

MODELOVANIE A SIMULÁCIA RIADENIA PREDOHREUV ZLIEVARENSKEJ FORMY

Lukáš Bartalský, Michal Bartko, Gabriel Hulkó

Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Strojnícka fakulta

Abstrakt

Predkladaný článok rieši otázky modelovania a riadenia predohrevu mechatronickej zlievarenskej formy ako systému s rozloženými parametrami. Úvodom sú v skratke predstavené základné štruktúry systémov s rozloženými parametrami, ďalej je opísaná mechatronická zlievarenská forma a tvorba simulačného modelu v programovom prostredí COMSOL Multiphysics. Po identifikácii dynamických charakteristík je zostavený systém riadenia v softvérovom prostredí DPS Blockset pre MATLAB & Simulink.

1 ÚVOD

Predkladaný článok sa zaoberá problematikou riadeného predohrevu mechatronickej zlievarenskej formy. Vzhľadom na tvar experimentálneho zariadenia, ktoré bolo zámerne navrhnuté v tvare križa, je riadený predohrev potrebný. Bez predohrevu experimentálneho zariadenia dochádzalo po odliatí odliatku k jeho chybám a to spôsobom stiahnutí a prepahlín. V dnešnej dobe keď sa treba snažiť ušetriť najmä na nákladoch na výrobu je výhodné použiť riadený predohrev oproti predohrevu celej formy na rovnakú teplotu. Hlavnou výhodou riadeného predohrevu je v tom, že keď ho riadime ako systém s rozloženými parametrami, tak vieme doceliť rôznu požadovanú teplotu v daných zónach. V článku je riešený návrh riadenia pre mechatronickú zlievarenskú formu pomocou softvérového produktu DPS Blockset.

2 SYSTÉMY S ROZLOŽENÝMI PARAMETRAMI

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. 1.



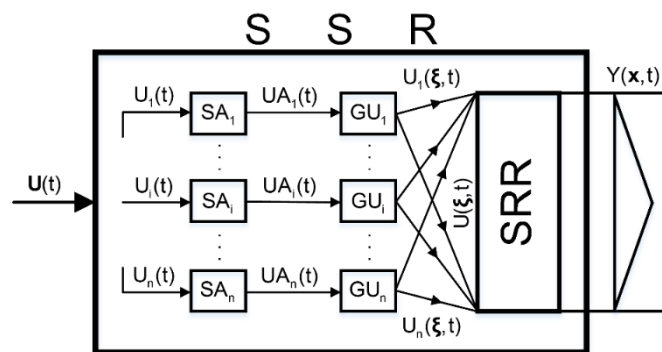
Obr. 1 Systém s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom.

$U(\mathbf{x},t)$ - $U(x, y, z,t)$ – rozložená vstupná veličina.

$Y(\mathbf{x},t)$ - $Y(x, y, z,t)$ – rozložená výstupná veličina.

SRR – systém s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom.

Keď sa k SRR pripájajú aktuátory a generátory rozložených vstupných veličín dostávame systémy so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom (SSR), Obr. 2, Obr. 3.



Obr. 2 Štruktúra systému so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom.

- SSR – systém so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom.
- $\{SA_i\}_i$ – aktuátory sústredených vstupných veličín.
- $\{GU_i\}_i$ – generátory rozložených vstupných veličín.
- SRR – systém s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom.
- $U(t) = \{U_i(t)\}_i$ – vektor sústredených vstupných veličín.
- $\{UA_i(t)\}_i$ – sústredené vstupné veličiny $\{GU_i\}_i$.
- $\{U_i(\xi, t)\}_i$ – rozložené výstupné veličiny $\{GU_i\}_i$.
- $U(\xi, t)$ – celková rozložená vstupná veličina SSR.
- $Y(x, t) = Y(x, y, z, t)$ – rozložená výstupná veličina.



Obr. 3 Systém so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom.

- SSR – systém so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom.
- $\{U_i(t)\}_i$ – sústredené vstupné veličiny.
- $Y(x, t) = Y(x, y, z, t)$ – rozložená výstupná veličina.

Vo vstupno-výstupnej relácii celková rozložená výstupná veličina pri nulových začiatkových a okrajových podmienkach je daná

$$Y(x, t) = \sum_{i=1}^n Y_i(x, t) = \sum_{i=1}^n \mathcal{G}_i(x, t) \otimes U_i(t) = \sum_{i=1}^n \int_0^t \mathcal{G}_i(x, t - \tau) U_i(\tau) d\tau \quad (2.1)$$

respektíve v diskretnom tvare

$$Y(x, k) = \sum_{i=1}^n Y_i(x, k) = \sum_{i=1}^n \mathcal{GH}_i(x, k) \oplus U_i(k) = \sum_{i=1}^n \sum_{q=0}^k \mathcal{GH}_i(x, k - q) U_i(q) \quad (2.2)$$

kde \otimes je znak konvolutórneho súčinu a \oplus je znak konvolutórnej sumy, $\{U_i(t)\}_i$ a $\{U_i(k)\}_i$ sú spojité a diskretné sústredené vstupné veličiny, $\{\mathcal{G}_i(x, t)\}_i$ sú rozložené impulzné charakteristiky medzi i-tým vstupom a výstupom SSR, $\{\mathcal{GH}_i(x, k)\}_i$ sú diskretné rozložené impulzné charakteristiky medzi i-tým vstupom a výstupom SSR s tvarovačmi nultého rádu H: HSSR. Prítom

$$\{Y_i(x, t)\}_i = \{\mathcal{G}_i(x, t) \otimes U_i(t)\}_i = \left\{ \int_0^t \mathcal{G}_i(x, t - \tau) U_i(\tau) d\tau \right\}_i \quad (2.3)$$

$$\{Y_i(\mathbf{x}, k)\}_i = \{\mathcal{G}H_i(\mathbf{x}, k) \oplus U_i(k)\}_i = \left\{ \sum_{q=0}^k \mathcal{G}H_i(\mathbf{x}, k-q) U_i(q) \right\}_i \quad (2.4)$$

sú čiastkové spojité a diskkrétne rozložené výstupné veličiny prislúchajúce jednotlivým sústredeným vstupným veličinám.

Po Laplaceovej transformácii dostávame závislosti,[1]

$$Y(\mathbf{x}, s) = \sum_{i=1}^n Y_i(\mathbf{x}, s) = \sum_{i=1}^n S_i(\mathbf{x}, s) U_i(s) \quad (2.5)$$

$$\{Y_i(\mathbf{x}, s) = S_i(\mathbf{x}, s) U_i(s)\}_i \quad (2.6)$$

a po Z-ovej transformácii

$$Y(\mathbf{x}, z) = \sum_{i=1}^n Y_i(\mathbf{x}, z) = \sum_{i=1}^n S_i(\mathbf{x}, z) U_i(z) \quad (2.7)$$

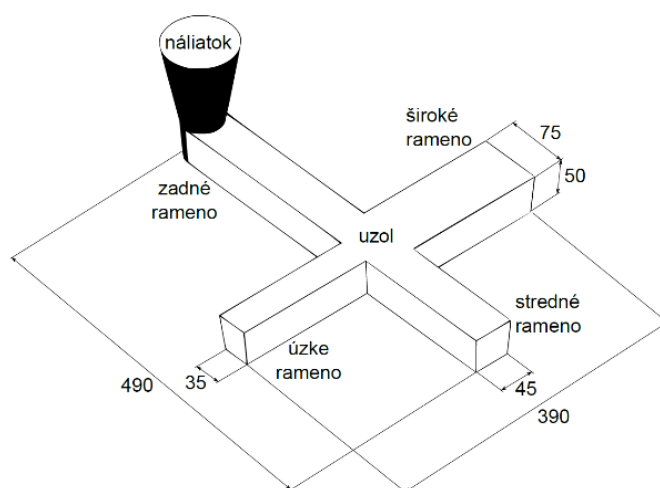
$$\{Y_i(\mathbf{x}, z) = S_i(\mathbf{x}, z) U_i(z)\}_i \quad (2.8)$$

3 EXPERIMENTÁLNA MECHATRONICKÁ ZLIEVARENSKÁ FORMA

Experimentálne zariadenie na vyšetovanie možnosti riadeného predhrevu zlievarenskej formy a aktívneho chladenia odliatku bolo vybudované na – Ústave automatizácie, merania a aplikovanej informatiky Sjf STU v spolupráci s Ústavom technológie a materiálov 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.

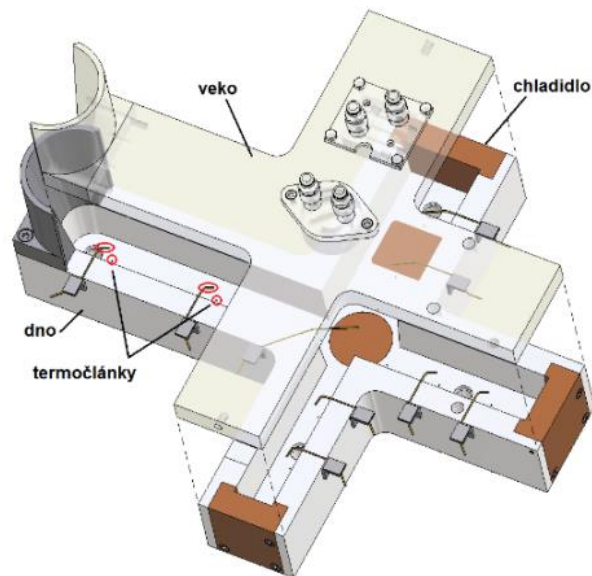
Návrh riešeného problému vychádza z potrieb technológie zlievania, kde bežný konštrukčný prvok – krížový spoj – je klasickým problémom z hľadiska tvorby stiahnutí, kvôli tepelnému uzlu, ktorý v tomto mieste vzniká, Obr. 4. V tomto konštrukčnom usporiadaní sú ramená odliatku rôzneho prierezu čím sa modeluje aj synchronizácia tuhnutia ramien.

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



Obr. 4 Tvar a rozmery modelového odliatku.

Konečný návrh rozmerov odliatku vznikol ako kompromis berúci do úvahy možnosti zlievarne ÚTM Sjf, náklady na výrobu zariadenia a realizácie experimentov. Od tvaru a veľkosti odliatku sa odvíjal návrh celého zariadenia, ktorého „srdcom“ je ocelová kokila so zabudovanými meracími a akčnými členmi.



Obr. 5 Kokila so zabudovanými meracími a akčnými členmi.

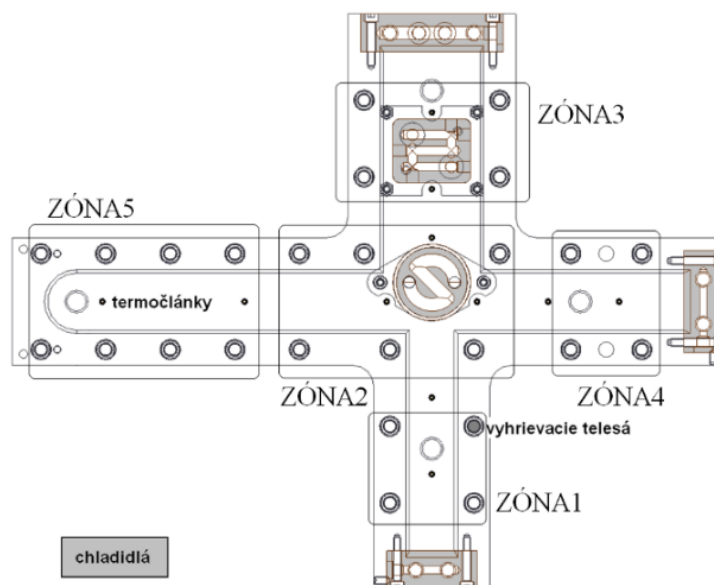
3.1 Technológia predohrevu formy

Vyhrievací okruh

Potrebný vyhrievací výkon zabezpečuje 26 zabudovaných elektrických odporových telies, každé s nominálnym výkonom 400W rozdelených do piatich zón, Obr. 5 a Obr. 6:

ZÓNA1 Úzke rameno (35mm)	1600W
ZÓNA2 Krížový spoj – tepelný uzol	2400W
ZÓNA3 Široké rameno (75mm)	1600W
ZÓNA4 Stredné rameno (45mm)	1600W
ZÓNA5 Rameno od uzla k náliatku	3200W

Celkový inštalovaný výkon je 10,4kW. Teplotu formy merajú termočlánky TE-P01 až TE-P11. 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, [2].



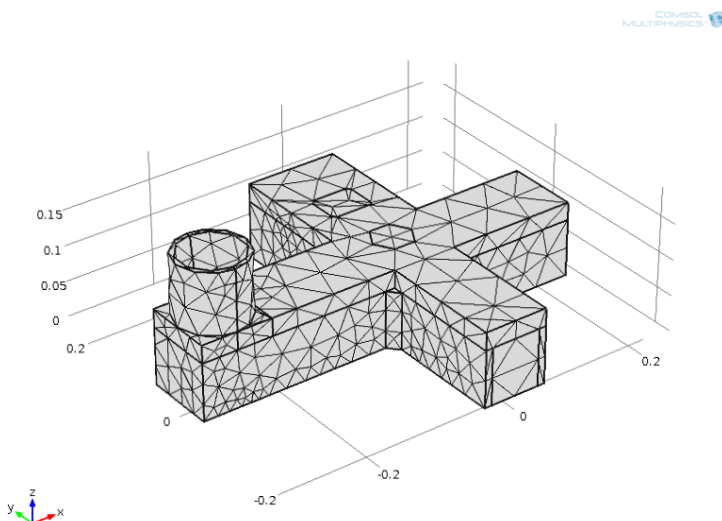
Obr. 6 Vyhrievací okruh.

4 MODELOVANIE V COMSOL Multiphysics

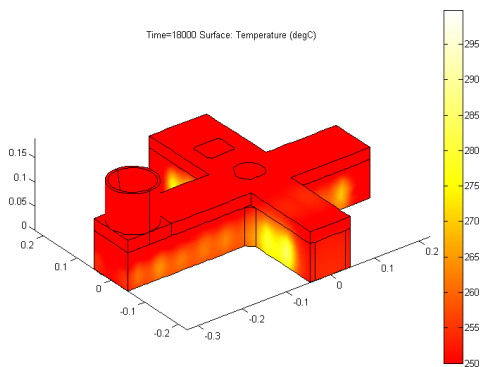
V programe COMSOL Multiphysics bol modelovaný predohrev mechatronickej zlievarenskej formy. Do programu COMSOL Multiphysics bol importovaný CAD model zlievarenskej formy. Následne boli definované okrajové podmienky s teplotou okolia 23°C. Vyhrievacie zóny boli nadefinované podľa toho ako sú na reálnom zariadení zapojené. Následne bolo vytvorené sieťovanie na modeli zlievarenskej formy konečno prvkovou sieťou, vid' Obr. 7. Experimentálnym spôsobom formou pokusov a opráv boli nájdené výkonové pomery potrebné na udržanie teplotného poľa formy na „pracovnej teplote“. Pracovná teplota formy bola určená na 250°C. Následne po zistení týchto výkonových pomerov boli spravené simulácie skokových nárastov výkonov na jednotlivých zónach. Skok na každej zóne bol vykonaný nárastom výkonu o 20 %. Prehľad výkonových pomerov pred skokovou zmenou a so skokovou zmenou je v Tabuľka 1. Výsledok simulácií boli matice prechodových charakteristík o rozmeroch 11x3601. Počet riadkov 11 je preto že aj meracích bodov máme jedenásť. Počet stĺpcov 3601 je kvôli tomu že dĺžka simulácie bola 18000 sekúnd s vzorkovaním 5 sekúnd plus prvá vzorka na začiatku simulácie. Čas trvania simulácie bol zvolený podľa doby ako sa bude aj reálne dlho merať na zariadení a s reálnym vzorkovacím časom požitým pri meraní. Výsledky zo simulácie po zvýšení výkonu na prvej zóne sú na Obr. 8 až Obr. 10. Na Obr. 8 je vidieť ustálené teplotné pole formy na konci simulácie, jasne žltou farbou je vidieť zvýšenie výkonu na prvej zóne. Na Obr. 9 vidno ustálenú teplotu v meracích bodoch vo vnútri formy. Z obrázku je zrejмый nárast teploty v prvej zóne oproti ostatným zónam. Na Obr. 10 sa nachádzajú prechodové charakteristiky po zvýšení výkonu na prvej zóne. Z tohto obrázku je vidieť že pri zmene výkonu na jednej zóne teplotne ovplyvníme aj ostatné zóny na forme. Preto z tohto titulu potrebujeme mať prechodové charakteristiky v tvare matice 11x3601 aby sme vedeli správne následne navrhnuť riadenie predohrevu formy pomocou DPS Blockset, [3].

Tabuľka 1 Hodnoty výkonov pred a po zvýšení.

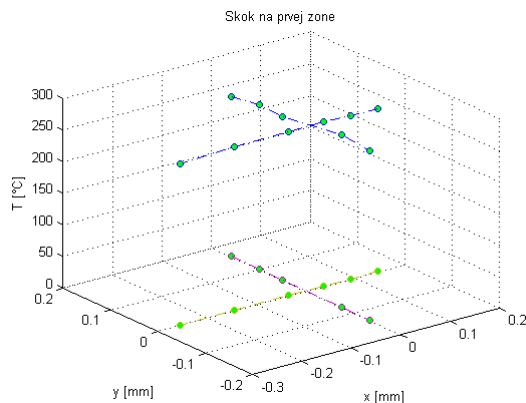
Zóna	Pôvodné výkony	20 %-ný nárast výkonu
1	485	582
2	500	600
3	650	780
4	465	558
5	715	858



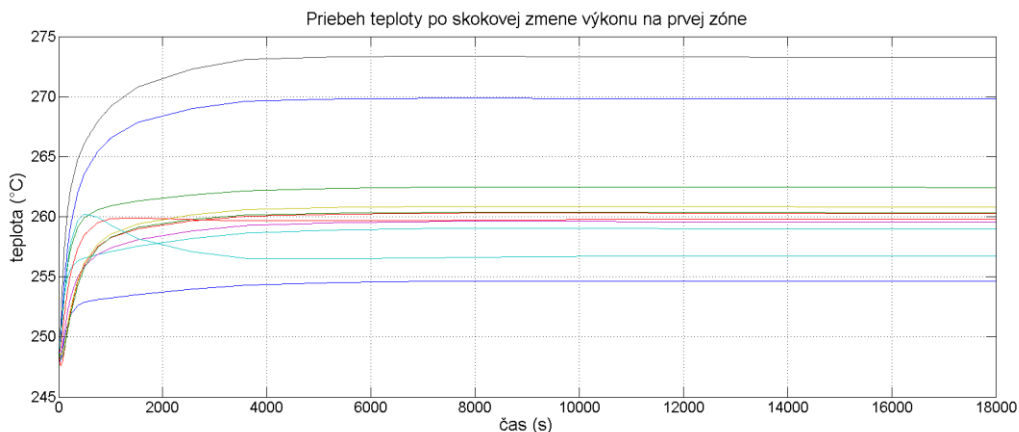
Obr. 7 Vytvorená sieť na forme.



Obr. 8 Ustálené teplotné pole formy.



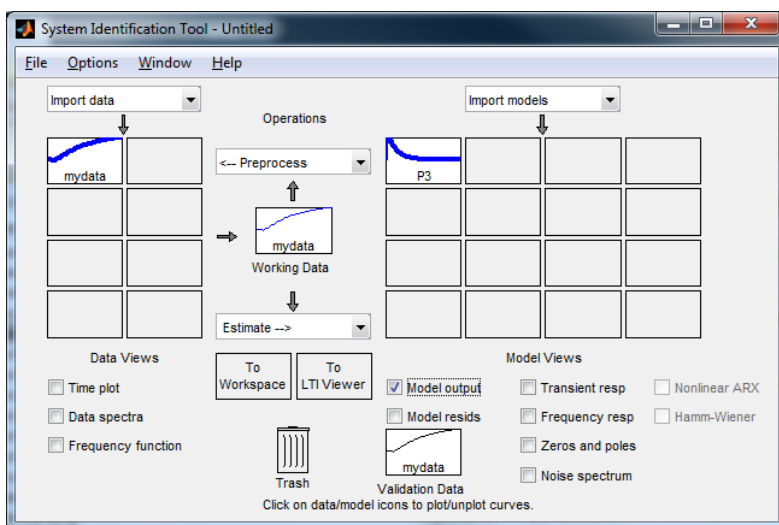
Obr. 9 Ustálená teplota v meracích bodoch.



Obr. 10 Pribeh teploty v meracích bodoch po zvýšení výkonu na prvej zóne.

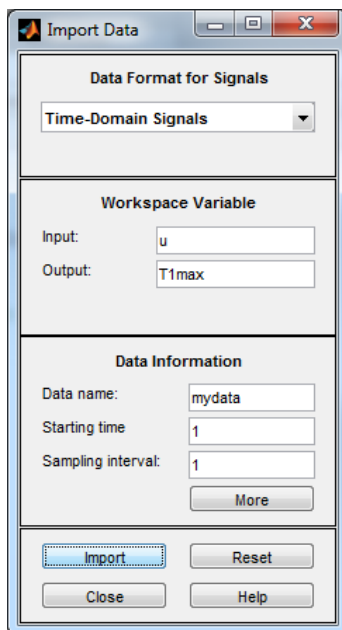
5 IDENTIFIKÁCIA V SOFTVÉROVOM PROSTREDÍ MATLAB

Po vykonaní simulácií v Prostredí COMSOL Multiphysics boli dáta načítané pomocou LiveLinku COMSOL with MATLAB do programu MATLAB. Následne boli prechodové charakteristiky identifikované pomocou Identification toolbox v programe MATLAB vid' Obr. 11. Aby mohli byť prechodové charakteristiky získané zo simulácie v COMSOL Multiphysics identifikované v programe MATLAB, musela byť z každej matice prechodových charakteristík vybraná prechodová charakteristika s najrýchlejšou dynamikou. Až tá bola následne identifikovaná v Identification toolbox.



Obr. 11 Identification Toolbox.

Na Obr. 12 je vidno načítanie prechodovej charakteristiky. K načítaniu prechodovej charakteristiky je potrebný aj vstupný signál ktorý nám prechodovú charakteristiku vytvoril. Náš vstupný signál bol jednotkový skok, ktorého veľkosť bola 20%-tný nárast výkonu oproti jeho pôvodnej hodnote vid' Tabuľka 1.

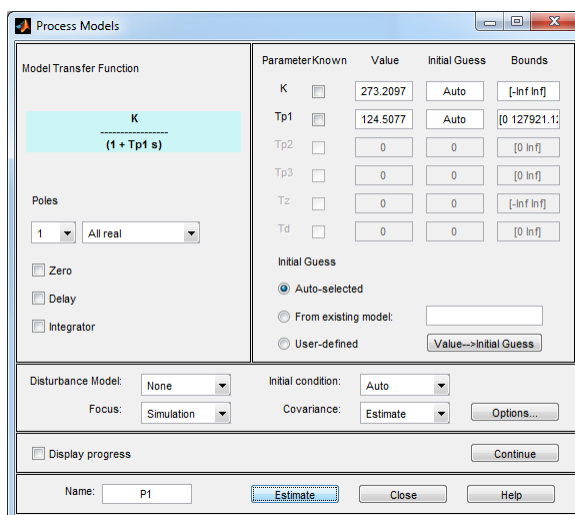


Obr. 12 Import identification toolbox

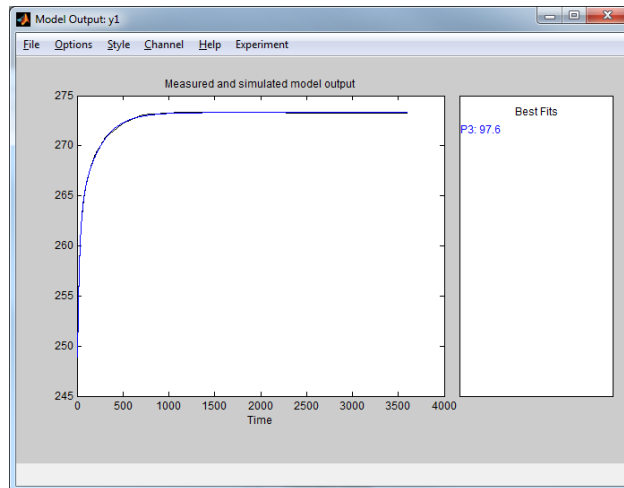
Úlohou v Identification toolbox bolo nájsť koeficienty prenosu sústavy. Sústavu reprezentujú prechodové charakteristiky získané zo simulácií v COMSOL Multiphysics. Koeficienty sme hľadali pre prenos v tvare:

$$\frac{K}{(1 + T_{p1}s)} \quad (5.1)$$

Na Obr. 13 vidíme nastavenie pre odhad koeficientov nášho prenosu. Na nasledujúcom obrázku Obr. 14 je vidno že odhad parametrov modelu je takmer totožný s našim modelom. Zhoda týchto dvoch modelov je 97,6 %, [3].



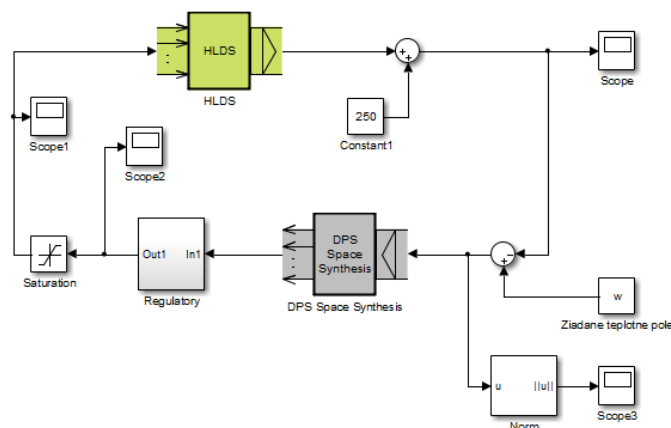
Obr. 13 Nastavenia pre odhad parametrov a odhadnuté parametre



Obr. 14 Výstupné porovnanie pôvodného a odhadnutého modelu

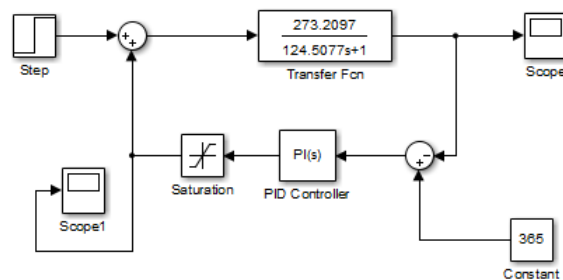
6 NÁVRH RIADENIA POMOCOU DPS Blockset

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. 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. Ďalším dôležitým blokom je DPS Space Synthesis v tomto bloku prebieha priestorová syntéza nakoľko žiadaná hodnota je vektor o rozmere 11×1 a aj výstup z HLDS má rozmer 11×1 v našom prípade tak je potrebná priestorová syntéza nakoľko máme 5 PI regulátorov v časovej syntéze. Blok Space Synthesis nám priestorovou syntézou upraví regulačnú odchýlku do požadovaného tvaru pre časovú syntézu.



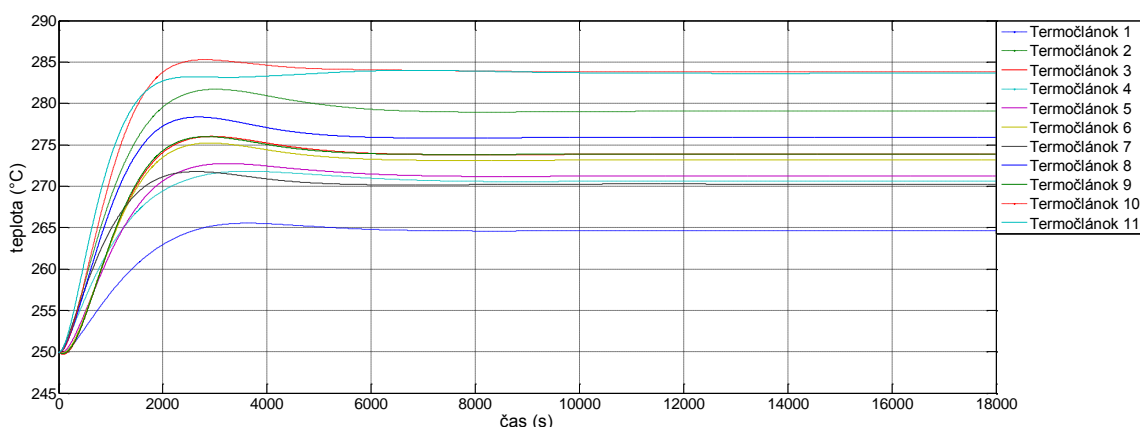
Obr. 15 Schéma riadenia s DPS Blockset.

Na Obr. 15 vidíme schému riadenia. Blok HLDS nám nahrádza pri simulácii formu. Vo vnútri bloku sa nachádzajú prechodové charakteristiky získané zo simulácií v programe COMSOL Multiphysics a tento blok nám plnohodnotne nahrádza reálne zariadenie. Vďaka získaným prechodovým charakteristikám sa správa ako skutočná zlievarenská forma. Keďže prechodové charakteristiky boli vykonané okolo pracovného bodu, ktorý bol stanovený na 250°C , tak aj v obvode riadenia musí byť prirátaná konštanta 250°C . Konštantu treba prirátat' z dôvodu, že blok HLDS, ktorý má v sebe prechodové charakteristiky ich automaticky posúva na začiatok súradného systému a berie do úvahy ich dynamiku, preto sa potrebujeme posunúť na pracovnú teplotu ináč by nami nastavené regulátory nepracovali správne. Ďalej je v obvode použitá saturácia výstupného signálu z regulátorov. Akčný zásah regulátorov je potrebné orezať z dôvodu, že ovládanie vyhrievacích telies pracuje s napäťovým signálom s rozsahom 0 až 10 V.



Obr. 16 Schéma ladenia parametrov PI regulátorov.

Nastavenie parametrov regulátorov prebehlo podľa schémy ktorú je vidno na Obr. 16. Do bloku Transfer function boli zadané parametre prenosu získané z Identification toolbox. Keďže je každá zóna ovládaná zvlášť tak aj nastavenie proporciálnej a integračnej zložky regulátorov prebiehalo pre každú zónu zvlášť. Nastavenie parametrov regulátorov bolo spravené pomocou bloku PID Controller, v ktorom sa po otvorení nachádza možnosť naladenia parametrov automaticky. Následne systém ponúkne užívateľovi výsledok odhadu parametrov a užívateľ sa môže rozhodnúť či je daný priebeh vyhovujúci alebo môže zmeniť čas za ktorý sa systém ustáli. Pre správne nastavenie musí užívateľ poznať základy automatického riadenia a správne sa rozhodnúť aby bol výsledný účinok regulátora správny.



Obr. 17 Výsledný priebeh teploty pri regulácií.

Na obrázku Obr. 6.3 vidno výsledný priebeh z regulácie teploty na požadovanú teplotu. Nami požadované teplotné pole bol vektor žiadanych teplôt na daných termočlánoch w .

$$w = [270 \ 270 \ 275 \ 270 \ 270 \ 275 \ 270 \ 270 \ 275 \ 280 \ 285]^\circ\text{C}.$$

Dosiahnutá ustálená teplota sa pohybuje okolo požadovanej hodnoty, čo vyhovuje požiadavkám technológie, [4].

7 Záver

V článku je popísaný postup pri návrhu riadenia predohrevu mechatronickej zlievarenskej formy ako systému s rozloženými parametrami. Aktuálne je forma riadená v reálnom čase pomocou meracích kariet v programe MATLAB & Simulink. Aktuálne sa pracuje aj na návrhu riadenia pomocou PLC systému. Dôvod voľby PLC systému oproti meracím kartám je vtom, že PLC systémy sú bližšie priemyslu a sú v priemysle bežne používané a aj cenovo dostupnejšie. Do budúca je vízia, že forma bude ovládaná len pomocou PLC systému a klasický PC nebude potrebný pre riadenie formy, či už predohrevu alebo chladenia pri odlievaní.

Pod'akovanie

Tento článok vznikol vďaka projektu APVV-0131-10 „High-tech riešenia pre technologické procesy a mechatronické komponenty ako riadené systémy s rozloženými parametrami“. Ďalej 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] 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] System Identification Toolbox : User's Guid, www.mathworks.com, 2014
- [4] HULKÓ, G. et al.: Distributed Parameter Systems Blockset for MATLAB & Simulink. DPS Blockset for MATLAB & Simulink. Program CONNECTIONS of The MathWorks - partner produkt spoločnosti The MathWork. Bratislava – Natick, 2003-2012. www.mathworks.com/products/connections/product_detail/product_35800.html

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. 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