

VYUŽITIE KOSIMULÁCIE PRI RIADENÍ PREDOHREVVU ZLIEVARENSKEJ FORMY AKO SYSTÉMU S ROZLOŽENÝMI PARAMETRAMI

Lukáš Bartalský, Michal Bartko, Cyril Belavý, Gabriel Hulkó

Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky SjF STU

Abstrakt

Predkladaný článok rieši problematiku riadenia predohrevu zlievarenskej formy ako systému s rozloženými parametrami. Úvodom je predstavená zlievarenská forma a následne je uvádzaný koncept systémov s rozloženými parametrami. Následne je opísaný model vytvorený v COMSOL Multiphysics. Po vykonanej identifikácii je opísaný prípravný obvod na nastavenie parametrov regulátorov v prostredí MATLAB & Simulink s nadstavbovým produktom DPS Blockset pre MATLAB & Simulink. Na záver článku je opísaná kosimulácia programov COMSOL Multiphysics a MATLAB & Simulink a zhodnotenie dosiahnutých výsledkov.

1 Systémy s rozloženými parametrami, dynamika riadeného systému

Matematické opisy technologických a výrobných procesov typu kontinua ako reálnych systémov s rozloženými parametrami (SRP) v linearizovaných okoliach zadaných ustálených pracovných režimov dávajú lineárne parciálne diferenciálne rovnice (PDR). Vo vstupno-výstupnej relácii sú to systémy s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom (SRR), Obr. 5.



Obr. 1. Systém s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom.

V prípade predohrevu formy akčné veličiny sú dané ako prúdy jednotlivých zón ohrevu a riadenou veličinou je teplotné pole formy. Jedná sa vo všeobecnosti o systém so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom, ktorý ako riadený systém diskretného riadiaceho obvodu uvažujme v ďalšom ako diskretný systém so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom, HSSR, so sústredenými vstupnými veličinami $\{U_i(k)\}_{i=1,5}$ a riadenou rozloženou výstupnou veličinou $Y(x, t) = Y(x, y, z, t)$, Obr. 2.



Obr. 2. Diskretný systém so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom s tvarovačmi nultého rádu.

Pri pôsobení diskretných jednotkových skokových zmien $\{U_i(k) = 1(k)\}_{i=1,5}$ dostávame diskretné rozložené prechodové charakteristiky $\{\mathcal{H}H_i(x, k)\}_{i=1,5}$. Odčítaním posunutých prechodových charakteristík dostávame rozložené impulzné charakteristiky $\{\mathcal{G}H_i(x, k) = \mathcal{H}H_i(x, k) - \mathcal{H}H_i(x, k - 1)\}_{i=1,5}$. Potom

$$Y(x, k) = \sum_1^5 Y_i(x, k) = \sum_1^5 \mathcal{G}H_i(x, k) \oplus U_i(k) \quad (1)$$

kde $\{Y_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}$ sú čiastkové rozložené výstupné veličiny HSSR a \oplus je znak diskkrétnej konvolúcie.

V ustálenom stave

$$Y(\mathbf{x}, \infty) = \sum_1^5 Y_i(\mathbf{x}, \infty) = \sum_1^5 \mathcal{H}H_i(\mathbf{x}, \infty)U_i(\infty) \quad (2)$$

Na obore definície riadenej sústavy vyberme body, kde jednotlivé rozložené prechodové charakteristiky v ustálenom stave dosahujú svoje maximálne hodnoty $\{\mathcal{H}H_i(\mathbf{x}, \infty)\}_{i=1,5}$. Potom

$$\left\{ Y(\mathbf{x}, k) = \sum_1^5 Y_i(\mathbf{x}, k) = \sum_1^5 \mathcal{G}H_i(\mathbf{x}, k) \oplus U_i(k) \right\}_i \quad (3)$$

Pre účely riadenia zavedme nasledovné časové a priestorové charakteristiky riadeného systému:

Časové charakteristiky:

$$\{\mathcal{H}H_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}, \{\mathcal{H}H_i(\mathbf{x}, \infty)\}_{i=1,5}, \{\mathcal{G}H_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}$$

Priestorové charakteristiky:

$$\{\mathcal{H}H_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}, \{\mathcal{H}H_i(\mathbf{x}, \infty)\}_{i=1,5}, \{\mathcal{G}H_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}$$

Často je výhodné pre charakteristiku dynamiky riadeného systému k parciálnym priebehom rozložených prechodových charakteristík $\{\mathcal{H}H_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}$ priradiť prenosové funkcie $\{SH_i(\mathbf{x}, z)\}_{i=1,5}$. V priestorovej závislosti pre charakteristiku dynamiky ďalej zavedme redukované dynamické charakteristiky $\{\mathcal{G}HR_i(\mathbf{x}, k) = \mathcal{G}H_i(\mathbf{x}, k) / \mathcal{G}H_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}$ pre $\{\mathcal{G}H_i(\mathbf{x}, k) \neq 0\}_{i=1,5}$.

Obdobne ďalej zavedieme redukované priebehy čiastkových rozložených výstupných veličín $\{YR_i(\mathbf{x}, k) = Y_i(\mathbf{x}, k) / Y_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}$ pre $\{Y_i(\mathbf{x}, k) \neq 0\}_{i=1,5}$ tak

$$Y(\mathbf{x}, k) = \sum_1^5 Y_i(\mathbf{x}, k) = \sum_i \mathcal{G}H_i(\mathbf{x}, k) \oplus U_i(k) = \sum_1^5 Y_i(\mathbf{x}, k) YR_i(\mathbf{x}, k) \quad (4)$$

Pritom v ustálenom stave $Y(\mathbf{x}, \infty) = \sum_1^5 Y_i(\mathbf{x}, \infty) = \sum_1^5 Y_i(\mathbf{x}, \infty) YR_i(\mathbf{x}, \infty) = \sum_1^5 Y_i(\mathbf{x}, \infty) \mathcal{H}H_i(\mathbf{x}, \infty)$

naoľko

$$\{YR_i(\mathbf{x}, \infty) = Y_i(\mathbf{x}, \infty) / Y_i(\mathbf{x}, \infty) = U_i(\infty) \mathcal{H}H_i(\mathbf{x}, \infty) / U_i(\infty) \mathcal{H}H_i(\mathbf{x}, \infty) = \mathcal{H}HR_i(\mathbf{x}, \infty)\}_i \quad (5)$$

V zmysle vzťahu (4) ďalej platí

$$\begin{bmatrix} Y(\mathbf{x}_1, k) \\ \vdots \\ Y(\mathbf{x}_i, k) \\ \vdots \\ Y(\mathbf{x}_5, k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} YR_1(\mathbf{x}_1, k) & \dots & YR_1(\mathbf{x}_1, k) & \dots & YR_5(\mathbf{x}_1, k) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ YR_1(\mathbf{x}_i, k) & \dots & YR_i(\mathbf{x}_i, k) & \dots & YR_5(\mathbf{x}_i, k) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ YR_1(\mathbf{x}_5, k) & \dots & YR_i(\mathbf{x}_5, k) & \dots & YR_5(\mathbf{x}_5, k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1(\mathbf{x}_1, k) \\ \vdots \\ Y_i(\mathbf{x}_i, k) \\ \vdots \\ Y_5(\mathbf{x}_5, k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

V blízkosti ustáleného stavu pre $k \rightarrow \infty$ priebehy $\{YR_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}$ konvergujú k priebehom $\{\mathcal{H}HR_i(\mathbf{x}, \infty)\}_{i=1,5}$, vzťah (6), preto pri výpočte hodnôt $\{Y_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}$ na základe $\{Y(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}$ pre $k \rightarrow \infty$ je možné počítat' s približnou reláciou

$$\begin{bmatrix} Y(x_1, k) \\ \vdots \\ Y(x_i, k) \\ \vdots \\ Y(x_5, k) \end{bmatrix} \doteq \begin{bmatrix} \mathcal{H}HR_1(x_1, \infty), \dots, \mathcal{H}HR_i(x_1, \infty), \dots, \mathcal{H}HR_5(x_1, \infty) \\ \mathcal{H}HR_1(x_i, \infty), \dots, \mathcal{H}HR_i(x_i, \infty), \dots, \mathcal{H}HR_5(x_i, \infty) \\ \mathcal{H}HR_1(x_5, \infty), \dots, \mathcal{H}HR_i(x_5, \infty), \dots, \mathcal{H}HR_5(x_n, \infty) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1(x_1, k) \\ \vdots \\ Y_i(x_i, k) \\ \vdots \\ Y_5(x_5, k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

a v skrátenej tvare

$$\bar{Y}(x_i, k) \doteq \bar{\mathcal{H}}HR_i(x_i, \infty) \bar{Y}_i(x_i, k) \quad (8)$$

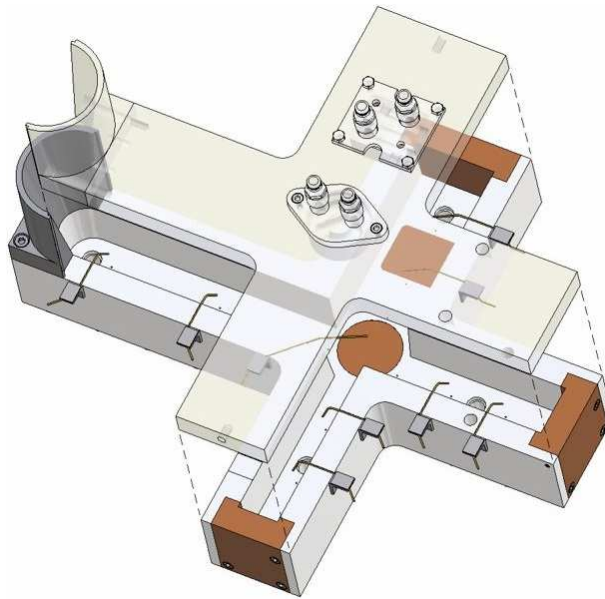
kde $\bar{Y}(x_i, k) = \{Y(x_1, k), \dots, Y(x_5, k)\}^T$ a $\bar{Y}_i(x_i, k) = \{Y_1(x_1, k), \dots, Y_5(x_5, k)\}^T$.

Tak neskôr inverzia matice $\bar{\mathcal{H}}HR_i(x_i, \infty)$

$$\bar{Y}_i(x_i, k) \doteq \bar{\mathcal{H}}HR_i(x_i, \infty)^{-1} \bar{Y}(x_i, k) \quad (9)$$

2 Experimentálne zariadenie riadeného zlievania

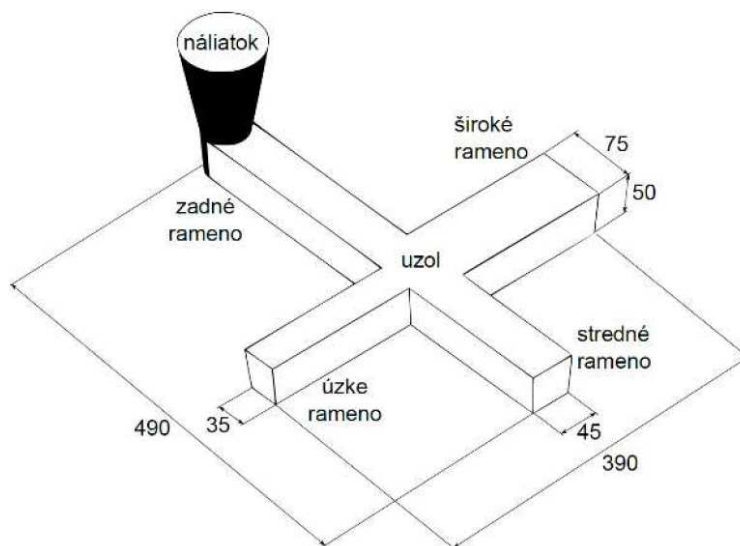
Experimentálne zariadenie na vyšetrovanie možnosti riadeného predohrevu zlievarenskej formy a aktívneho chladenia odliatku sa nachádza v Laboratóriu modelovania a riadenia technologických a výrobných procesov na Ústave automatizácie, merania a aplikovanej informatiky SJF STU. Je vybavené snímacou a výkonovou technikou na generovanie a súčasné sledovanie priebehov teplotných polí v telese kokily. Ovládanie snímačej a výkonovej elektroniky je realizované v prostredí MATLAB & Simulink, v ktorom je k dispozícii systém merania a riadenia v reálnom čase.



Obr. 3. Model zlievarenskej formy

Návrh riešeného problému vychádza z potrieb technológie zlievania, kde bežný konštrukčný prvok – krížový spoj – je klasickým problémom z hľadiska tvorby stiahnutí, kvôli tepelnému uzlu, ktorý v tomto mieste vzniká. V tomto konštrukčnom usporiadaní sú ramená odliatku rôzneho prierezu čím sa modeluje aj synchronizácia tuhnutia ramien.

Nakoniec je ešte zahrnutý problém veľkej vzdialenosti tepelného uzla od náliatku a tým vzniká problém s dosadzovaním tekutého kovu do tuhnuceho odliatku.



Obr. 4. Tvar a rozmery modelového odliatku

2.1 Technológia predohrevu formy

Vyhrievací okruh

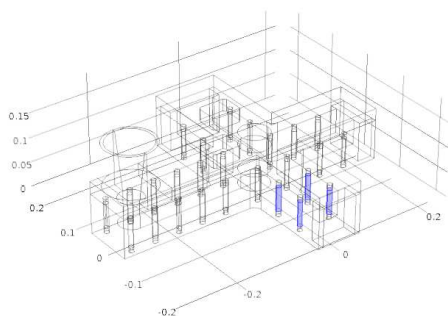
Potrebný vyhrievací výkon zabezpečuje 26 zabudovaných elektrických odporových telies, každé s nominálnym výkonom 400W rozdelených do piatich zón, Tab. 1, Obr. 3.

Tab. 1. POČET VYHRIEVACÍCH TELIES V DANEJ ZÓNE A NOMINÁLNY VÝKON ZÓN.

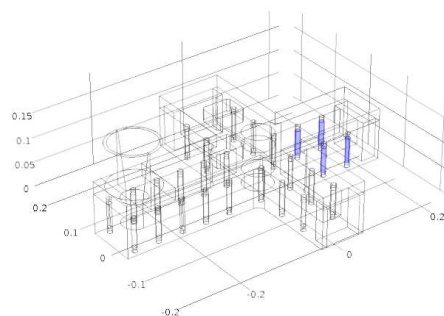
Zóna	Počet vyhrievných telies	Nominálny výkon (W)	Výkon pri simulácii (W)
1	4	1600	320
2	4	1600	320
3	4	1600	320
4	6	2400	480
5	8	3200	640

Celkový inštalovaný výkon je 10,4kW. Teplotu formy merajú termočlánky. Množstvo a výkon telies je navrhnutý s prihliadnutím na požiadavku rýchlosti dosiahnutia žiadanej teploty, pričom treba mať na pamäti, že ide o systém so značným kapacitným oneskorením.

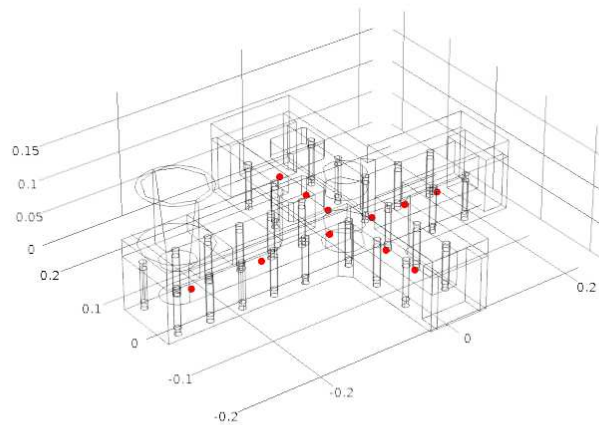
Použité sú vyhrievacie telesá BACKER ELEKTRO 2303/360. Napájané sú tyristorovými spínacími jednotkami Honeywell CD-3000S s jednofázovým napätím 230V, ktoré sú ovládané prostredníctvom napäťového signálu 0 – 10V z meracej karty HUMUSOFT AD622 cez rozvodnicu HUMUSOFT TB620.



Prvá zóna



Druhá zóna



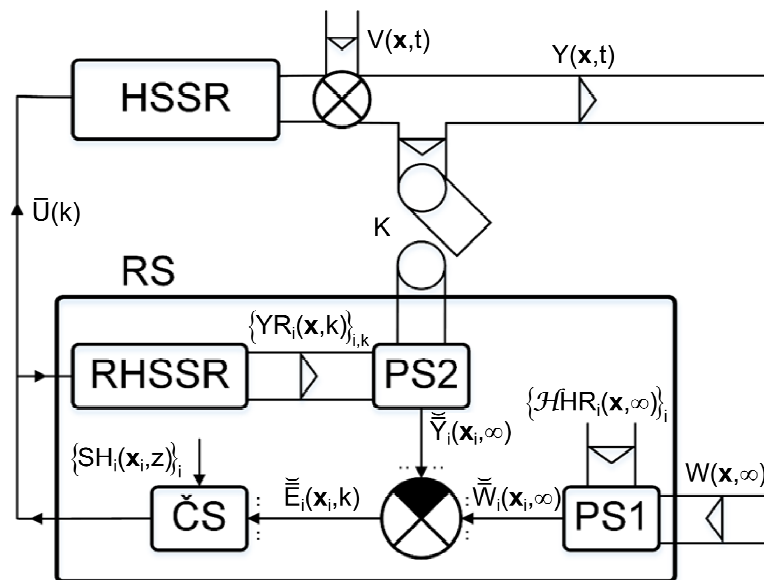
Obr. 6. Pozícia termočlánkov na zlievarenskej forme

Softvérové rozhranie

Komunikácia zariadenia s užívateľom je zabezpečená v prostredí MATLAB & Simulink obslužnou schémou, Obr. 3.5. Komunikáciu s príslušným hardvérom zabezpečujú ovládače ADVANTECH a HUMUSOFT, s využitím Real-Time Windows Target, ktorý zabezpečí aby systém fungoval v reálnom čase.

3 Návrh systému riadenia

Uvažujme riadiaci obvod s rozloženými parametrami v nasledovnom usporiadaní, Obr. 7.



Obr. 7. Uzavretý obvod riadenia s blokom RHSSR

- | | |
|------------|---|
| HSSR | - diskrétny obvod riadenia s tvarovačom nultého rádu. |
| RHSSR | - blok pre generovanie redukovaných priebehov. |
| RS | - syntéza riadenia. |
| ČS/PS1,PS2 | - časová/priestorová časť syntézy riadenia. |
| K | - časovo/priestorové vzorkovanie. |

- $Y(\mathbf{x}, t)$ - rozložená riadená veličina.
- $\{YR_i(\mathbf{x}, k)\}_{i,k}$ - redukované čiastkové rozložené riadené veličiny.
- $W(\mathbf{x}, \infty) / V(\mathbf{x}, t)$ - rozložená riadiaca/poruchová veličina.
- $\check{Y}_i(\mathbf{x}, k) = \{\check{Y}_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}$ - časové zložky čiastkových rozložených veličín.
- $\{\check{W}_i(\mathbf{x}, \infty)\}_i$ - sústredené riadiace veličiny.
- $\check{E}_i(\mathbf{x}, k) = \{\check{E}_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}$ - sústredené odchýlky riadenia.
- $\bar{U}(k) = \{U_i(k)\}_{i=1,5}$ - vektor sústredených akčných veličín.
- $\{SH_i(\mathbf{x}, z) / \mathcal{H}HR_i(\mathbf{x}, \infty)\}_{i=1,5}$ - časové/priestorové komponenty dynamiky riadeného systému.

kde riadené, redukované riadené, riadiace, poruchové veličiny ako aj dynamické charakteristiky HSSR v priestorovej závislosti v jednotlivých časových okamihoch, resp. v ustálenom stave sú prvkami lineárneho striktno konvexného normovaného priestoru funkcií X .

Cieľom riadenia je v ustálenom stave minimalizovať odchýlku riadenia $E(\mathbf{x}, \infty) = W(\mathbf{x}, \infty) - Y(\mathbf{x}, \infty)$ v kvadratickej norme. V bloku PS1 sa rieši aproximačná úloha na konečnej množine aproximačných funkcií $\{\mathcal{H}HR_i(\mathbf{x}, \infty)\}_{i=1,5}$, ktoré tvoria bázu lineárneho konečnorozmerného podpriestoru funkcií F_n na X .

$$\min \left\| W(\mathbf{x}, \infty) - \sum_{i=1}^n \check{W}_i(\mathbf{x}, \infty) \mathcal{H}HR_i(\mathbf{x}, \infty) \right\| = \left\| W(\mathbf{x}, \infty) - \sum_{i=1}^n \check{W}_i(\mathbf{x}, \infty) \mathcal{H}HR_i(\mathbf{x}, \infty) \right\| \quad (10)$$

Uvádzaná formulácia garantuje existenciu a jednoznačnosť riešenia aproximačnej úlohy s vektorom optimálnych hodnôt parametrov aproximácie $\{\check{W}_i(\mathbf{x}, \infty)\}_{i=1,5}$ pri minimálnej hodnote kvadratickej normy medzi $W(\mathbf{x}, \infty)$ a jej najlepšou aproximáciou

$$\check{W}O(\mathbf{x}, \infty) = \sum_{i=1}^n \check{W}_i(\mathbf{x}, \infty) \mathcal{H}HR_i(\mathbf{x}, \infty) \quad (11)$$

V bloku PS2 sa obdobne rieši aproximačná úloha, kde redukované priebehy čiastkových rozložených výstupných veličín $\{YR_i(\mathbf{x}, k)\}_{i,k}$ generované v bloku RHSSR uvažujeme teraz v kroku k ako bazové funkcie konečnorozmerného lineárneho podpriestoru funkcií Y_n na X . V zmysle vzťahu (4) pri pôsobení tej istej postupnosti akčných veličín $\bar{U}(k)$ na blok HSSR ako aj na blok RHSSR $Y(\mathbf{x}, k) \in Y_n$.

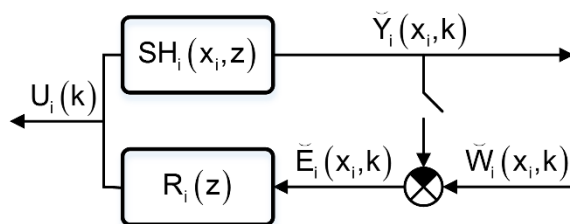
$$\min \left\| Y(\mathbf{x}, k) - \sum_{i=1}^n Y_i(\mathbf{x}, k) YR_i(\mathbf{x}, k) \right\| = \left\| Y(\mathbf{x}, k) - \sum_{i=1}^n \check{Y}_i(\mathbf{x}, k) YR_i(\mathbf{x}, k) \right\| = 0 \quad (12)$$

čo dáva vektor $\{\check{Y}_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5}$.

A potom v algebraickom bloku riadenia dostávame rovnicu

$$\{\check{E}_i(\mathbf{x}, k) = \check{W}_i(\mathbf{x}, k) - \check{Y}_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1,5} \quad (13)$$

V bloku ČS sú regulátory $\{R_i(z)\}_{i=1,5}$, ktoré sú zostavené podľa radiacích obvodov $\{SH_i(x_i, z), R_i(z)\}_{i=1,5}$, Obr. 8 tak aby v ustálenom stave pre $k \rightarrow \infty$ $\{\tilde{W}_i(x_i, \infty) - \tilde{Y}_i(x_i, \infty) = \tilde{E}(x_i, \infty) = 0\}_{i=1,5}$.



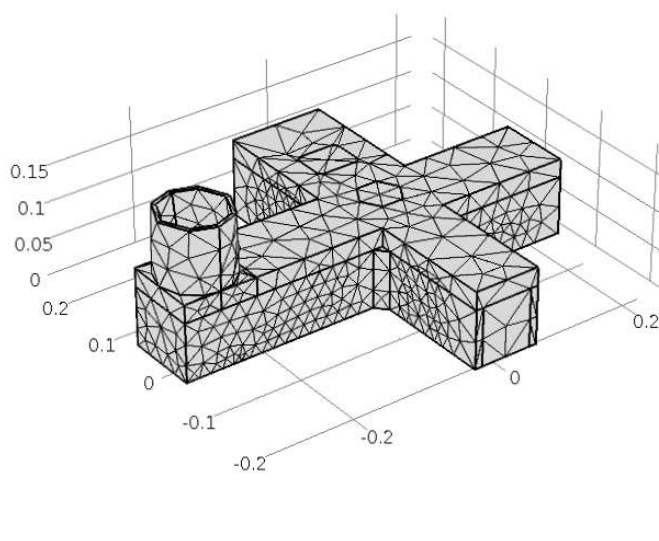
Obr. 8. i-ty obvod riadenia pre nastavenie regulátora $R_i(z)$.

Takto v procese riadenia v ustálenom stave platí $\{\tilde{W}_i(x_i, \infty) = \tilde{Y}_i(x_i, \infty)\}_{i=1,5}$ a v zmysle vzťahov (5) a (11) rozložená riadená veličina $\tilde{Y}(x, \infty)$ dáva najlepšiu aproximáciu radiacej veličiny $W(x, \infty)$

$$\begin{aligned} \tilde{Y}(x, \infty) &= \sum_1^5 \tilde{Y}_i(x_i, \infty) Y R_i(x, \infty) = \sum_1^5 \tilde{Y}_i(x_i, \infty) \mathcal{H} H_i(x, \infty) = \\ &= \sum_1^5 \tilde{W}_i(x_i, \infty) \mathcal{H} H_i(x, \infty) = \tilde{W} O(x, \infty) \end{aligned} \quad (14)$$

4 Identifikácia dynamiky zlievarenskej formy

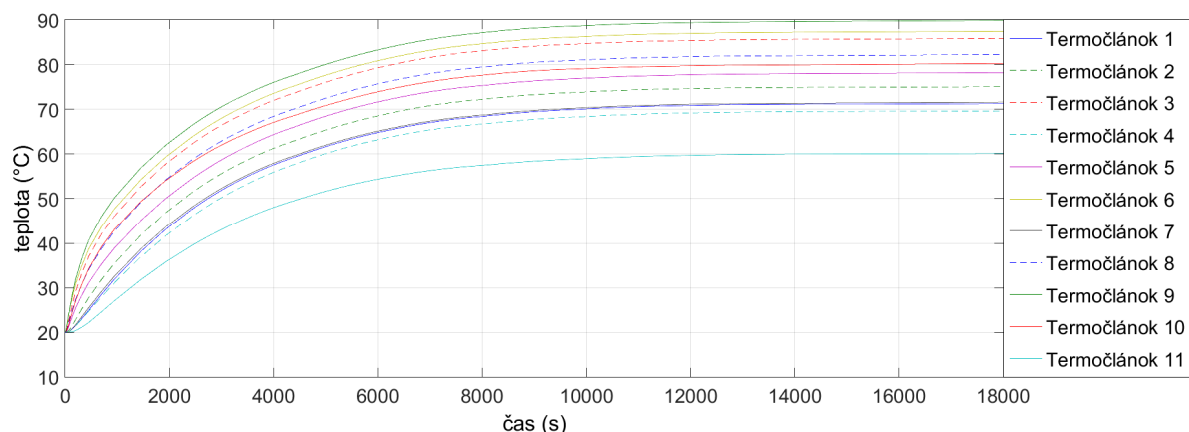
Pre potreby identifikácie dynamiky predohrevu zlievarenskej formy sa musel najskôr importovať CAD model zlievarenskej formy do program COMSOL Multiphysic. Následne boli definované okrajové a počiatkové podmienky, prestupy tepla medzi jednotlivými časťami formy. Vyhrievacie telesá boli definované do piatich vyhrievacích zón podľa reálneho zapojenia na zlievarenskej forme. Presné umiestnenie vyhrievacích a snímacích prvkov zlievarenskej formy je vidieť na Obr. 3 a Obr. 4. Program COMSOL Multiphysic je program, ktorý pracuje s metódou konečných prvkov, z tohto dôvodu bola na importovanom modeli vytvorená sieť pre potreby výpočtov, Obr. 9.



Obr. 9. Vytvorená sieť na modeli zlievarenskej formy v programe COMSOL Multiphysics.

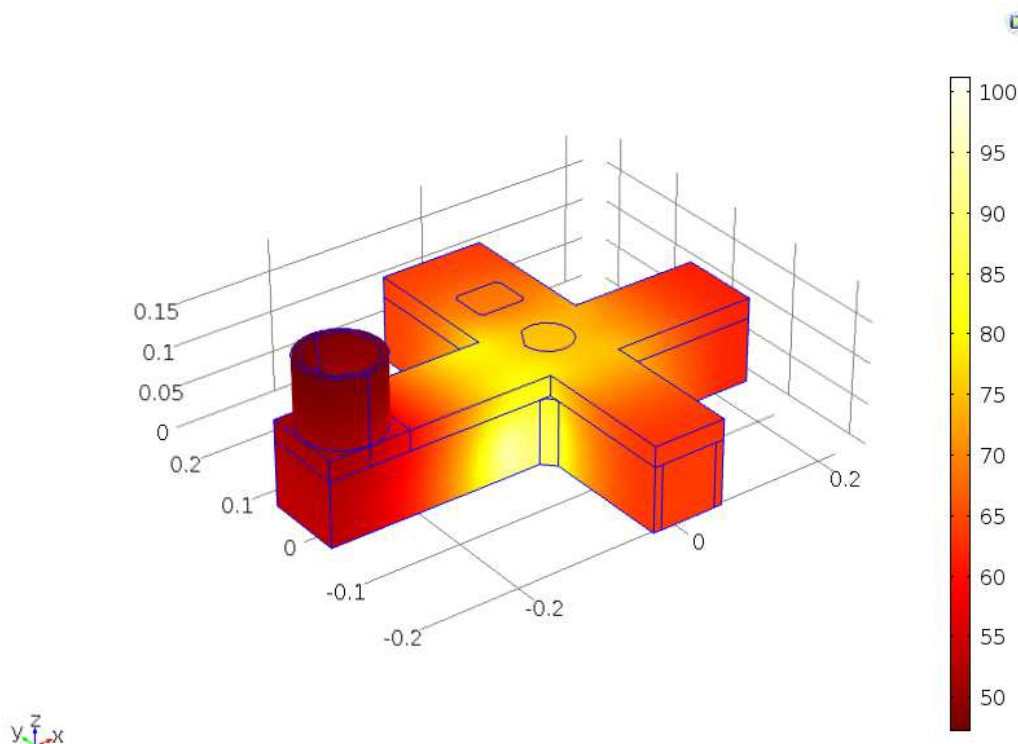
Po vytvorení siete boli spustené simulácie predohrevov zlievarenskej formy. V zlievarenskej forme sú vnorené vyhrievacie telesá s nominálnym výkonom 400 W každé a sú pospájané do jednotlivých vyhrievacích zón ako už bolo spomínané. Pri simuláciách predohrevov zlievarenskej formy boli spravené skokové zmeny celkových výkonov na daných zónach vo výške 20 % z celkového výkonu danej zóny. V Tab. 1 sú uvedené počty vyhrievacích telies v danej zóne, nominálny výkon danej zóny a veľkosť výkonového skoku pri simulovaní predohrevu pre potreby identifikácie dynamiky zlievarenskej formy.

Prechodové charakteristiky získané po skokovej zmene výkonu na štvrtej zóne je vidno na Obr. 10. Obdobným spôsobom boli spravené prechodové charakteristiky aj pre ostatné zóny. Získané prechodové charakteristiky boli v ďalšom kroku podrobené identifikácií za účelom získania modelu zlievarenskej formy.



Obr. 10. Prechodové charakteristiky po skokovej zmene výkonu na 4. zóne.

Na Obr. 11 sa nachádza ustálené teplotné pole zlievarenskej formy v programe COMSOL Multiphysics.



Obr. 11. Ustálené teplotné pole zlievarenskej formy v COMSOL Multiphysics.

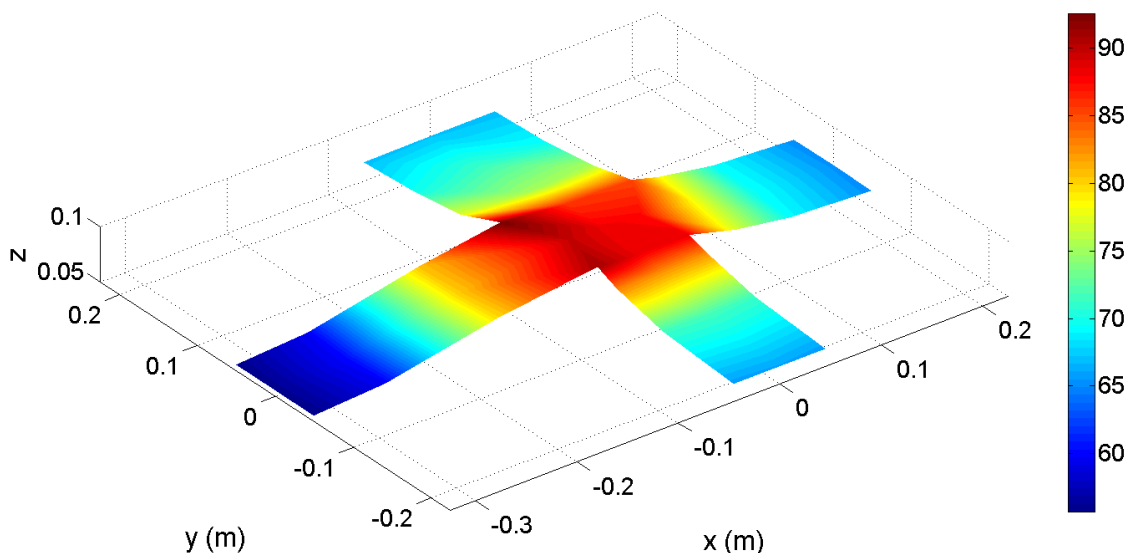
Pre potreby identifikácie sa musela vyselektovať prechodová charakteristika s najrýchlejšou dynamikou spomedzi ostatných. Najrýchlejšia dynamika sa vyberá z dôvodu, že najlepšie reprezentuje dynamiku ohrevu danej zóny. Na identifikáciu najrýchlejších dynamík bol použitý Identification Toolbox v MATLAB. Pri identifikácii sa ako vstup uvažovali jednotkový skok trvajúci počas celej doby simulácie, doba vzorkovania bola nastavená ako v simulácii tak aj v kosimulácii na 30 s. Hľadaný prenos sme hľadali v tvare (15). V Tab. 3 sa nachádzajú identifikované prenosové funkcie v spojitej aj diskrétnej oblasti.

$$\left\{ S_i(s) = \frac{K_i}{T_{pi}s + 1} \right\}_{i=1,5} \quad (15)$$

Tab. 3. IDENTIFIKOVANÉ PRENOSOVÉ FUNKCIE A UMIESTNENIE TERMOČLÁNKOV S NAJRÝCHLEJŠOU DYNAMIKOU

Zóna	Pozícia	$\{S_i(s)\}_{i=1,5}$	$\{S_i(z)\}_{i=1,5}, T=30 s$
1	7	$\frac{104,8}{1717s + 1}$	$\frac{0,3047}{z - 0,9971}$
2	4	$\frac{104,64}{1763,1s + 1}$	$\frac{0,2963}{z - 0,9972}$
3	1	$\frac{86,12}{2119,6s + 1}$	$\frac{0,2029}{z - 0,9976}$
4	9	$\frac{89,854}{2606,9s + 1}$	$\frac{0,1722}{z - 0,9981}$
5	11	$\frac{173,74}{1585,2s + 1}$	$\frac{0,5471}{z - 0,9969}$

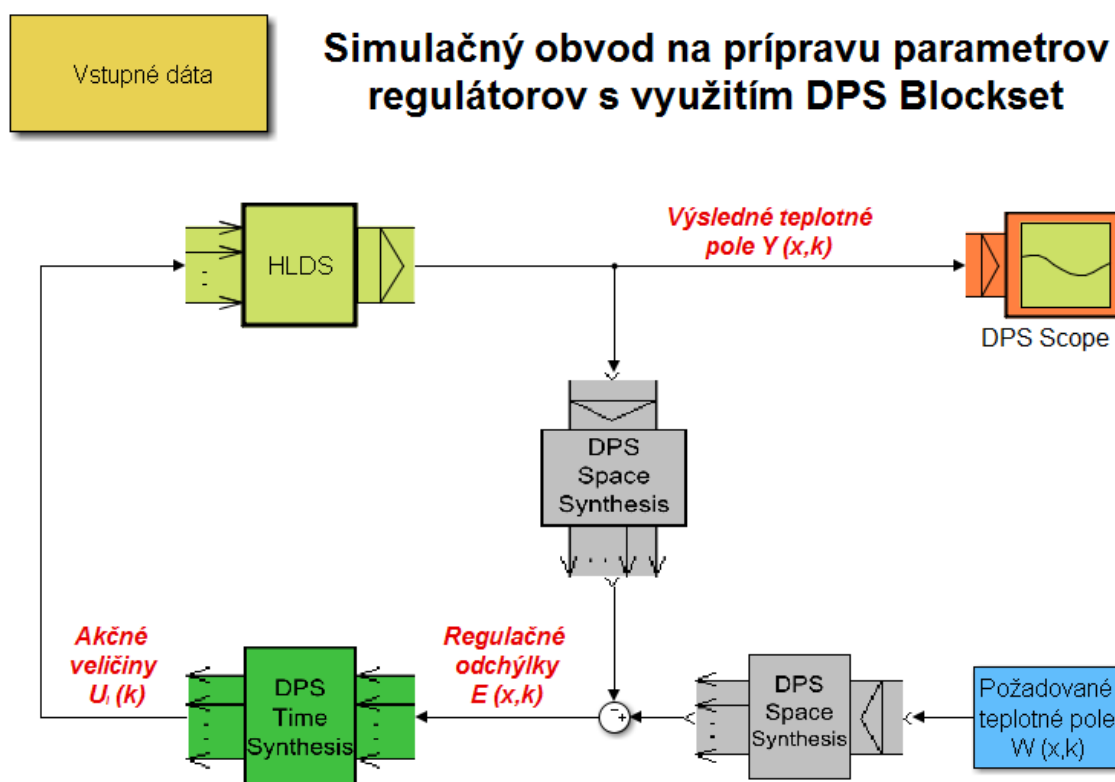
Po vykonaní identifikácie boli získané prechodové funkcie overené, t.j. bol zostavený obvod v programe MATLAB & Simulink s nastavbovým DPS Blockset v ktorom boli vykonané skokové zmeny na vstupe identifikovaného systému a sledoval sa výstup či je totožný s dátami zo simulácie v programe COMSOL Multiphysic. Na Obr. 12 vidno ustálené teplotné pole po skokovej zmene výkonu na štvrtej zóne, zobrazené pomocou DPS Scope čo je súčasť nastavbového balíka DPS Blockset. Po porovnaní s Obr. 11 môžeme vyhlásiť že ustálené teplotné pole identifikovanej sústavy sa zhoduje s ustáleným teplotným polom získaným z COMSOL Multiphysic.



Obr. 12. Ustálené teplotné pole zlievarenskej formy z DPS Scope.

5 Návrh systému riadenia v MATLAB & Simulink s využitím DPS Blockset

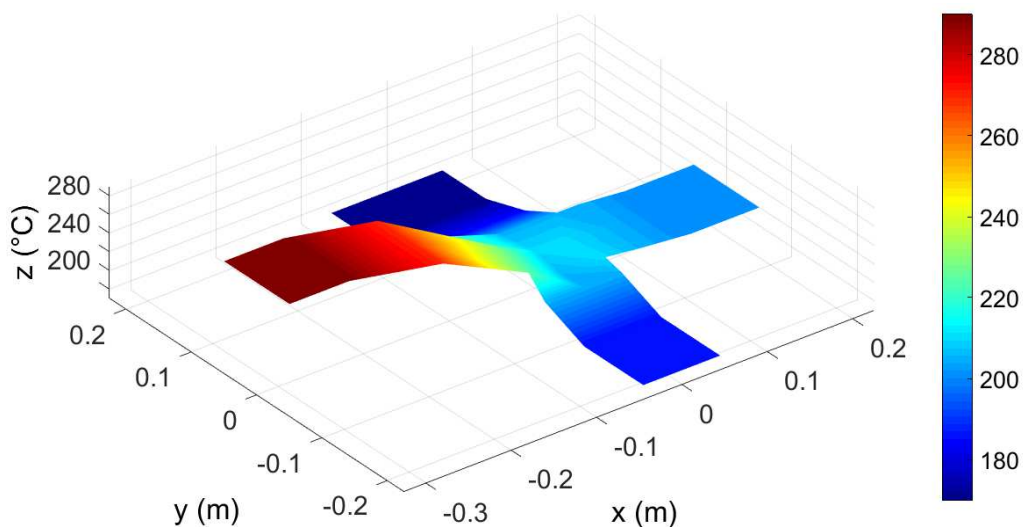
Syntéza riadenia bola vykonaná v prostredí MATLAB & Simulink pomocou nastavbového softvérového produktu DPS Blockset. DPS Blockset je špeciálny softvérový produkt vyvinutý na Ústave automatizácie, merania a aplikovanej informatiky a je produktom tretej strany pre spoločnosť The Mathworks. Je základom pri syntéze riadenia systémov s rozloženými parametrami. Hlavnou časťou je blok HLDS, vo vnútri bloku sa nachádza pole v ktorom sú umiestnené prechodové charakteristiky z jednotlivých zón získané zo simulácií v programe COMSOL Multiphysic. Ďalším použitím blokom z DPS Blockset je DPS Space Synthesis, tu prebieha aproximácia úloha, ktorej úlohou je nájdenie čiastkových výstupných rozložených veličín v bodoch s najrýchlejšou dynamikou. Pri žiadanej hodnote teplotného poľa je výstupom z priestorovej syntézy vektor čiastkových rozložených žiadaných veličín pre prislúchajúce body. Posledným použitým blokom z DPS Blockset je DPS Scope, tento blok slúži na zobrazovanie, pre potreby článku sa jedná o zobrazovanie teplotných polí zlievarenskej formy. Na to aby vedel DPS Scope správne zobrazit' výstupné teplotné pole zlievarenskej formy potrebuje mimo vstupného signálu v tvare vektoru aj dve matice. Prvá matica hovorí o súradniciach, na ktorých sa body nachádzajú, a druhá matica hovorí o vzájomnom prepojení susedných bodov. Susedné body je možné párovať po dvoch, troch a štyroch bodoch a to vždy v proti smere hodinových ručičiek od východzieho bodu. Pre korektné fungovanie DPS Scope je potrebné aby vstupný vektor mal veľkosť zhodnú s počtom bodov nachádzajúcich sa v prvej matici. Pre potrebu siete bodov pre DPS Scope, boli simulácie predohrevov robené nie len v bodoch kde sa reálne na zlievarenskej forme nachádzajú termočlánky ale aj pre body umiestnené tak aby vytvorili sieť spodnej časti zlievarenskej formy. Z tohto dôvodu sa berie výstupná veličina ako teplotné pole tvorené z 45 bodov. Preto aj žiadaná hodnota je zadávaná ako teplotné pole definované na 45 bodoch.



Obr. 13. Simulačný obvod na prípravu parametrov regulátorov s využitím DPS Blockset.

Pre nastavenie a overenie správnej funkčnosti regulátorov v regulačnom obvode bola zostavená schéma riadenia, Obr. 13, ktorá vychádza z teoretických poznatkov uvedených vyššie. Obvod riadenia je zostavený podľa Obr. 7.

Na Obr. 14 je vidno žiadané teplotné pole platné pre simulačný aj kosimulačný obvod riadenia.

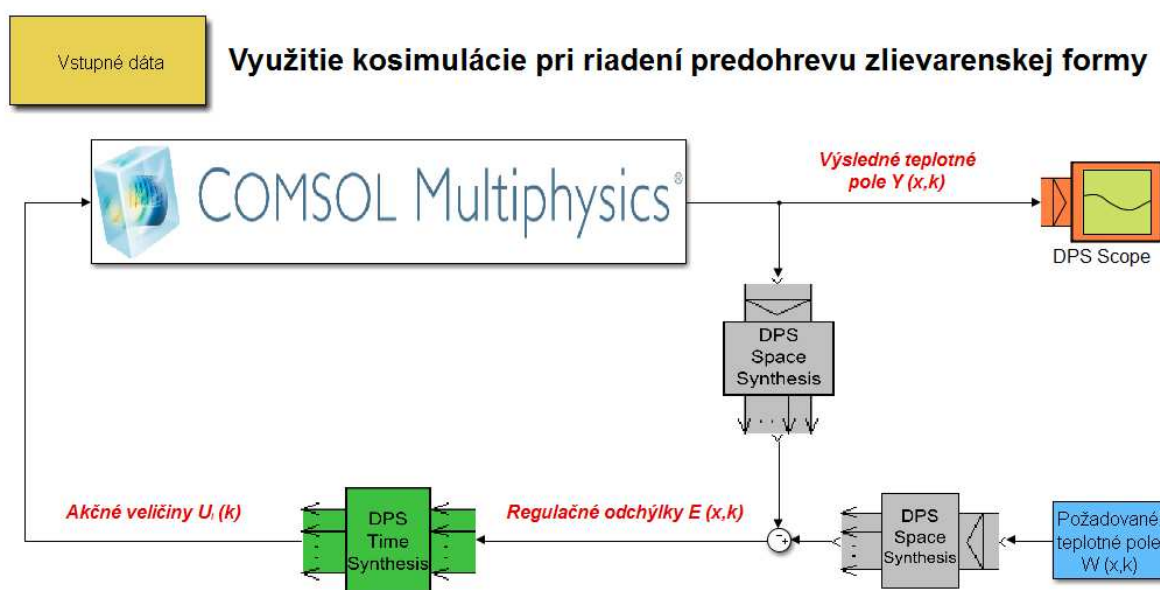


Obr. 14. Žiadané teplotné pole.

6 Kosimulačný obvod riadenia

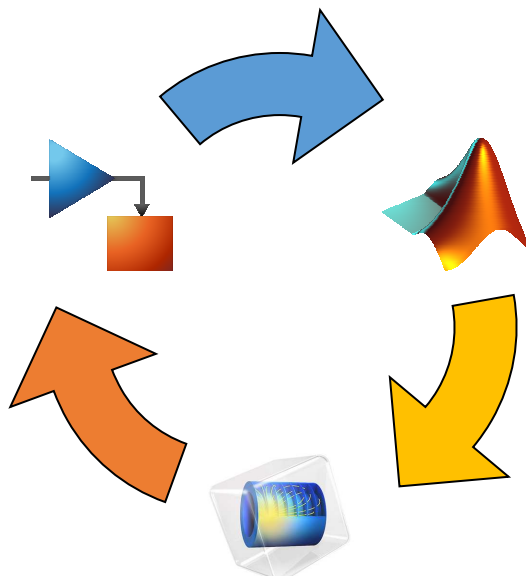
Kosimulačný obvod riadenia je založený na spolupráci programov MATLAB & Simulink s nadstavbovým DPS Blockset a COMSOL Multiphysics. Spoluprácu oboch programov zabezpečuje nadstavbový prvok COMSOL Multiphysics a to COMSOL with MATLAB. Pri klasickom obvode riadenia ako je na Obr. 13 nám vzniká problém v presnosti nastaveniach parametrov regulátor, pre dosiahnutie čo najvyššej presnosti je potrebné mať v bloku HLDS čo najpresnejší konvolútorný model modelovanej sústavy. Tepelné sústavy sa vyznačujú najmä tým, že so zvyšujúcou sa teplotou menia svoje fyzikálne vlastnosti a nie len tie, s narastajúcou teplotou sa menia aj pomery v prestupoch tepla a odvodoch tepla. Preto ak je potrebné dosiahnuť čo najvyššiu presnosť modelu tak sa naskytujú viaceré možnosti, ako prvá je možnosť segmentácie dynamiky. U tejto možnosti treba mať k dispozícii nie jeden konvolútorný model sústavy ale viacero modelov. Pri viacerých modeloch je snahou vždy zachytiť jedným konvolútorným modelom oblasť teplôt, v ktorej sa fyzikálne parametre menia minimálne, ale 100 % presnosť sa týmto spôsobom nedosiahne len sa k nej pomaly dá priblížiť.

Druhým riešením ktoré sa ponúka vďaka vývoju moderných výpočtových prístrojov a softvérových nástrojov je možnosť nahradenia konvolútorného modelu priamo modelom v programe ako je napríklad COMSOL Multiphysics, Obr. 15.



Obr. 15. Kosimulačný obvod riadenia s využitím DPS Blocset.

Ako je vidieť na Obr. 15 tak je v veľkej miere totožný ako Obr. 13, rozdiel je iba v nahradení konvolútorného modelu blokom ktorý zabezpečuje komunikáciu medzi programami MATLAB & Simulink a COMSOL Multiphysics a aj prípravu dát pre správny zápis do programu COMSOL Multiphysics pred spustením výpočtov. Oba riadiace obvody vychádzajú z teoretických poznatkov uvedených v úvode článku. Tým že je konvolútorný model nahradený priamo modelom v COMSOL Multiphysics tak sa presnosť modelu dostáva na takmer na 100 % pri validovanom modeli je možné dosiahnuť maximálnu presnosť.

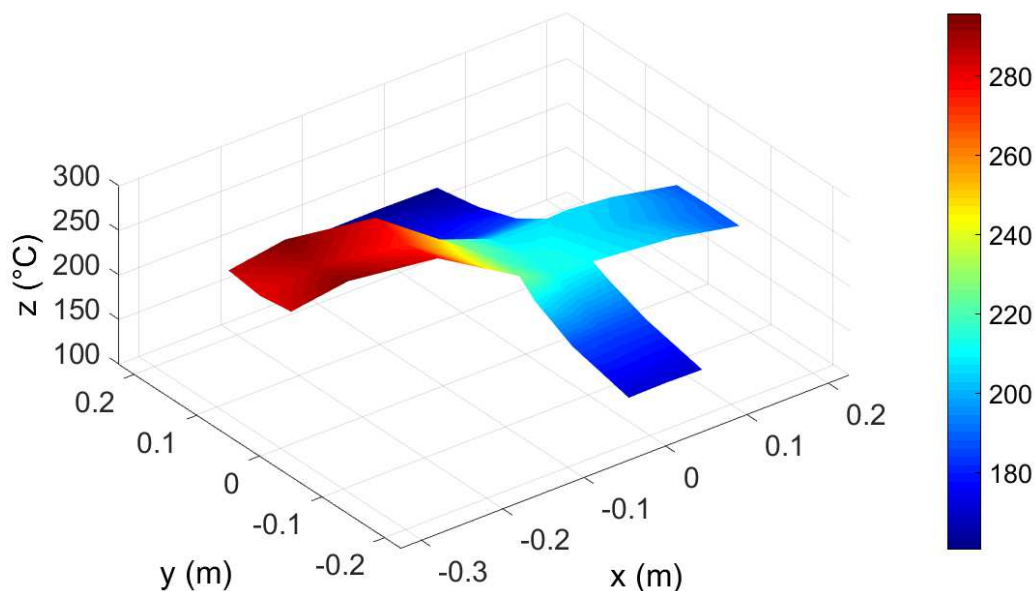


Obr. 16. Grafická interpretácia fungovania kosimulácie

Kosimulácia má viacero krokov, ako prvý krok je načítanie údajov do programu COMSOL Multiphysics, ktoré museli byť dopredu pripravené na potrebný formát, ich príprava je vykonaná v kosimulačnom obvode v Simulinku. V prípade predohrevu formy je to vo forme hodnoty výkonov, a ich hodnoty sú následne v prvom kroku zapísané do modelu, čo zabezpečené pomocou funkcie vytvorenej v MATLAB. Druhý krok kosimulácie je spustenie krátkej simulácie v programe COMSOL Multiphysics, spustenie vykonáva funkcia, ktorej úlohou bol aj zápis parametrov do modelu. Tretí krok prebieha po krátkej simulácii, dĺžka simulácie je totožná so vzorkovacím časom, a výsledok simulácie je zapísaný na výstup funkcie a reprezentuje výstupnú veličinu $Y(x,k)$. Prvý až tretí krok sa cyklicky opakujú s frekvenciou vzorkovacieho času, Obr. 16, v demonštrovanom príklade 30 sekúnd. Prvý cyklus kosimulácie vychádza z definovaných počiatočných podmienok, vďaka previazanosti programov môžu byť počiatočné podmienky definované funkciou a nie je potrebné mať pre každý pracovný bod mať zvlášť model. Každý ďalší cyklus v poradí nevychádza z pôvodných počiatočných podmienok ale z teplotného poľa ukončeného výpočtu predchádzajúceho cyklu, t.j. pokračuje v simulácii so zmenenými vstupnými dátami, ktorých zmena bola riešené v riadiacej časti kosimulačného obvodu. Týmto bolo dosiahnuté nahradenie konvolútorného modelu modelom v programe COMSOL Multiphysics.

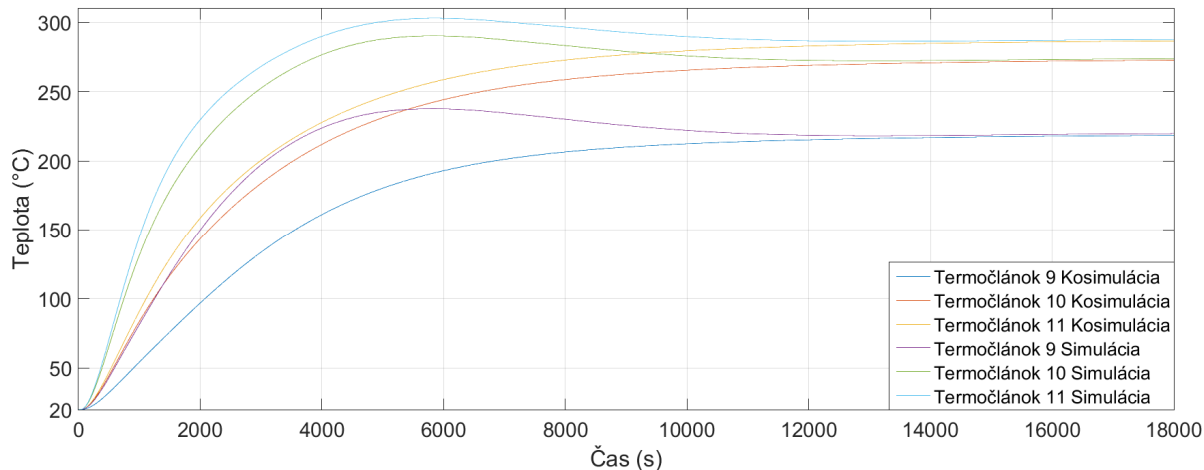
7 Vyhodnotenie

Výsledné ustálené teplotné pole po regulačnom pochode vidno na Obr. 17., teplotné pole je len jedno. Riadiace obvody, simulačný obvod (Obr. 13) a obvod s využitím kosimulácie (Obr. 15), dávajú totožný výstup, preto výsledné ustálené teplotné pole reprezentuje oba obvody. Dosiahnuté ustálené teplotné pole dosahuje veľkú mieru zhody s požadovaným teplotným polom, preto je možné vyhlásiť správnosť fungovania regulačných obvodov. Ako ďalší dôvod tohto vyhlásenia je ten, že teplotné pole po regulácii má potrebný parameter na začatie liatia. Tento parameter je stúpajúci gradient teploty, od koncov ramien ku stredu formy, a od stredu formy smerom ku náliatku, čo je dodržané a tým je aj naplnená technologická požiadavka pre predohrev zlievarenskej formy.



Obr. 17. Ustálené teplotné pole na konci predohrevu zlievarenskej formy.

Pre možnosť porovnania výsledkov simulačného a kosimulačného obvodu riadenia je vidno na Obr. 18 priebeh teploty v čase na vybraných termočlánkových sondách. Na vyobrazených časových priebehoch regulačných pochodov vidno v ustálenom stave zhodu medzi obvodmi, t.j. ustálené teplotné pole (Obr. 17) korektne reprezentuje ustálený stav z oboch obvodov. Na časových priebehoch je vidno rozdiel v nábehovej časti, rozdiel je spôsobený konvolútorným modelom. Konvolútorný model bol vytvorený na základe prechodových charakteristík reprezentujúcich dynamiku zlievarenskej formy pre daný vstupný signál. Vplyvom zmeny fyzikálnych vlastností a zmien v pomeroch prestupu / odvodu tepla nezachytených v konvolútornom modeli vznikol viditeľný rozdiel pri nábehu.



Obr. 18. Priebeh teploty na vybraných termočlánkoch počas predohrevu zlievarenskej formy.

PodĎakovanie

Tento článok bol podporovaný Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmlúv č. APVV-0160-10 „*High-tech riešenia pre technologické procesy a mechatronické komponenty ako riadené systémy s rozloženými parametrami*“ a APVV-14-0244 „*Vývoj softvérovej podpory s využitím fyzikálnej simulácie pre optimalizáciu procesov plynulého odlievania ocele ako systémov s rozloženými parametrami pre Železiarne Podbrezová, a. s.*“ ako aj Výskumnou agentúrou MŠVVaŠ SR na základe zmluvy č. ITMS-26240220084 „*Univerzitný vedecký park STU v Bratislave*“.

Literatúra

- [1] HULKÓ, G. a kol. *Modelovanie, riadenie a návrh systémov s rozloženými parametrami*. Vydavateľstvo STU v Bratislave, ISBN 80-227-1052-0. 1998.
 - [2] NOGA, P.: *Modelovanie a riadenie procesov zlievania ako systémov s rozloženými parametrami*. Doktorandská dizertačná práca, Bratislava, 2011.
 - [3] Buček, P.: *Mechatrická zlievarenská forma ako systém s rozloženými parametrami*, Doktorandská dizertačná práca, Bratislava 2010
 - [4] System Identification Toolbox : User's Guid, www.mathworks.com, 2015
 - [5] COMSOL Multiphysics User's Guide, www.comsol.com, 2015
 - [6] 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.
 - [7] HULKÓ, G., BELAVÝ, C., NOGA, P., ONDREJJOVIČ, K.: *Control of technological and production processes as distributed parameter systems.*, Vydavateľstvo STU v Bratislave, ISBN 978-80-227-4290-0.
-

Ing. Lukáš Bartalský

Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky, Strojnícka fakulta, Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Námestie slobody 1, Bratislava, tel. (+421) 2 5249 7193, e-mail: lukas.bartalsky@stuba.sk

Ing. Michal Bartko

Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky, Strojnícka fakulta, Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Námestie slobody 1, Bratislava, tel. (+421) 2 5249 7193, e-mail: michal_bartko@stuba.sk

prof. Ing. Cyril Belavý, CSc.

Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky, Strojnícka fakulta, Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Námestie slobody 1, Bratislava, tel. (+421) 2 5249 7193, e-mail: cyril.belavy@stuba.sk

prof. Ing. Gabriel Hulkó, DrSc.

Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky, Strojnícka fakulta, Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Námestie slobody 1, Bratislava, tel. (+421) 2 5249 7193, e-mail: gabriel.hulko@stuba.sk