

SIMULÁCIA RIADENIA INDKUČNÉHO OHREVVU AKO SYSTÉMU S ROZLOŽENÝMI PARAMETRAMI V PROSTREDÍ MATLAB/SIMULINK

J. Camber, J. Kapusta, G. Hulkó

Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Nám. slobody 17, 81231 Bratislava, Slovensko
(Tel: +421-2-57294-111, e-mail: juraj.camber@stuba.sk)

Abstrakt

Práca pojednáva o možnostiach riadenia segmentovaného priebežného indukčného ohrevu železných polotovarov, ktorý je opísaný parciálnymi diferenciálnymi rovnicami, ktoré určujú indukované množstvo tepla v ohrievanom polotovare v priestorovom a v časovom rozložení. Teplotné pole v segmentovanom indukčnom ohreve je možné riadiť pomocou metódy rozložených parametrov v softvéri Matlab/Simulink, kde pre takéto deje bolo vytvorené rozhranie DPS Blockset. V Simulinku bol vytvorený riadiaci obvod ktorý obsahuje PI regulátory, ktoré sledujú teplotu vo vybraných desiatich bodoch a pomocou štyroch akčných veličín (prúdov v jednotlivých segmentoch induktora), po skokovej zmene požadovanej hodnoty, riadia teplotné pole na požadované hodnoty.

1 Matematický princíp

Princíp indukčného ohrevu spočíva v indukovaní prúdu rovnakej frekvencie, ale opačného smeru, ako má prúd prechádzajúci cievkou (induktorom), do ktorej je ohrievaný elektricky vodivý predmet vložený. Indukované prúdy (tzv. Foucaultove prúdy) ohrievajú predmet ohmickými stratami.

Hlavnými výhodami indukčného ohrevu sú jeho vysoká reprodukovateľnosť, vysoká efektívnosť, vysoká výnosnosť, automatizovateľnosť, veľmi krátka doba ohrevu, možnosť selektívneho ohrevu, možnosť voľby hĺbky ohrevu, zlepšenie kvality výroby, ako aj priaznivé ekologické a pracovné podmienky pri práci s takýmto zariadením. Medzi najnovšie trendy, ktoré zaviedla spoločnosť Inductoheat do priemyselnej praxe, patrí modulárny dizajn ohrievača. Ten poskytuje väčšiu flexibilitu pri ohreve polotovarov a zároveň šetrí elektrickú energiu vďaka vyššej efektívitve ohrevu. Tento druh ohrevu sa dá približne opísať pomocou kombinácie Maxwellových a Fourier-Kirchoffových rovníc v tvare:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = -\text{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H})$$

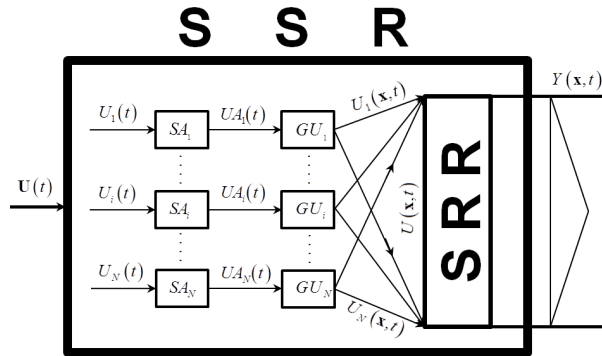
Takýto druh ohrevu poskytuje možnosť nasadenia pokročilého riadenia pomocou rozložených parametrov. Z pohľadu teórie systémov a riadenia sústavy modelované parciálnymi diferenciálnymi rovnicami chápeme ako systémy s rozloženými parametrami. Rozloženým parametrom pri tepelných systémoch rozumieme teplotu, ktorá je rozložená v priestore reálneho systému. Typickým príkladom takéhoto systému je aj indukčný ohrev polotovarov, v rámci ktorého pozorujeme rozloženie teplotného poľa: $Y(\mathbf{x}, t)$. Rozloženie teplotného poľa je dané vlastnosťami systému spolu s pôsobiacimi okrajovými a počiatočnými podmienkami. Vo vstupno-výstupnom ponímaní môžeme systém s rozloženými parametrami znázorniť ako objekt, ktorého rozložená výstupná veličina $Y(\mathbf{x}, t)$ je ovplyvňovaná rozloženou vstupnou veličinou $U(\mathbf{x}, t)$, kde priestorová koordináta $\mathbf{x}$ je prvkom oboru definície. Túto štruktúru systému znázorňujeme ako systém s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom (SRR)



Vo všeobecnosti môžeme vyjadriť výstup systému v tvare konvolutórneho súčinu,

$$Y(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \int_{\Omega} G(\mathbf{x} - \xi, t - \tau) U(\xi, \tau) d\xi d\tau$$

kde písmenom G označujeme Greenovu funkciu, reprezentujúcu časovo - priestorovú dynamiku systému v okolí zvoleného pracovného režimu. Riadenie systémov s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom predpokladá realizáciu rozloženého vstupu $U(\mathbf{x}, t)$. Táto realizácia prebieha prostredníctvom generátorov rozložených vstupných veličín v rámci systému so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom (SSR).



Obr. 2 Vnútna štruktúra systému so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom

$$U(t) = \{U_i(t)\}_{i=1, 2K \dots N}$$

– vektor sústredených vstupných akčných,

$$\{SA_i\}_{i=1, 2 \dots N}$$

– akčné orgány sústredených veličín,

$$\{UA_i(t)\}_{i=1, 2 \dots N}$$

– sústredené vstupné veličiny,

$$\{GU_i\}_{i=1, 2K \dots N}$$

– generátory rozložených vstupných veličín,

$$\{U_i(\mathbf{x}, t)\}_{i=1, 2K \dots N}$$

– rozložené vstupné veličiny,

$$U(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^N U_i(\mathbf{x}, t)$$

– celková rozložená vstupná veličina,

$$Y(\mathbf{x}, t)$$

– rozložená výstupná veličina.

Uvažovaný tepelný systém je vo všeobecnosti nelineárny a preto analýzu dynamiky vykonávame v linearizovanom okolí zvoleného pracovného režimu. Pre účely analýzy dynamiky boli pre 2D konečnoprvkový model odliatku vypočítané časovo-diskrétné odozvy $\{Y_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1..4}$ na skokové zmeny prietoku $\{U_i(k)=1\}_{i=1..4}$ v štyroch sekciách ohrevu. Odozvou systému na diskrétné jednotkové skoky $\{U_i(k)=1\}_{i=1..4}$ vstupných veličín pri tvarovačoch nultého rádu H získavame rozložené prechodové charakteristiky $\{H_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1..4}$. Na základe numericky počítaných rozložených prechodových a impulzných charakteristík rozložíme dynamiku skúmaného systému na časové a priestorové komponenty. V časovej závislosti z priebehov jednotlivých rozložených prechodových charakteristík $\{H_i(\mathbf{x}, k)\}_{i=1..4}$ vyberieme parciálne prechodové charakteristiky s maximálnymi amplitúdami $\{H_i(x_j, k)\}_{i,j=1..4}$, kde koordináty maximálnych parciálnych prechodových charakteristík sú $\bar{x} = \{x_j\}_{j=1..4} \subseteq \Omega$. Priradíme týmto parciálnym prechodovým charakteristikám spojité, resp. diskrétné prenosové funkcie: $\{S_i(x_j, s)\}_{i,j=1..4}$, resp. $\{SH_i(x_j, z)\}_{i,j=1..4}$, ktoré reprezentujú časovú zložku dynamiky vyšetřovaného systému. V priestorovej závislosti určme redukované priebehy rozložených prechodových charakteristík v ustálenom stave

$$\left\{ H_{R_i}(\mathbf{x}, \infty) = \frac{H_i(\mathbf{x}, \infty)}{H_i(x_j, \infty)} \right\}_{i,j=1..4},$$

$$\text{pričom } \{H_i(x_j, \infty)\}_{i,j=1..4} \neq 0.$$

Ďalej priebehy rozložených impulzných charakteristík

$$\left\{ \mathcal{G}^{\text{HR}}_i(\mathbf{x}, \infty) = \frac{\mathcal{G}^{\text{H}}_i(\mathbf{x}, \infty)}{\mathcal{G}^{\text{H}}_i(x_j, \infty)} \right\}_{i,j=1,4},$$

pričom $\left\{ \mathcal{G}H_i(x_j, \infty) \right\}_{i,j=1..4} \neq 0$. Redukované priebehy čiastkových rozložených výstupných veličín sú v tvare

$$\left\{ YR_i(\mathbf{x}, k) = \frac{Y_i(\mathbf{x}, k)}{Y_i(x_j, k)} = \frac{\cancel{\mathcal{G}}H_i(\mathbf{x}, k) \oplus U_i(k)}{\cancel{\mathcal{G}}H_i(x_j, k) \oplus U_i(k)} \right\}_{i=1}^4,$$

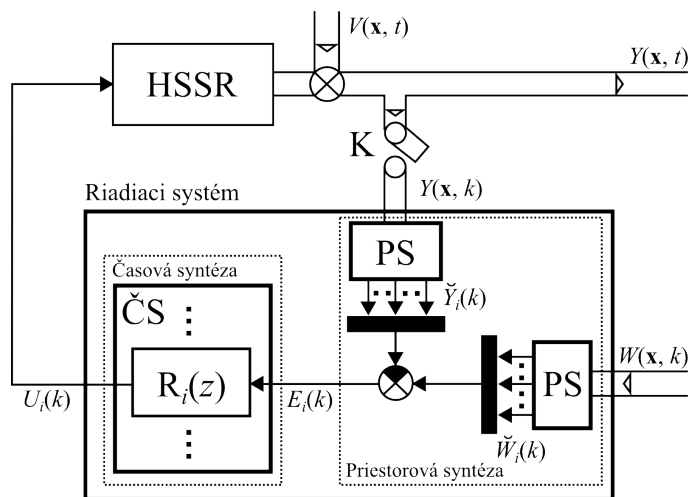
pričom $\left\{Y_i(x_j, k)\right\}_{i, j=1..4} \neq 0$. Tieto charakteristiky na úrovni $\bar{x} = \left\{x_j\right\}_{j=1..4} \subseteq \Omega$ nadobúdajú hodnoty:

- $\left\{ \nexists \text{HR}_i(\bar{x}, \infty) \right\}_{i=1..4} = \left\{ \nexists \text{HR}_i(x_j, \infty) \right\}_{i,j=1..4},$
- $\left\{ \text{HR}_i(\bar{x}, \infty) \right\}_{i=1..4} = \left\{ \text{HR}_i(x_j, \infty) \right\}_{i,j=1..4},$
- $\left\{ \text{YR}_i(\bar{x}, k) \right\}_{i=1..4} = \left\{ \text{YR}_i(x_j, k) \right\}_{i,j=1..4}.$

Úlohou riadenia procesu plynulého odlievania je eliminácia rozložených poruchových veličín ako aj nastavovanie teplotných polí v okolí zvoleného pracovného režimu. Označme žiadanú zmenu teplotného poľa vzhľadom k zvolenému pracovnému režimu ako $W(\mathbf{x}, k)$. Potom syntéza riadenia v priestorovej závislosti

$$\min_{W_i} \left\| W(\mathbf{x}, k) - \sum_{i=1}^5 W_i(k) \text{HR}_i(\mathbf{x}, \infty) \right\|$$

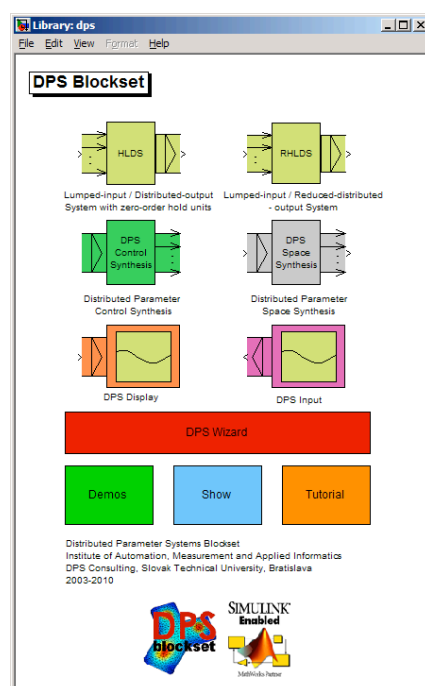
dáva vektor žiadaných veličín $\{\dot{W}_i(k)\}_{i=1..4}$, kde v intenciách teórie aproximácie výraz $WO(\mathbf{x}, k) = \sum_{i=1}^4 \dot{W}_i(k) \cdot HR_i(\mathbf{x}, \infty)$ predstavuje najlepšiu aproximáciu žiadanej veličiny. Jednotlivé zložky vektora žiadaných veličín vstupujú na riadiace členy jednoparametrových riadiacich obvodov $\{R_i(z)\}_{i=1..5}$ navrhnutých k prenosovým funkciám $\{SH_i(x_j, z)\}_{i=1..4}$.



Obr. 3 Spätnoväzbový obvod riadenia s rozloženými parametrami.

HSSR je systém so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom s tvarovačom nultého rádu H . Riadiaci systém obsahuje blok časovej syntézy ČS s regulátormi $\{R_i(z)\}_i$, ktoré generujú vektor sústredených vstupných veličín $\{U_i(k)\}_i$. Tieto regulátory sú navrhnuté v jednoparametrových regulačných obvodoch k časovým zložkám dynamiky riadeného systému $\{SH_i(x_j, z)\}_{i,j=1..4}$. Bloky priestorovej syntézy PS riešia úlohu aproximácie aktuálne meranej rozloženej výstupnej veličiny $Y(\mathbf{x}, k)$ a žiadanej rozloženej veličiny $W(\mathbf{x}, k)$ v kroku k . Rozložená poruchová veličina $V(\mathbf{x}, t)$ náhodne ovplyvňuje spojitú rozloženú výstupnú veličinu $Y(\mathbf{x}, t)$.

Pre softvérovú podporu úloh modelovania a riadenia systémov s rozloženými parametrami na Ústave automatizácie, merania a aplikovanej informatiky Sjf STU v Bratislave bol vyvinutý DPS Blockset pre MATLAB/Simulink ako partnerský produkt spoločnosti The MathWorks, Inc. Prostredie DPS Blocksetu vďaka prepojeniu s MATLAB-om ponúka široké možnosti pre inžinierske výpočty. V súčasnosti sú vyvíjané nové súčasti DPS Blocksetu, ktoré umožňujú priame prepojenie medzi špecializovaným výpočtovým softvérovým prostredím a softvérom MATLAB. Pre potreby prepojenia medzi prostredím ProCAST a MATLAB vznikol blok, ktorý umožňuje vykonávať štúdie modelovania a riadenia tepelných procesov v kosimulačnom režime.

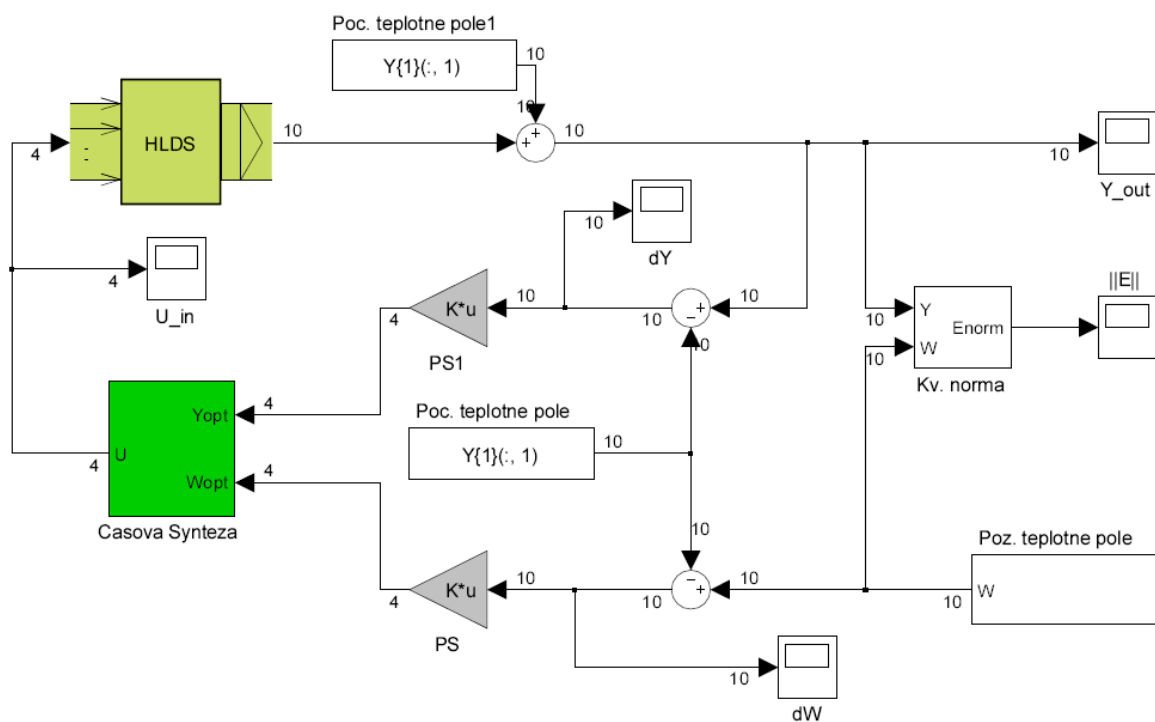


Obr.4. DPS Blockset menu

2 Výsledky

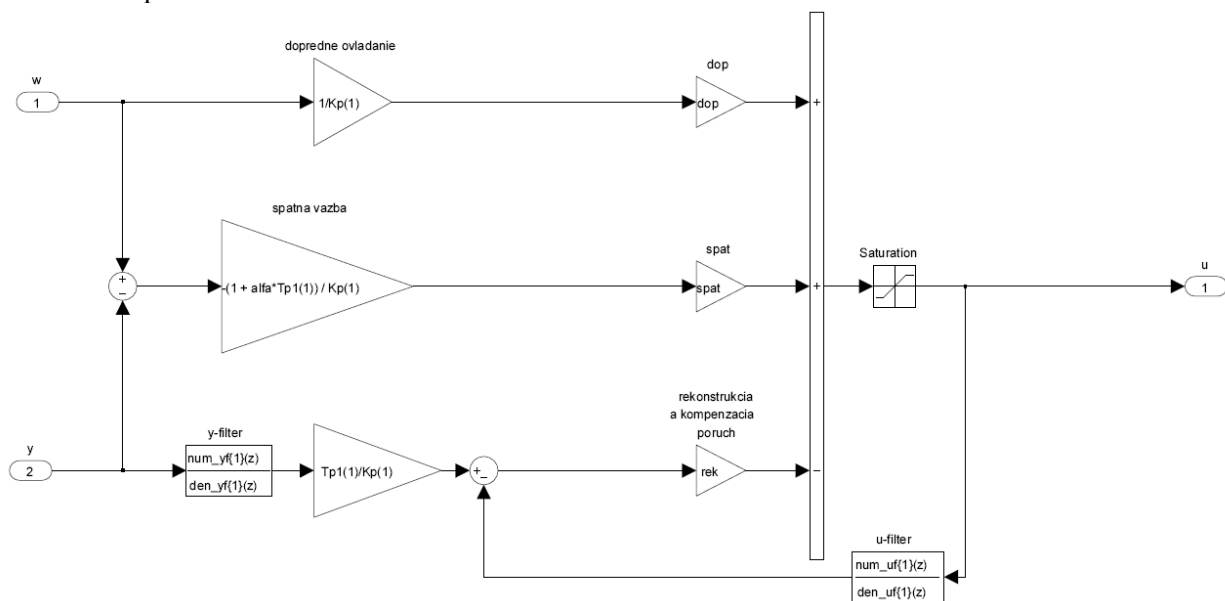
Pre úlohu riadenia indukčného ohrevu, bol vytvorený MKP model v prostredí COMSOL, tento model bol využitý na identifikáciu deja pre potreby riadenia, v modeli bol simulovaný skok jednotlivých prúdov v častiach induktora o desať percent. Na základe tejto zmeny, ktorá nastala v teplotnom poli bola vyšetrená dynamika pomocou rozhrania System Identification Toolbox. Na základe týchto prechodových charakteristík jednotlivých odoziev bola vygenerovaná dynamika ohrevu, ktorá vstupuje ako premenná do bloku HLDS.

Spätnoväzbový riadiaci obvod vid'. Obr. 3 sa skladá z matice dynamiky respektíve riadeného systému v bloku HLDS a regulačnej časti ktorá sa delí na priestorovú a časovú syntézu.



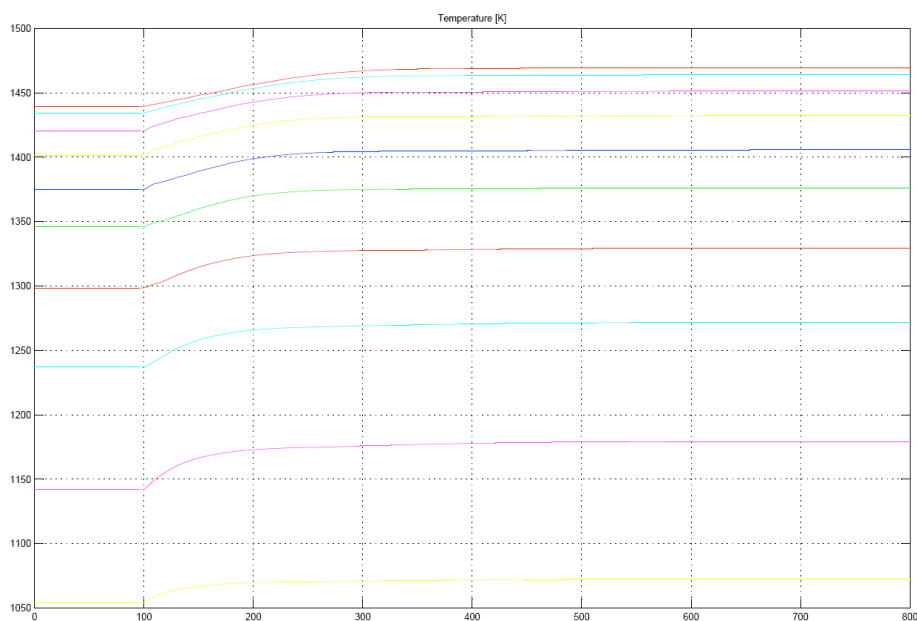
Obr.5. Riadiaci obvod v prostredí Matlab/Simulink s využitím DPS Blockset toolboxu

Pri návrhu riadenia bola navrhnutá zvýšenie požadovaného teplotného poľa o 30K v desiatich vybraných bodoch, táto zmena je vykonávaná na základe akčného zásahu štyroch PI regulátorov, ktoré sa nachádzajú v podsystéme časovej syntézy. Tieto regulátory boli navrhnuté pomocou metódy umiestnenia pólov.



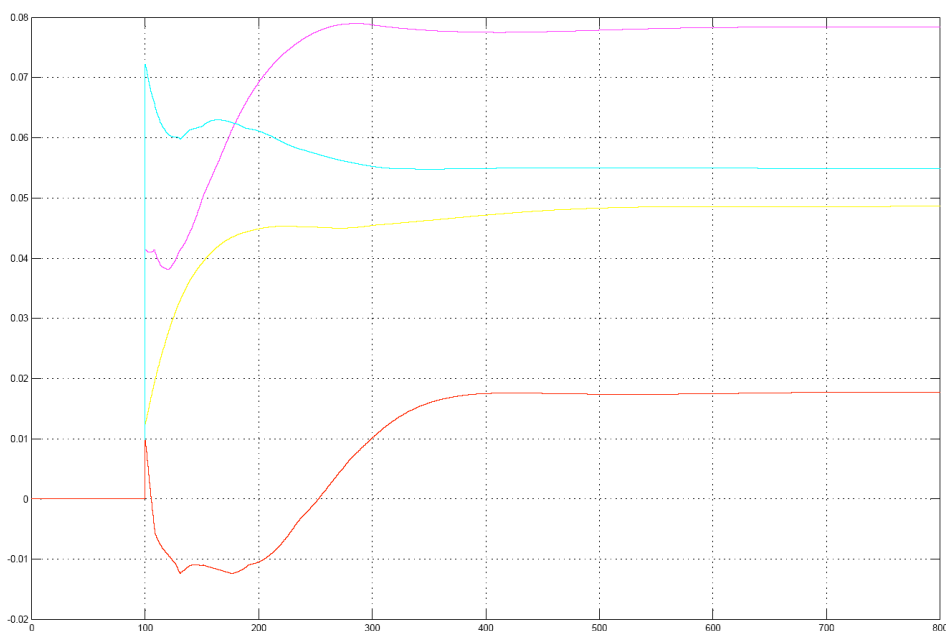
Obr. 6. Zapojenie vybraného regulátora v riadiacom obvode.

Po skokovej zmene požadovanej teploty o 30K, kde tento skok bol vykonaný v čase 100s, sa teplotné pole ustálilo po približne 400s, čo približne odpovedá prechodu polotovaru cez celú dĺžku induktora.



Obr. 7. Priebeh zmeny ustáleného stavu v čase vo vybraných desiatich bodoch.

Táto zmena sa vykonávala pomocou štyroch aktuátorov, ktoré menili prúd v percentách v jednotlivých cievkach v ohreve, na základe prepočtu z jednotlivých regulátorov.



Obr. 8. Vplyv regulátora ako akčného člena na riadený systém.

Daná simulácia ukazuje, že je možnosť riadiť aj takýto zložitý systém pri použití riadenia na základe rozložených parametrov. Do budúcnosti je ambícia nahradiť blok HLDS priamo simuláciu v prostredí COMSOL, ktorá bude počítat s premennými z Matlab/Simulink a poslednom rade sa nahrad tento blok reálnym systémom.

3 Pod'akovanie

Článok vznikol pri podpore v rámci grantov: VEGA 1/0138/11 "Riadenie dynamických systémov reprezentovaných numerickými štruktúrami ako sústav s rozloženými parametrami" a APVV-0131-10 „High-tech riešenia pre technologické procesy a mechatronické komponenty ako riadené systémy s rozloženými parametrami" ako aj Európskej Únie - European Social Fund, grant TAMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001.

4 Literatúra

G. Hulkó, M. Antoniová, C. Belavý, J. Belanský, J. Szuda, P. Végh. : *Modelovanie, riadenie a návrh systémov s rozloženými parametrami s demonštráciami v prostredí Matlab*. Vydavateľstvo STU v Bratislave. ISBN: 80-227-1052-0, Bratislava, Slovenská republika 1998.

LANGER, E.: *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha: Academia 1979. 319s.

P. Buček.: *Modelovanie a riadenie systémov mechaniky kontinua*, Písomná práca k dizertačnej skúške, SĽF STU Bratislava 2007

K. Ondrejko, P. Buček, et al., Control of continuous casting processes as distributed parameter systems. Proceedings of METEC InSteelCon 2011, 7-th European Continuous Casting Conference. Düsseldorf (2011).