Principia Cybernetica

Niektoré aspekty riadenia technologických a výrobných procesov ako systémov s rozloženými parametrami v inžinierskej praxi

Gabriel Hulkó, C. Belavý, K. Ondrejovič, P. Buček*, P. Élesztős, L. Bartalský**

Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky, SjF – STU v Bratislave,
Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava
*KONTILAB - Združené pracovisko VVC Železiarne Podbrezová, s.r.o.
SjF - STU v Bratislave, Kolkáreň 35, 976 87 Podbrezová
**TEN Slovakia, s.r.o. The High-Tech Company
Gazdovský rad 49/A, 931 01 Šamorín.
gabriel.hulko@stuba.sk

Abstrakt

Článok analyzuje možnosti riadenia technologických a výrobných procesov ako systémov s rozloženými parametrami v inžinierskej praxi. Uvádza koncepty rôznych prístupov. Matematickej teórie, ktorá pracuje so systémami s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom. Inžinierského prístupu na základe systémov so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom. Poukazuje na skutočnosť, že riadené veličiny technologických a výrobných procesov sú často merateľné iba vo vybraných bodoch technických zariadení a vyvstáva úloha riadenia nekonečnorozmerného výstupu na základe konečnorozmerného vstupno/výstupného kontaktu s rozloženým riadeným technickým objektom. Niektoré výsledky budú demonštrované z oblasti riadenia sekundárnej zóny chladenia zariadenia pre plynulé odlievanie ocele.

Kľúčové slová: Riadenie; technologické a výrobné procesy; systémy s rozloženými parametrami; virtuálne softvérové prostredia; pokročilé numerické modelovanie.

1 Úvod

Výskum v oblasti riadenia technologických a výrobných procesov ako systémov s rozloženými parametrami má dlhú históriu. Jeden zo zakladateľov teórie systémov s rozloženými parametrami A. G. Butkovskij [1965] v prvej svojej monografii o rozložených systémoch „Teorija optimaľnovo upravlenija sistemami s raspredeľonnymi parametrami“ venoval dlhé kapitoly popisu kontinuálnych metalurgických pecí, ich elektronickému analógovému modelovaniu a riadeniu na základe Pontriaginovho princípu maxima. Pritom sa vychádzalo z analytických riešení lineárnych parciálnych diferenciálnych rovníc. Na báze analytických riešení lineárnych diferenciálnych rovníc vyrástla matematická teória riadenia systémov s rozloženými parametrami, alebo ako sa niekedy hovorí teória riadenia parciálnych diferenciálnych rovníc: Lasiecka, I., Triggiani, R. [2000], Krstič, M., Shmyslayev, A. [2008], Zwart, H., J. [2013],... Pritom celý rad technicky orientovaných prác bolo publikovaných v minulom období na základe analytických, numerických a semi-numerických riešení opisujúcich parciálnych diferenciálnych rovníc: Christofides, P. D.[(2001], Han-Xiong Li [2009, 2010], Bentsman [2011], Meurer, T., Kugi, A. [2009, 2011],...

V poslednom desaťročí v inžinierskej praxi sa široko využívajú rôzne softvérové produkty, ktoré na základe pokročilých numerických metód riešenia nelineárnych parciálnych diferenciálnych rovníc ponúkajú možnosti pre modelovanie, analýzu a simuláciu dynamiky technologických a výrobnách procesov. Napríklad v oblasti zlievania je na trhu viac ako desať softvérových produktov pre riešenie úloh tohto typu. Pritom využívané numerické modely ponúkajú možnosti aj ku generovaniu rozložených dynamickcýh charakteristík, k návrhu systémov riadenia analyzovaných technologických a výrobných procesov ako systémov s rozloženými parametrami, Hulkó a kol. [1998-2014].

2 Systémy s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom

Vo vstupno/výstupnej relácii matematická teória riadenia systémov s rozloženými parametrami, alebo teória riadenia parciálnych diferenciálnych rovníc, vychádza z relácie

$$Y(\boldsymbol{x},t) = G(\boldsymbol{x},t) \otimes U(\boldsymbol{x},t)$$

kde $G(\boldsymbol{x},t)$ je Greenova funkcia príslušnej opisujúcej parciálnej diferenciálnej rovnice a $\otimes$ je znak konvolutórneho súčinu. Medzi rozloženou vstupnou $U(\boldsymbol{x},t)$ a výstupnou veličinou $Y(\boldsymbol{x},t)$ sa jedná vlastne o systém s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom (SRR), Obr. 3.1. Na základe štandardizácie analytických riešení lineárnych parciálnych diferenciálnych rovníc všetky okrajové úlohy lineárnych parciálnych diferenciálnych rovníc matematickej fyziky na regulárnych oboroch definície je možné upraviť do štandardných tvarov, Butkovskij [1979]. Napríklad v prípade rovnice vedenia tepla, alebo kmitania struny na intervale [0,L] dostávame:

$$\frac{\partial Y(x,t)}{\partial t} - a^2 \frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial x^2} = U(x,t)$$

$$Y(x,0) = Y_0(x),\;\; Y(0,t) = g_1(t),\;\; Y(L,t) = g_2(t)$$

$$0 \le x \le L,\;\; t \ge 0,\;\; a \ne 0$$

pri štandardizujúcej funkcii

$$R(x,t) = U(x,t) + Y_0(x)\delta(t) - a^2\delta'(x)g_1(t) + a^2\delta'(L-x)g_2(t)$$

Greenovu funkciu, resp. impulznú charakteristiku riadeného systému

$$G(x,\xi,t) = \frac{2}{L}\sum_{n=1}^{\infty} \sin\frac{n\pi x}{L} \sin\frac{n\pi\xi}{L} \exp\left[-\left(\frac{n\pi a}{L}\right)^2 t\right]$$

prípadne rozloženú prenosovú funkciu

$$S(x,\xi,s) = \frac{2}{L}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\frac{n\pi x}{L}\sin\frac{n\pi\xi}{L}}{s + \left(\frac{n\pi a}{L}\right)^2}$$

Obdobne aj pre rovnicu kmitania struny

$$\frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial x^2} = U(x,t)$$

$$Y(x,0) = Y_0(x),\;\; \frac{\partial Y}{\partial t}(x,0) = Y_1(x)$$

$$Y(0,t) = g_1(t),\;\; Y(L,t) = g_2(t)$$

$$0 \le x \le L,\;\; t \ge 0,\;\; a \ne 0$$

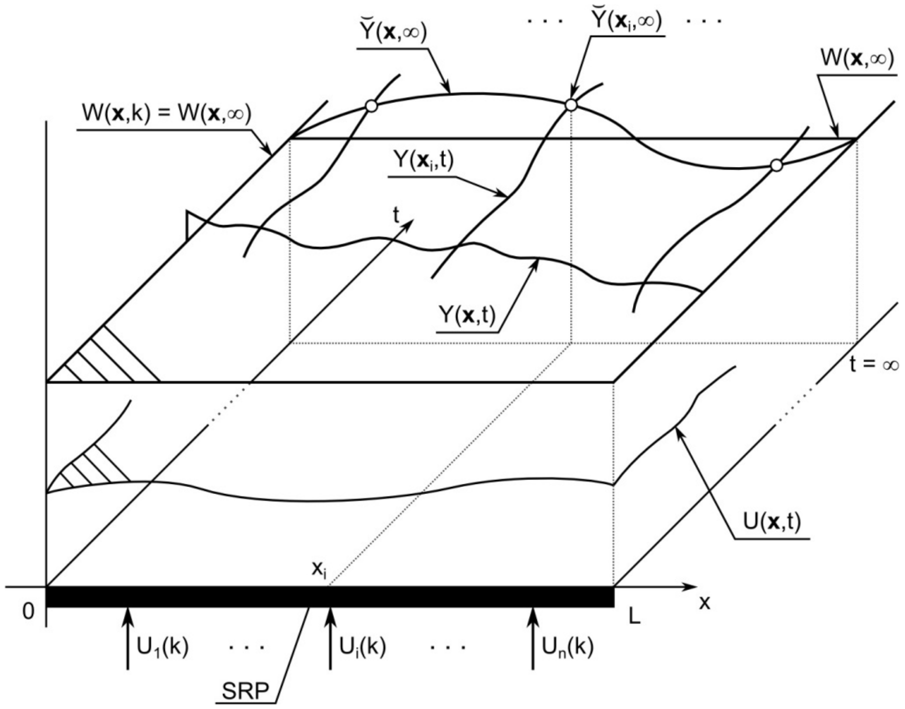
$$R(x,t) = U(x,t) + Y_0(x)\delta'(t) + Y_1(x)\delta(t) + a^2\delta'(x)g_1(t) - \\ -a^2\delta'(L-x)g_2(t)$$

$$G(x,\xi,t) = \frac{2}{\pi a}\sum_{k=1}^{\infty} \sin\frac{k\pi x}{L}\sin\frac{k\pi\xi}{L}\sin\frac{ak\pi t}{L}$$

$$S\left(x,\xi,s\right)=\frac{2}{L}\sum_{k=1}^{\infty}\sin\frac{k\pi x}{L}\sin\frac{k\pi\xi}{L}\frac{1}{s^2+\left(\frac{ak\pi}{L}\right)^2}$$

atď.

Na základe analytických riešení lineárnych parciálnych diferenciálnych rovníc na regulárnych oboroch definície sú formulované a riešené rôzne typy úloh riadenia. Napríklad nájsť za špecifikovaných podmienok $U(\boldsymbol{x},t)$ tak, aby v ustálenom stave výstupná veličina $Y\left(\boldsymbol{x},t\right)$ riadeného systému s rozloženými parametrami – SRP predstavila najlepšiu aproximáciu $\breve{Y}\left(\boldsymbol{x},t\right)$ žiadanej veličiny $W\left(\boldsymbol{x},\infty\right)$, Obr. 2.1. Pritom pre prehľadnosť sa uvažuje rozloženie riadenej sústavy na intervale [0,L].



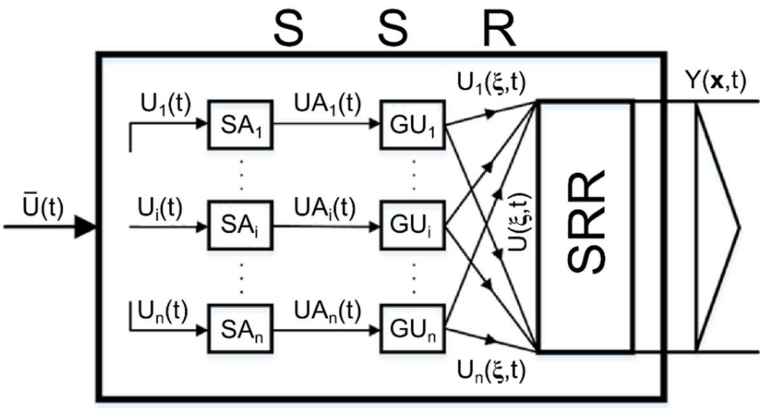
Obr. 2.1 Formulácie úloh riadenia systému s rozloženými parametrami.

Po úspešnom matematickom riešení tejto úlohy ale zostáva problém technickej realizácie nekonečnorozmernej optimálnej rozloženej vstupnej veličiny $\breve{U}(\boldsymbol{x},t)$ v bežných inžinierskych podmienkach,…

Preto na pracovisku autorov bol navrhnutý a rozpracovaný inžiniersky prístup k riadeniu systémov s rozloženými parametrami na základe systémov so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom, kde výsledkom syntézy riadenia - napríklad k uvádzanej úlohe riadenia sa získavajú postupnosti akčných veličín $\left\{\breve{U}_i(k)\right\}_i$, ktoré sú realizovateľné bežnými prostriedkami riadiacej techniky k optimálnej aproximácii $W(\boldsymbol{x},\infty)$ riadenou veličinou $\breve{Y}(\boldsymbol{x},\infty)$. Hulkó a kol. [1989].

3 Systémy so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom

Keď sa pripájajú aktuátory $\{SA_i\}_i$ a generátory rozložených vstupných veličín $\{GU_i\}_i$ k systému s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom - SRR - dostávame systém so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom – SSR, Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Štruktúra systému so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom – SSR.

Vstupno/výstupne to znamená reláciu

$$Y(\boldsymbol{x},t)=\sum_{1}^{n}G_i(\boldsymbol{x},t)\otimes U_i(t)$$

kde potrebné čiastkové Greenové funkcie $\{G_i(\boldsymbol{x},t)\}_i$ určíme na základe analytických riešení okrajových úloh matematickej fyziky prislúchajúce jednotlivým blokom schémy na Obr. 3.1, $\{GU_i \to G_i(\xi,\tau_1,\tau_2)\}_i$ a $\{SA_i \to gA_i(\tau_2,\tau)\}_i$

$$\left\{G_i(x,t,\tau)=\int_0^t\int_0^t\int_0^L G(x,\xi,t,\tau_1)G_i(\xi,\tau_1,\tau_2)\,gA_i(\tau_2,\tau)\,d\xi\,d\tau_1\,d\tau_2\right\}_i$$

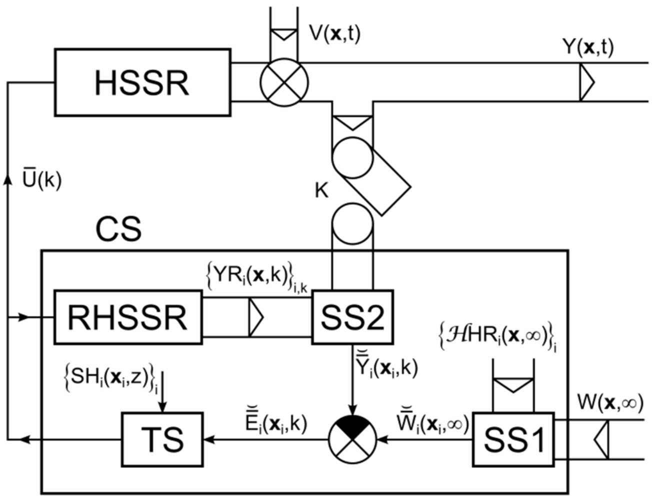
Z pohľadu inžinierskej praxe je ale dôležitejšie, že tieto Greenove funkcie v podobe rozložených impulzných charakteristík $\left\{\mathcal{G}H_i\left(\boldsymbol{x},k\right)\right\}_{i=1,\mathrm{n}}$ je možné generovať cez rozložené prechodové charakteristiky $\left\{\mathcal{H}H_i\left(\boldsymbol{x},k\right)\right\}_{i=1,\mathrm{n}}$ počítané na základe validovaných dynamických modelov technologických a výrobných procesov v rámci virtuálnych softvérových prostredí zostavovaných k numerickej analýze dynamiky týchto procesov. Potom dostávame vstupno/výstupnú reprezentáciu

$$Y(\boldsymbol{x},k)=\sum_{1}^{n}\mathcal{G}H_i(\boldsymbol{x},k)\oplus U_i(k)$$

kde $\oplus$ je znak konvolutórneho súčtu, ktorá predstavuje diskrétny systém so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom s tvarovačmi nultého rádu - HSSR.

4 Syntéza riadenia

K syntéze riadenia HSSR je navrhnutý spätnoväzbový riadiaci obvodov s rozloženými parametrami, Obr. 4.1, kde $\bar{U}\left(k\right)=\left\{U_i\left(k\right)\right\}_i$ je vektor akčných veličín, $Y\left(\boldsymbol{x},t\right)=Y\left(x,\mathrm{y},\mathrm{z},t\right)$ je riadená, $W\left(\boldsymbol{x},\infty\right)$ riadiaca a $V\left(\boldsymbol{x},t\right)$ je poruchová veličina. Riadiaci systém CS je zostavený z charakteristík HSSR pre riešenie priestorovej a časovej syntézy riadenia SS1, SS2, TS a RHSSR. Zložky odchýlky riadenia v časovej závislosti sú dané vzťahmi $\left\{\breve{E}_i\left(\boldsymbol{x}_i,k\right)=\breve{W}_i\left(\boldsymbol{x}_i,k\right)-\breve{Y}_i\left(\boldsymbol{x}_i,k\right)\right\}_{i=1,\mathrm{n}}$. Potom pri riešení úlohy naznačenej na Obr. 2.1 k žiadanej veličine $W\left(\boldsymbol{x},\infty\right)$ sa generuje postupnosť akčných veličín $\left\{\breve{U}_i\left(k\right)\right\}_i$, ktorá zabezpečí optimálnu aproximáciu žiadanej veličiny v ustálenom stave $\breve{Y}\left(\boldsymbol{x},\infty\right)$.



Obr. 4.1 Riadenie lineárneho diskrétneho systému so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom.

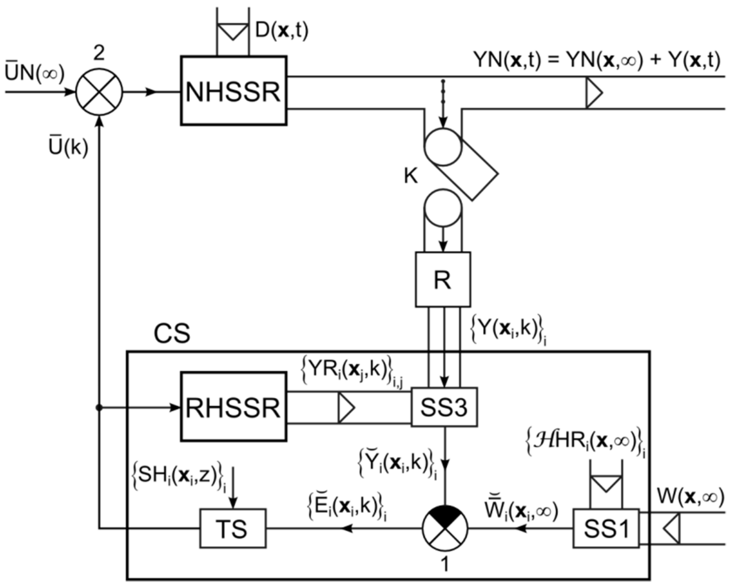
Pri inžinierskej aplikácii týchto výsledkov sa počíta s rozloženou riadenou veličinou na celom obore definície. Sú to napríklad prípady riadenia teplotných polí pri niektorých druhoch zvárania, riadenie procesu hasenia lesných požiarov, atď.

5 Riadenie technologických a výrobných procesov

Vo všeobecnosti činnosť technologických a výrobných procesov ako systémov s rozloženými parametrami veľmi často sa uskutočňuje v zadaných ustálených prevádzkových režimoch alebo medzi zadanými ustálenými prevádzkovými režimami. Z pohľadu riadenia to znamená úlohy riadenia v linearizovaných okoliach týchto ustálených prevádzkových režimov, respektíve riadenie cez linearizované segmenty nelineárnej dynamiky prechodov medzi zadanými ustálenými prevádzkovými režimami. Pri riadení technologických a výrobných procesov väčšinou je potrebné ďalej počítať aj so skutočnosťou, že tieto sú konštrukčne usporiadané ako uzavreté zariadenia a je možné merať riadenú veličinu iba vo vybraných bodoch zariadenia. Potom pre riešenie úloh riadenia je k dispozícii linearizovaný konečnorozmerný vstupno/výstupný model riadeného systému v tvare

$$\overline{Y}(\boldsymbol{x}_i,k)=\sum_{1}^{n}\mathcal{G}H_i(\boldsymbol{x}_i,k)\oplus U_i(k)$$

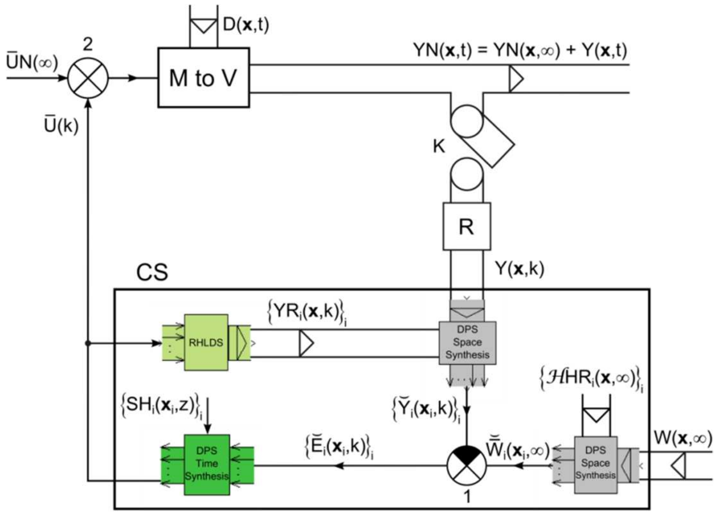
kde $\overline{Y}\left(\boldsymbol{x}_i,k\right)=\left\{Y\left(\boldsymbol{x}_i,k\right)\right\}_i^T=\left\{Y\left(\boldsymbol{x}_1,k\right),...,Y\left(\boldsymbol{x}_n,k\right)\right\}^T$ a validovaný numerický model riadeného systému ako systém s rozloženými parametrami, Obr. 5.1. Riadený technologický alebo výrobný process sa uvažuje ako nelineárny systém so sústredeným vstupom rozloženým výstupom – NHSSR. Zvolený ustálený prevádzkový režim je daný ustálenými hodnotami $\bar{U}N(\infty)$ a $YN(\boldsymbol{x},\infty)$. Vzťah medzi $\bar{U}(k)$ a $Y(\boldsymbol{x},t)$ predstavuje linearizovanú časť dynamiky – HSSR. Meranie riadenej veličiny sa uskutočňuje vo zvolených bodoch oboru definície $\{\boldsymbol{x}_i\}_{i=1,n}$ a na výstupe bloku R dostávame vektor $\bar{Y}(\boldsymbol{x}_i,k) = \bar{Y}N(\boldsymbol{x}_i,k) - \bar{Y}N(\boldsymbol{x}_i,\infty)$. Pri zmenách žiadanej veličiny v linearizovanom okolí zvoleného ustáleného pracovného režimu, alebo medzi zadanými ustálenými režimami po segmentovanej dynamike nelineárneho prechodu na linearizované segmenty, riadiaci systém generuje akčné veličiny $\bar{U}(k)$, resp. $\{\bar{U}_m(k)\}_m$ pre jednotlivé segmenty, pôsobením ktorých v ustálenom stave na výstupe dostávame $YN(\boldsymbol{x},t)_{t\to\infty} = YN(\boldsymbol{x},\infty) + \breve{Y}(\boldsymbol{x},\infty)$, kde $\breve{Y}(\boldsymbol{x},\infty)$ predstavuje najlepšiu aproximáciu žiadanej veličiny $W(\boldsymbol{x},\infty)$. Obdobné relácie platia aj v prípade pôsobenia rozložených poruchových veličín $D(\boldsymbol{x},t)$.



Obr. 5.1 Riadenie technologického alebo výrobného procesu ako nelineárneho systému s rozloženými parametrami.

Riadenie sa uskutočňuje na nekonečnorozmernej úrovni $Y(\boldsymbol{x},t)$ pri konečnorozmernom vstupno/výstupnom kontakte s riadeným objektom $\{U_i(k)\}_i$ / $\{Y(\boldsymbol{x}_i,k)\}_i$. Nekonečnorozmerná podstata riadeného systému je reprezentovaná v rozložených dynamických charakteristikách riadeného objektu v riadiacom systéme (CS) $\{\mathcal{H}HR_i(\boldsymbol{x},\infty)\}_i$ a $\{YR_i(\boldsymbol{x}_j,k)\}_{i,j}$. Znamená to zvýšené nároky na adekvátnosť validovaných numerických modelov riadených sústav pomocou ktorých sú generované tieto rozložené dynamické charakteristiky. V prípade merania rozloženej riadenej veličiny na celom obore definície riadenej sústavy sa uvažuje blok SS2 namiesto bloku blok SS3, zo schémy v Obr. 4.1. V systéme riadenia s meraním riadenej veličiny na celom obore definície ako výstupná veličina sa uvažuje v bloku R: $Y(\boldsymbol{x},k) = YN(\boldsymbol{x},k) - YN(\boldsymbol{x},\infty)$.

Pre podporu návrhu a optimalizácie systému riadenia je zostavený vývojový systém, Fig. 5.2, využitím blokov z DPS Blockset for MATLAB & Simulink, Hulkó a kol. [2003-doteraz]. Blok DPS Space Synthesis rieši syntézu riadenia v priestorovej závislosti, DPS Time Synthesis rieši syntézu riadenia v časovej závislosti a blok RHLDS generuje redukované čiastkové výstupy riadeného systému. Blok MtoV predstavuje kosimuláciu – spoluprácu softvérových produktov MATLAB & Simulink a virtuálneho softvérového prostredia využívaného k numerickej analýze dynamiky riadeného technologického alebo výrobného procesu.



Obr. 5.2 Vývojový systém pre návrh a optimalizáciu systému riadenia s rozloženými parametrami.

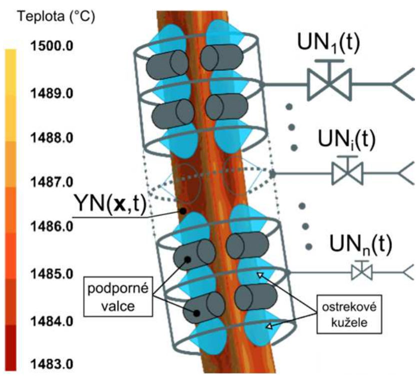
Vývojový systém slúži na generovanie ustálených hodnôt vstupných veličín $\overline{UN}(\infty)$ a príslušných ustálených priebehov rozložených výstupov $YN(\boldsymbol{x},\infty)$ pre zadané ustálené prevádzkové režimy. Ďalej slúži pre vyšetrenie oblastí linearizácie a segmentácie dynamiky na linearizované úseky. Umožňuje vyhodnotiť kvalitu riadenia v priestorovej ako aj v časovej závislosti, prípadne optimalizovať rozmiestnenie akčných veličín a výber alternatív syntézy riadenia v časovej závislosti pomocou riadiacich SISO alebo MIMO obvodov. Optimalizovaný riadiaci systém CS sa potom pripojí k riadenému technologickému alebo výrobnému procesu ako riadenému systému, Fig. 5.1. Nakoniec optimalizované vývojové systémy môžu slúžiť aj pre podporu práce operačných personálov zariadení pre technologické a výrobné procesy. Hulkó a kol. [2014].

6 Riadenie teplotného poľa sekundára pri plynulom odlievaní ocele

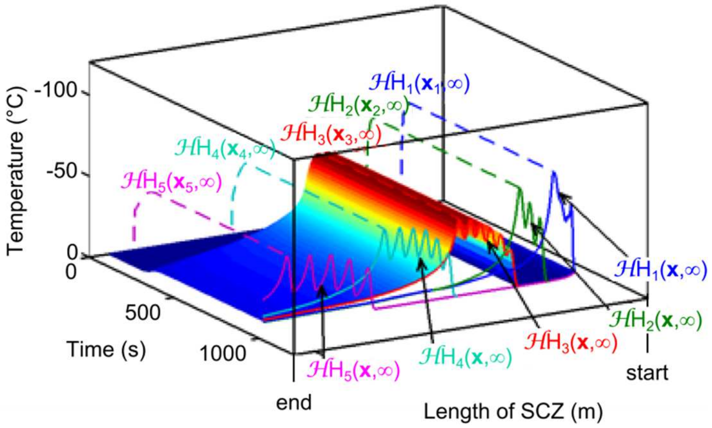
Plynulé odlievanie ocele je jednou z fundamentálnych výrobných technológií našej civilizácie, touto technológiou sa ročne vo svete vyrobí viac ako 1,5 miliardy ton oceľových polotovarov (kontiodliatkov). Jedná sa pritom o energeticky náročnú technológiu s významnými dopadmi na životné prostredie a zároveň kvalita takto vyrábaných polotovarov do značnej miery ovplyvňuje kvalitu veľkej časti svetovej produkcie strojov a zariadení. Kvalitu polotovarov zásadným spôsobom určuje proces solidifikácie v sekundárnej zóne chladenia a prislúchajúci teplotný profil polotovarov $YN\left(\boldsymbol{x},t\right)$, ktoré sú obyčajne chladené privádzanou chladiacou vodou $\left\{UN_i\left(t\right)\right\}_i$ cez jednotlivé sekcie chladenia, Fig. 6.1. Jedná sa o nelineárny systém so sústredeným vstupom s rozloženým výstupom - NHSSR. Úlohy riadenia pri pôsobení porúch v linearizovanom okolí zvoleného ustáleného prevádzkového režimu a pri prechode medzi zadanými ustálenými prevádzkovými režimami pri segmentácii nelineárnej dynamiky prechodu na linearizované segmenty boli riešené na spoločnom pracovisku KONTILAB pracoviska autorov a Výskumno-vývojového centra Železiarne Podbrezová, s.r.o.

Pre zvolený ustálený prevádzkový režim daný ustálenými prietokmi chladiacej vody cez päť sekcií chladenia $\left\{UN_i\left(\infty\right)\right\}_{i=1,5}$ a príslušným teplotným poľom $YN\left(\boldsymbol{x},\infty\right)$ pomocou validovaného numerického modelu boli generované rozložené prechodové charaktersitiky, Obr. 6.2.

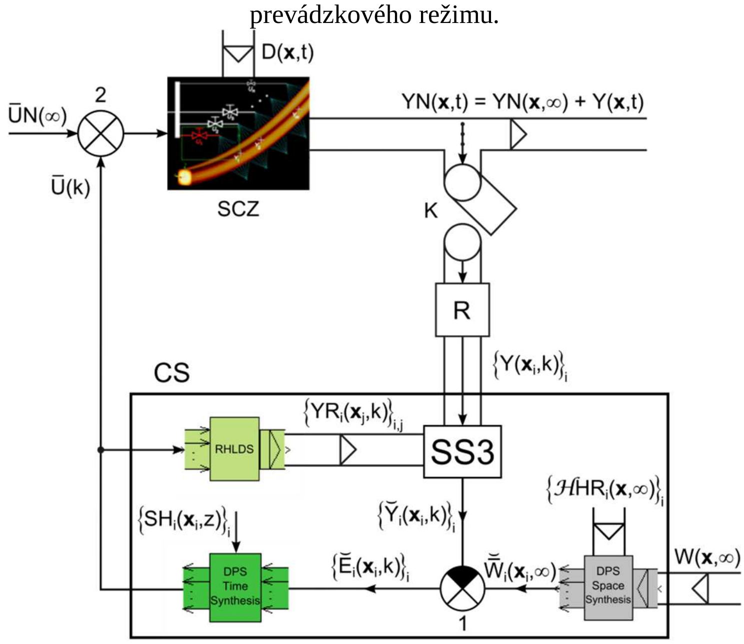
Vychádzajúc z týchto charakteristík sa zostaví a optimalizuje pomocou vývojového systému (Fig. 5.2) riadiaci obvod s rozloženými parametrami, Obr. 6.3, kde dynamika sekundárnej zóny chladenia – SCZ bola simulovaná v režime kosimulácie spolupráce softvérového produktu ProCAST a MATLAB & Simulink. Pritom činnosť riadiaceho systému bola zabezpečená blokmi softvérového produktu ústavu DPS Blockset for MATLAB & Simulink – partnerského produktu spoločnosti The MathWorks Hulkó a kol. (2003-doteraz).



Obr. 6.1 Funkčná schéma sekundárnej zóny chladenia (SCZ) zariadenia pre plynulé odlievanie ocele.

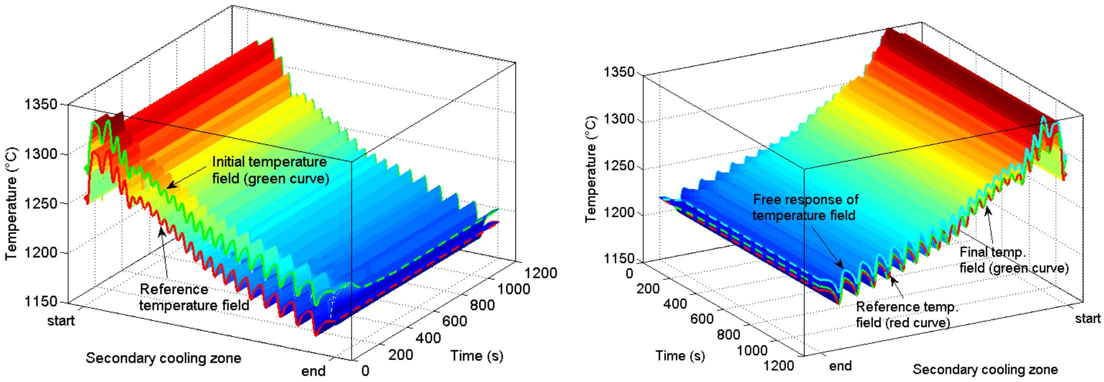


Obr. 6.2 Rozložené prechodové charakteristiky $\left\{\mathcal{H}H_i\left(\boldsymbol{x},k\right)\right\}_{i=1,5}$ a parciálne prechodové charakteristiky $\left\{\mathcal{H}H_i\left(\boldsymbol{x}_i,k\right)\right\}_{i=1,5}$ v okolí zvoleného ustáleného prevádzkového režimu.



Obr. 6.3 Systém riadenia teplotného poľa polotovarov v sekundárnej zóne chladenia (SCZ) zariadenia pre plynulé odlievanie ocele.

V Obr. 6.4 a) je znázornený začiatok procesu riadenia, kde vzhľadom k Reference temperature field ($YN\left(\boldsymbol{x},\infty\right)$) je prítomná poruchová veličina $D\left(\boldsymbol{x},t\right) \neq 0$ (green curve), ktorá vznikla zvýšením rýchlosti liatia. Výsledok procesu riadenia je v Obr. 6.4b).



a) b)

Obr. 6.4 Eliminácia rozloženej poruchy pri zvýšení rýchlosti liatia.

7 Záver

Vo všeobecnosti úlohy syntézy riadenia v teórii riadenia sa opierajú o matematické modely riadených objektov. V oblasti systémov so sústredenými parametrami tento predpoklad je viac-menej uspokojivo zbezpečený. V oblasti systémov s rozloženými parametrami analytické riešenia lineárnych parciálnych diferenciálnych rovníc na regulárnych oborch definície ako modelov technologických a výrobných procesov dlhé roky nedávali dostatočne adekvátny základ k riešeniu inžninierskych úloh. Až posledné desaťročie so širokým využívaním virtuálnych softvérových prostredí k numerickej analýze dynamiky technologických a výrobných procesov prinieslo výraznejšie zmeny. Virtuálne softvérové prostredia totiž využívajú pokročilé numerické modely k riešeniu opisujúcich nelineárnych parciálnych diferenciálnych rovníc. Tým vzniká možnosť ku kvatifikácii zvolených ustálených prevádzkových režimov, k linearizácii dynamiky v okolí týchto ustálených režimov ako aj k segmentácii dynamiky nelineárnych prechodov medzi zadanými ustálenými prevádzkovými režimami na linearizované úseky. Potom je možné zostavovať systémy riadenia, ktorých zložitosť je na úrovni zložitosti úloh z oblasti riadenia systémov so sústredenými parametrami.

V inžinierskej komunite je zafixovaná predstava, že systémy s rozloženými parametrami sú príliš zložité a prinášajú príliš málo pre prax. Pokročilé numerické modely virtuálnych softvérových prostredí budované pre analýzu dynamiky technologických a výrobných procesov menia situáciu. Prinášajú možnosť koncipovať pomerne jednoduché systémy riadenia, ktoré ponúkajú zlepšenie kvality riadenia v priestorovej ako aj v časovej závislosti technologických a výrobných procesov ako systémov s rozloženými parametrami.

Poďakovanie. Autori ďakujú za podporu Vedeckej grantovej agentúre Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR – VEGA v rámci projektu *VEGA-1/0138/11*

„Riadenie dynamických systémov zadávaných numerickými štruktúrami ako systémov s rozloženými parametrami“ a Agentúre na podporu výskumu a vývoja – APVV v rámci projektov *APVV-0160-07 „Pokročilé metódy modelovania, riadenia a návrhu mechatronických systémov ako sústav so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom*“, *APVV-0131-10 „High-tech riešenia pre technologické procesy a mechatronické komponenty ako riadené systémy s rozloženými parametrami a APVV-14-0244 „Vývoj softvérovej podpory využitím fyzikálnej simulácie pre optimalizáciu procesov plynulého odlievania ocele pre Železiarne Podbrezová, a. s.“.* Ďalej Agentúre Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR pre štrukturálne fondy EÚ – ASFEU v rámci projektu *ITMS-26240220072 „Kompetenčné centrum inteligentných technológií pre elektronizáciu a informatizáciu systémov a služieb“* a projektu *ITMS-26240220084 „Univerzitný vedecký park STU v Bratislave“.*

Literatúra

[1] BUTKOVSKIJ, A., G. 1965. Teorija optimaľnovo upravlenija sistemami s raspredeľonnymi parametrami. Nauka, Moskva.

[2] BUTKOVSKIJ, A., G. 1979. Charakteristiky sistem s raspredeljonnymi parametrami. Nauka, Moskva.

[3] BENTSMAN, J. et al. 2011. Hybrid Control of Continuous Casting for Whale and Crack Prevention and Resonance Control in Mold Oscillation System. NSF GRANT # DMI-0900138. NSF PROGRAM NAME: Control Systems Program. *Proceedings of NSF Engineering Research and Innovation Conference, Atlanta, Georgia.*

[4] CHRISTOFIDES, P. D. 2001. Control of nonlinear distributed process systems: recent developments and challenges, *AIChE Journal* , vol. 47 (3), pp. 514–518.

[5] HULKÓ, G. a kol. 1998. Modelovanie, riadenie a návrh systémov s rozloženými parametrami s demonštráciami v prostredí MATLAB. Vydavateľstvo STU v Bratislave, pp. 266. ISBN 80-227-1052-0.

[6] HULKÓ, G. et al. 1998. Modeling, Control and Design of Distributed Parameter Systems with Demonstrations in MATLAB. Publishing House of STU, Bratislava, pp. 265. ISBN 80-227-1083-0.

[7] HULKÓ, G. et al. 2003 - present. Distributed Parameter Systems Blockset for MATLAB & Simulink (DPS Blockset for MATLAB & Simulink). *Program CONNECTIONS of The MathWorks – third-party partner produkt spoločnosti The MathWork.* 2003 - 2013, Bratislava – Natick.

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

[9] HULKÓ, G., BELAVÝ, C., BUČEK, P., ONDREJKOVIČ, K., ZAJÍČEK, P. 2009. Engineering methods and software support for control of distributed parameter systems. *Proceedings of the 7th Asian Control Conference*, Hong-Kong.

[10] HULKÓ, G., ROHÁĽ-ILKIV, B., NOGA, P., LIPÁR, S. 2012. Control of Energy Systems as Distributed Parameter Systems with Software Support by Virtual

Software Environments. *Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control*, Maui, HI, pp. 2382-2387.
[11] HULKÓ, G. et al. 2013. Modelling and control of extruder barrel temperature field. In Control of Systems Governed by Partial Differential Equations, Volume 1, *1st IFAC Workshop on Control of Systems Governed by Partial Differential Equations*. Paris, France, IFAC, pp. 191-196. ISBN 978-3-902823-54-0.
[12] HULKÓ, G. a kol. 2014. Riadenie technologických a výrobných procesov ako systémov s rozloženými parametrami s podporou virtuálnych softvérových prostredí. Vydavateľstvo STU v Bratislave, pp. 283. ISBN 978-80-227-4289-4.
[13] HULKÓ, G. et al. 2014. Control of technology and production processes as distributed parameter systems supported by advanced numerical modeling. Publishing House of STU, Bratislava, pp. 299. ISBN 978-80-227-4290-0.
[14] HAN-XIONG Li, CHENKUN Qi, YONGGUANG, Yu. 2009. A spatio-temporal Volterra modeling approach for a class of distributed industrial processes. *Journal of Process Control*. Vol. 19, pp. 1126-1142.
[15] HAN-XIONG Li , CHENKUN Qi. 2010. Modeling of distributed parameter systems for applications - A synthesized review from time–space separation. *Journal of Process Control*. Vol. 20, pp. 891-901. KRSTIC, M., SHMYSLAYEV, A. 2008. Boundary control of PDEs - A Course on Backstepping Design, SIAM.
[16] LASIECKA, I., TRIGGIANI, R. 2000. Control Theory for Partial Differential Equations. Vol. I.-III. Cambridge University Press.
[17] MEURER, T., KUGI, A. 2009. Trajectory planning for boundary controlled parabolic PDEs with varying parameters on higher-dimensional spatial domains**.** *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 54, Issue 8, pp. 1854-1868.
[18] MEURER, T., KUGI, A. 2011. Tracking control design for a wave equation with dynamic boundary conditions modeling a piezoelectric stack actuator. *International Journal of Robust and Nonlinear Control.* Vol. 21. Issue 5, pp. 542-562.
[19] ONDREJKOVIČ, K., BUČEK, P, René PYSZKO , R., HULKÓ, G. 2011. Control of Continuous Casting Processes as Distributed Parameter Systems. *Proceedings of the VII. European Continuous Casting Conference.* Düsseldorf.
[20] ONDREJKOVIČ, K. 2012. Modeling and control of continuous casting processes as distributed parameter systems. PhD thesis. Slovak University of Technology in Bratislava. (in Slovak)
[21] ONDREJKOVIČ, K., BUČEK, P., NOGA, P., TKÁČ, L, HULKÓ, G. 2013. Modeling and Control of Temperature Field of the Secondary Cooling Zone in Continuous Casting of Steel as Distributed Parameter System. *Preprints of the 2013 IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control,* Saint Petersburg.
[22] ProCAST. Virtual Product Engineering software and services, [online]. Available at: http://www.esi-goup.com .
[23] ZWART, H., J. 2013. Geometric Theory for Infinite Dimensional Systems (Lecture Notes in Control and Information Sciences). Springer , New Jersey.