s publikacemi doktorandů [30], [31].



Obr. 13 Samoseřizování s použitím ukazatele bezpečnosti ve fázi získaného vyhodnocením frekvenční odezvy

Dlouhodobým globálním cílem je doplnění standardního PID regulátoru podpůrnými samoseřizovacími a autodetekčními funkcemi. Navržené možnosti samoseřizování nebo odhalení zhoršené funkce senzoru regulované veličiny [34], které je v některých případech spojeno s významnými sekundárními efekty, jakými je např. snížení rizika vzniku ekologických škod, patří mezi současné osobní priority. V duchu naznačené koncepce jsou otevírány dva nové předměty pro studenty v programu Erasmus: Computer Aided Control Theory a Computer Aided Process Process Control Design, které jsou přirozeným vývojovým pokračováním tradiční Teorie automatického řízení a Inženýrských simulací řízených procesů.

-
- [26] Šulc, B. (2006): Assessment of Excited Oscillation in Controller Parameter Setting. Proceedings of the WSEAS International Conferences: ACS06, EDU06, REMOTE06, POWER06, ICOSSE06. WSEAS Press Athens, New York, Mexico City, Sofia, Madrid. ISBN 960-8457-57-2.
- [27] Šulc, B. (2006): Assessment of Excited Oscillation in Controller Parameter Setting. WSEAS Transactions on Systems and Control, 2006, vol. 1, no. 2, s. 129-134. ISSN 1991-8763.
- [28] Šulc, B. (2006): Controller Parameter Autotuning Based on Global Control Quality Assessment Useable in Non-linear Control Systems. Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conference on SIGNAL PROCESSING and COMPUTATIONAL GEOMETRY & ARTIFITIAL VISION. WSEAS Press Athens, New York, Mexico City, Sofia, Madrid 2006, s. 30-33. ISBN 960-8457-51-3.
- [30] Vrána, S. - Šulc, B. (2007): Control Quality Indicators in PID Controller Autotuning. In: Proceedings of the 5th International Conference on Computing, Communications and Control Technologies CCCT 2007. Orlando: International Community for Composites Engineering, 2007, p. 280-285. ISBN 1-934272-08-6.
- [31] Vrána, S. - Šulc, B. (2007): Multicriterion Modelles PID Controller Autotuning Keeping Desired Values of Control Quality Indicators. In: Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava. Mechanical Series. 2007, vol. LIII, no. 2, p. 167-170. ISSN 1210-0471.
- [34] Klimánek, D. – Šulc, B. (2008): Evolutionary Algorithms in Discredibility Detection. Chapter in Encyclopedia of Artificial Intelligence. Eds: J. Rabunal, J. Dorado, A.P. Sierra. IGI Global, Hershey, PA, USA. To appear May 2008. ISBN 978-1-59904-849-9.

7. LITERATURA

- [1] Šulc, B. (1979): Syntéza řízení systémů transportu vzdušiny. Kandidátská disertační práce. České vysoké učení technické, katedra automatického řízení, Praha.
- [2] Šulc, B., Rosický, M. (1983): Aproximace dynamicky složitých objektů z přechodových charakteristik. Automatizace 26 (1983), č. 12, 305-310.
- [3] Šulc, B. (1992): Teorie automatického řízení II. Spojitá a diskrétní regulace. Skriptum. Vydavatelství ČVUT v Praze.
- [4] Šulc, B. (1994): Integral Wind-up in Control and System Simulation. Proceedings of the 3rd Symposium on Advances in Control Engineering Education. Tokyo, Japan. Published by Elsevier, Oxford, United Kingdom.
- [5] Šulc, B. (1997): Integral Wind-up in Control and System Simulation. In: Control Engineering Solutions. A Practical Approach. (Albertos, P., Strietzel, R., Mort, N. - Editors). IEE Control Engineering Series Vol. 54, pp 61-76. The Institution of Electrical Engineers, London.
- [6] Neuman P., Máslo, K., Šulc, B., Jarolínek, A. (1999): Power System and Power Plant Dynamic Simulation. Preprints of the 14th IFAC World Congress. Beijing July 5-9, 1999. Edited by Han-Fu Chen, Dia-Zhan Cheng and Ji-Feng Zhang. Volume Editors: T. McAvoy, S. L. Jamsa-Jounela, H. W. Weber, S. Shioya O-7c-04-2. Elsevier Science Amsterdam 1999, pp 179-184. ISBN 0-08-043248-4.
- [7] Neuman, P., Šulc, B., Jarolínek, A. (1999): Engineering Simulator of a Coal Fired Steam Boiler Applied to Optimum Combustion Control. Preprints of the 14th IFAC World Congress. Beijing, July 5-9, 1999. Edited by Han-Fu Chen, Dia-Zhan Cheng and Ji-Feng Zhang. Volume Editors: T. McAvoy, S. L. Jamsa-Jounela, H. W. Weber, S. Shioya O-7c-03-6 Elsevier Science, Amsterdam 1999, pp 167-172. ISBN 0-08-043248-4.
- [8] Šulc, B., Neuman, P., Jan, J., A., Tauchman, M. (2000): Simulátor parního kotle. MM Průmyslové spektrum. Vogel Publishing, 2000, č. 12, s. 23-25. ISSN 1212-2572.
- [9] Šulc, B., Neuman, P. (2000): Engineering Model of Coal Fired Steam Boiler in Education, Training and Research Applications. Preprints of IFAC/IEEE Symposium on Advances in Control Education ACE 2000.

December 2000. Gold Coast, Australia.

- [10] Šulc, B., Neuman, P., Zítek, P., Dlouhý T. (2000): Non-linear Engineering Simulator of a Coal Fired Steam Boiler Applied to Fault Detection of Optimum Combustion Control.
Preprints of the 4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS 2000. Budapest.
- [11] Šulc, B., Neuman, P., Zítek, P., Vyhlídal, T. (2001): Coal Boiler Engineering Simulators Using Transfer Functions in Nonlinear Modelling.
Proceedings of the 12th IASTED International Conference Modelling, Identification and Control MIC'2001, February 19-22, 2001, Innsbruck, Austria. ACTA Press, Anaheim – Calgary – Zürich, pp 137-142. ISBN 0-88986-316-4.
- [12] Šulc, B., Jan, A. J. (2001): User Friendly Simulink Thermal Power Plant Modelling Using Object Oriented Non-linear Dynamic Model Library.
Proceedings of the 5th IASTED International Conference Power and Energy Systems PES'2001. November 17-23, 2001, Tampa, Florida, USA. ACTA Press, Anaheim – Calgary – Zürich, pp 253-256. ISBN 0-88986-317-2.
- [13] Šulc, B., Hrdlička, F., Dlouhý, T. (2002): Simulated Boiler Pressure Pulsation in Comparison with Experimental Measurement.
Preprints of the 15th IFAC World Congress Proceedings. Editors: E. F. Camacho, L. Basáñez, J. A. dela Puente. Barcelona, July 21-26, 2002. Elsevier, Oxford.
- [14] Šulc, B., Neuman, P., Hrdlička, P., (2002): Process Instrumentation Modular Models of a Thermal Power Plant for Operator Training Simulators.
Preprints of the 15th IFAC World Congress Proceedings. Editors: E. F. Camacho, L. Basáñez, J. A. dela Puente. Barcelona, July 21-26, 2002. Elsevier, Oxford.
- [15] Jan, J. A. (2002): Soft Computing in an Object Oriented Nonlinear Modelling and Control of Thermo-Fluid Dynamic Systems.
PhD Thesis. CTU in Prague, March, 2002.
- [16] Šulc, B., Vítečková, M. (2004): Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů.
Monografie ČVUT, s. 333, obr.187. Vydavatelství ČVUT. Praha 2004. ISBN 80-01-03007-5.
- [17] Šulc, B. (2005): Hybrid Reference-Model-Based Autotuned PI Level Control Testing.
CD ROM Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conference on Systems, Modelling, and Optimization SMO '05, August 17-19, 2005. Corfu Island, Greece
- [18] Šulc, B. (2005): PID regulátory - teorie a praxe.
Vyzvaná přednáška. Sborník přednášek konference ARaP 2005. Praha: FCC Public, 2005, s. 21-36. ISBN 80-86534-08-1.
- [19] Šulc, B. (2005): Autotuned PI Level Control in a Two-Tank-Cascade Model with Sliding Control Error Reference Course.
WSEAS Transactions on Circuits and Systems. Vol. 4 (2005), 9, pp. 1077-1084. WSEAS Press Athens, New York, Miami, Mexico City, Sofia, Taipei, Madrid. ISSN 1109-

2734.

- [20] Šulc, B.: Autotuned PI Level Control in a Two-Tank-Cascade Model with Sliding Control Error Reference Course. WSEAS Transactions on Circuits and Systems. 2005, vol. 4, no. 9, s. 1077-1084. ISSN 1109-2734.
- [21] Šulc, B. - Klimánek, D. (2005): Sensor Discredibility Detection via Computational Intelligence. WSEAS Transactions on Systems. 2005, vol. 4, no. 11, s. 1906-1913. ISSN 1109-2777.
- [22] Tamáš, J., Šulc, B.(2005): Automatic Control Learning Management System Based on Web Services and Semantic Web. In Preprints of the 16th World Congress of the International Federation of Automatic Control [CD-ROM]. Praha: IFAC, 2005,
- [23] Šulc, B. - Klimánek, D. (2005): Softwarová detekce diskredibility senzoru při regulaci a její ověřování u kotle na biomasu. Automatizace 48 (2005), č. 12, s. 766-780. ISSN 0005-125X.
- [24] Šulc, B. (2005): Hybrid Reference Model-Based Autotuned PI Control Testing. Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Simulation, Modelling and Optimization SMO'05 [CD-ROM]. WSEAS Press Athens, New York, Mexico City, Sofia, Madrid.
- [25] Klimánek, D., Šulc, B. (2005): Evolutionary Detection of Sensor Discredibility in Control Loops. Proceedings of the 31st Annual Conference IEEE Industrial Electronics. IEEE Computer Society Press New York, pp 136-141. ISBN 0-7803-9252-3.
- [26] Šulc, B. (2006): Assessment of Excited Oscillation in Controller Parameter Setting. Proceedings of the WSEAS International Conferences: ACS06, EDU06, REMOTE06, POWER06, ICOSSE06. WSEAS Press Athens, New York, Mexico City, Sofia, Madrid. ISBN 960-8457-57-2.
- [27] Šulc, B. (2006): Assessment of Excited Oscillation in Controller Parameter Setting WSEAS Transactions on Systems and Control, 2006, vol. 1, no. 2, s. 129-134. ISSN 1991-8763.
- [28] Šulc, B. (2006): Controller Parameter Autotuning Based on Global Control Quality Assessment Useable in Non-linear Control Systems. Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conference on SIGNAL PROCESSING and COMPUTATIONAL GEOMETRY & ARTIFITIAL VISION. WSEAS Press Athens, New York, Mexico City, Sofia, Madrid 2006, s. 30-33. ISBN 960-8457-51-3.
- [29] Hlava, J., Šulc, B.(2006): An Experimental Approach to Verification of Control Algorithms for Hybrid Continuous-Discrete Systems. WSEAS Transactions on Systems 2006, vol. 5, no. 11, s. 2645-2650. ISSN 1109-2777.
- [30] Vrána, S. - Šulc, B. (2007): Control Quality Indicators in PID Controller Autotuning.

- In: Proceedings of the 5th International Conference on Computing, Communications and Control Technologies CCCT 2007. Orlando: International Community for Composites Engineering, 2007, p. 280-285. ISBN 1-934272-08-6.
- [31] Vrána, S. - Šulc, B. (2007): Multicriterion Modelles PID Controller Autotuning Keeping Desired Values of Control Quality Indicators.
In: Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava. Mechanical Series . 2007, vol. LIII, no. 2, p. 167-170. ISSN 1210-0471.
- [32] Šulc, B. (2007): Utilization of Maximum Sensitivity in Control Quality Indication.
In: Proceedings of the 11th WSEAS International Multiconference on CSCC. Athens: WSEAS Press, 2007, s. 56-60. ISSN 1790-5117.
- [33] Šulc, B. (2007): Využitelnost modelování a regulace složitých tepelně-energetických zařízení v praxi.
Habilitationální práce předkládaná na Fakultě strojní ČVUT v Praze.
- [34] Klimánek, D. – Šulc, B. (2008):
Evolutionary Algorithms in Discredibility Detection.
Chapter in Encyclopedia of Artificial Intelligence. Eds: J. Rabunal, J. Dorado, A.P. Sierra. IGI Global, Hershey, PA, USA. To appear May 2008. ISBN 978-1-59904-849-9.
- [35] Åström, K., Hägglund, T. (1995): Controllers: Theory, Design and Tuning.
Instrument Society of America, 2nd Ed., Research Triangle Park, North Carolina, USA.
- [36] Balátě, J. (2003): Automatické řízení.
BEN – Technická literatura, Praha.
- [37] Bobál, V., Böhm, J. et al. (1999): Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů. Algoritmy a implementace.
Monografie. Vysoké učení technické v Brně, Brno.
- [38] Föllinger, O. (1990): Regelungstechnik.
6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Hüthig Buch Verlag GmbH, Heidelberg.
- [39] Poradnik inżyniera automatyka (1969). Pod redakcją W. Findeisena.
WNT, Warszawa
- [40] Balda, P., Schlegel, M., Štětina, M. (2005): Advanced Control Algorithms + Simulink Compatibility + Real-time OS = REX.
In Proceedings of the 16th IFAC World Congress. Oxford, Elsevier Science Ltd., pp.121-126.(ISBN 0-08-045108-X)

Doc. Ing. Bohumil ŠULC, CSc.

Je absolventem a pracovníkem ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky – odbor automatického řízení a inženýrské informatiky.

Během čtyřicetiletého působení na fakultě strojní vyučoval řadu předmětů. Vytvořil přednášky a cvičení k předmětům Teorie automatického řízení I a II, Inženýrské simulace řízených systémů, Regulace a řízení leteckých motorů, Automatické řízení s počítačovou podporou, Základy použití počítačů aj.

Absolvoval četné stáže a pobyty např. na Universität Duisburg, TU Magdeburg a TU Dresden, O. Forst Solingen (SRN); LPT Leningrad (SSSR); UMIST Manchester; City University London; a University of Sheffield (Velká Británie). Podílel se na vedení a koordinaci dvou evropských projektů TEMPUS a COPERNICUS.

V letech 1999 -2005 byl řešitel dílčího úkolu výzkumného záměru „Zvyšování účinnosti energetických strojů a zařízení a snižování ekologických dopadů“, na který navazuje současný výzkumný záměr MSM6840770035 Rozvoj ekologicky šetrné decentralizované energetiky. Ze tří projektů GAČR „Numerické metody návrhu optimálních regulačních systémů“ a „Hybridní koncepce v pokročilých metodách řízení a modelování tepelně-energetických procesů“(2004-6 hodnocení vynikající) „Provozně zajištěná pokročilá regulace tepelně-energetických zařízení“ (2007-) byl zodpovědným řešitelem. V komisích Grantové agentury ČR byl šest let členem do jara 2007.

Dále je členem redakční rady časopisu AUTOMATIZACE, komisí pro obhajoby doktorských disertací, diplomových prací. Jako člen technických komitétů Power Plants and Power Systems a EDCOM vrcholové mezinárodní organizace IFAC (International Federation of Automatic Control) se podílí na práci programových výborů mnoha symposií a posledních dvou světových kongresů spojenou zejména s recenzní činností. Je viceprezidentem Masarykovy akademie práce, Asociace strojních inženýrů a České společnosti pro kybernetiku a informatiku. Publikoval více než sto časopiseckých a konferenčních příspěvků a výzkumných zpráv. Je autorem monografie a řady učebních textů.

<http://bohupil.sulc.cz/>