

SOFTVÉROVÉ NÁSTROJE PRE RIADENIE ZARIADENIA PLYNULÉHO ODLIEVANIA OCELE

Michal Bartko, Lukáš Bartalský, Gabriel Hulkó

Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Strojnícka fakulta

Abstrakt

Práca je zameraná na využívaní softvérových prostredí analyzujúcich dynamiku systémov s viacrozmernými parametrami pre riešenie úlohy riadenia plynulého odlievania ocele. Za pomoci softvéru ProCAST je možné simulovať správanie tepotného poľa v odliatku, pričom správnosť je overovaná priamym meraním pomocou pyrometrov na odliatku v piatich bodoch. Počas riadenia vykonávaného vo výpočtovom prostredí MATLAB – Simulink sa spracováva obrovské množstvo dát a tým sa zvyšujú nároky na výpočtovú techniku, čo je riešené použitím technológie CUDA GPGPU na zrýchlenie výpočtových procesov aby priebeh riadenia fungoval v reálnom čase.

1 ÚVOD

Práca sa sústreďuje na riadenie plynulého odlievania ocele ako systému s rozloženými parametrami opísaného nelineárnymi parciálnymi diferenciálnymi rovnicami. Na takéto riadenie je nutné použiť softvérové prostredie na viacrozmerovej úrovni pre dynamickú analýzu systému mechaniky kontinua, z ktorých získané časovo – priestorové dynamické charakteristiky umožňujú formulovať a riešiť úlohy riadenia tejto sústavy. ProCAST je softvérové prostredie, ktoré ponúka možnosť simulácie tepotného poľa v celom objeme odliatku počas procesu odlievania. Zároveň sa vykonávajú merania pomocou piatich pyrometrov na piatich bodoch sekundárnej časti zariadenia plynulého odlievania ocele a získavané hodnoty sa porovnávajú so simulovanými pre korekciu výsledkov simulácií. Na úlohu riadenia je využívaný Distributed Parameter Systems Blockset (DPS), rozpracovaný na Ústave automatizácie, merania a aplikovanej informatiky na Strojníckej fakulte Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, ktorý funguje vo výpočtovom prostredí MATLAB – Simulink. Spolu s technológiou využívania procesorových jadier na grafickej karte CUDA GPGPU od firmy NVIDIA sa rapídne znižuje čas potrebný nie len na numerické výpočty, čo umožňuje aby celý proces bežal v reálnom čase napriek veľkému množstvu dát potrebných na spracovávanie v každom kroku.

2 SYSTÉMY S ROZLOŽENÝMI PARAMETRAMI

Technologické a výrobné procesy matematicky opísané lineárnymi diferenciálnymi rovnicami (PDR) patria medzi systémy mechaniky kontinua. Sú to systémy s rozloženými parametrami (SRP) v linearizovaných okoliach zadaných ustálených pracovných režimoch, v ktorých sa zmeny ich parametrov (napríklad teplota) dejú aj v čase aj v priestore (po celej dĺžke, ploche alebo objeme). Podľa vstupno – výstupnej relácii sa jedná o systémy s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom (SRR), znázornené na Obr. 1.



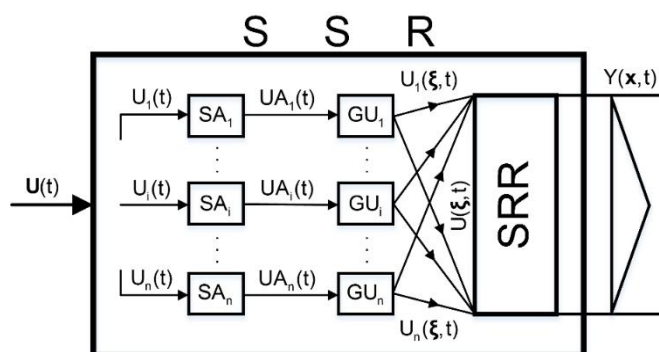
Obr. 1: Systém s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom

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

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

SRR – systém s rozloženým vstupom a rozloženým výstupom.

Po pripojení aktuátorov a generátorov rozložených vstupných veličín k SRR vzniká systém so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom (SSR), Obr. 2, alebo zjednodušene na 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 SRR.

$Y(\mathbf{x}, t) = Y(x, y, z, t)$ – 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.

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

Vo vstupno – výstupnej relácii celková rozložená výstupná veličina pri nulových počiatkových a okrajových podmienkach je daná

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

respektíve v diskretnom tvare

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

kde \otimes je znak konvolutórneho súčinu a \oplus je znak konvolutórneho súčtu, $\{U_i(t)\}_i$ a $\{U_i(k)\}_i$ sú spojité a diskkrétne sústredené vstupné veličiny, $\{G_i(\mathbf{x}, t)\}_i$ sú rozložené impulzné charakteristiky medzi i-tým vstupom a výstupom SSR, $\{G H_i(\mathbf{x}, k)\}_i$ sú diskkrétne rozložené impulzné charakteristiky medzi i-tým vstupom a výstupom SSR s tvarovačmi nultého rádu H: HSSR. Pritom

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

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

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

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

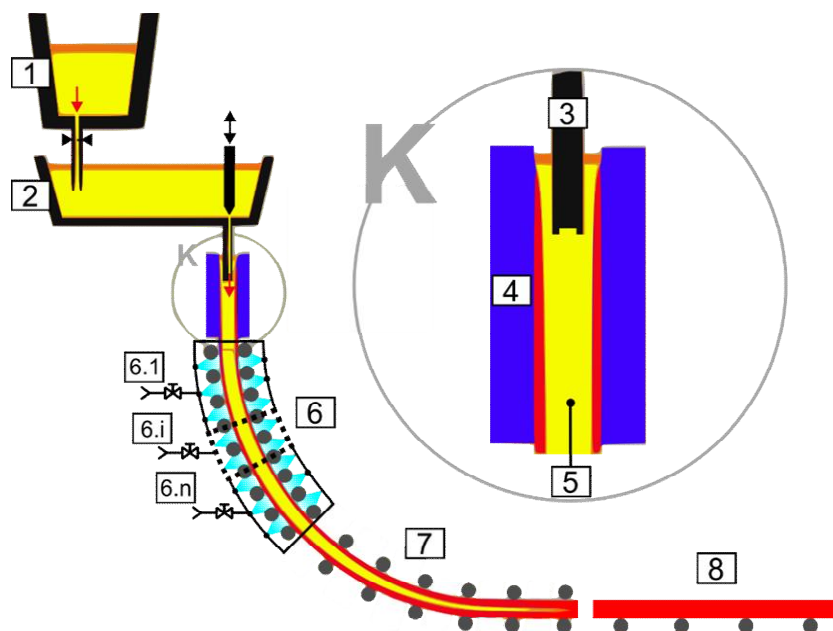
$$\{Y_i(\mathbf{x}, z) = S_i(\mathbf{x}, z) U_i(z)\}_i \quad (2.8)$$

3 ZARIADENIE PLYNULÉHO ODLIEVANIA OCELE

Existuje niekoľko konštrukčných prevedení zariadení plynulého odlievania (ZPO). V súčasnosti sa pre odlievanie ocele využíva najmä radiálny typ so zakriveným liacím prúdom, ako je vidieť na Obr. 4. Vďaka zakriveniu nie je potrebná výstavba vysokých a teda hlbokých halových konštrukcií, čo znižuje počiatočné náklady na výstavbu a uľahčuje manipuláciu s odliatkami. Rádius zakrivenia závisí od veľkosti a typu odlievaného profilu – iný je pre sochorové, iný pre bramové ZPO. Ústrednou časťou radiálneho ZPO je liacia plošina, na ktorej je umiestnený otočný stojan panvy a liací voz medziapanvy. Na plošine je prítomná obsluha, ktorá zodpovedá za čiastkové úlohy a dozerá na bezprostredný chod procesu.

Tekutá oceľ na odlievanie je privádzaná zo sekcie panvovej metalurgie v žiaruvzdornej nádobe – panve (1). Naplnená panva je umiestnená na otočný stojan zariadenia plynulého odlievania (ZPO). Na otočnom stojane dôjde k výmene pozícií s prázdnu panvou, ktorá je následne odvezená na opätovné naplnenie. Z panvy vyteká tekutá oceľ regulovaným spôsobom cez žiaruvzdornú tieniacu trubicu do medziapanvy (2). Medziapanva slúži počas odlievania ako akumulčný zásobník ocele s niekoľkými výtokovými otvormi, takzvanými výtokovými uzlami. Voľná hladina ocele v medziapanve je zasypaná tepelno-izolačnou troskou, ktorá chráni oceľ pred oxidáciou a viaže vyplavené nečistoty. Tým plní medziapanva okrem iného aj funkciu zachytávača nečistôt (napr. oxidov), čím priaznivo vplyva na čistotu odlievanej ocele.

K výtokovým uzlom medziapanvy sú pripevnené žiaruvzdorné ponorné trubice (3). Ich úlohou je chrániť tekutú oceľ pred opätovnou oxidáciou pri natekaní z medziapanvy do kryštalizátora (K). Voľná hladina ocele v kryštalizátore je kontinuálne zasypávaná vrstvou liacieho prachu, ktorý plní funkcie: termoizolačnú (chráni hladinu ocele pred predčasným stuhnutím), čistiacu (zachytáva vyplavené nečistoty) a mazaciu (znižuje trenie medzi odliatkou a kryštalizátorom). Hladinu ocele označujeme ako meniskus a je začiatkom metalurgickej dĺžky odliatku.



Obr. 4: Liaci prúd zariadenia plynulého odlievania radiálneho typu

Kryštalizácia ocele začína na chladných stenách kryštalizátora (4) bezprostredne pod hladinou – začína sa tvoriť tuhá fáza. Z kryštalizátora je konštantnou rýchlosťou vyťahovaný odliatok so stuhnutým povrchom (takzvanou liacou kôrou) a tekutým jadrom (5). Kryštalizátor vykonáva periodický oscilačný pohyb vo vertikálnom smere (amplitúda rádovo mm, frekvencia rádovo Hz), čo spolu s vrstvou roztaveného liacieho prachu prispieva k nízkym hodnotám trenia medzi odliatkom a kryštalizátorom.

Po opustení kryštalizátora vstupuje odliatok do sekundárnej chladiacej zóny (6), kde sa ochladzuje vodným alebo vodovzdušným ostrekom. Sekundárna chladiaca zóna (ďalej ako „sekundár“) je tvorená nezávislými sekciami dýz (6.1 až 6.n), ktoré umožňujú nastaviť požadovaný profil chladenia. Sekundár je umiestnený v uzavretej komore, pretože pri priamom ostreku povrchu odliatku vzniká veľké množstvo vodnej pary.

Nasleduje terciárny úsek (7), kde je odliatok voľne dochladzovaný na vzduchu. V tomto úseku dochádza k pozvoľnému uzatváraniu tekutého jadra a postupnému rovnaniu odliatku. Prechod zo zakriveného na rovný (horizontálny) tvar liacieho prúdu je uskutočnený postupne v ťažno-rovnacích stoliciach (ĎRS). Platí, že viac „medzirádiusov“ (polomerov zakrivenia liacieho prúdu) pri prechode z nominálneho zakrivenia do rovného prúdu kladne prispieva k zníženiu rizika praskania odliatkov pri rovnaní (na ZPO v Železiarňach Podbrezová a.s. je to sústava polomerov zakrivenia 9 m – 13 m – 21 m – ∞ m). Bod, v ktorom sa uzatvára tekuté jadro predstavuje koniec metalurgickej dĺžky. Po terciárnom úseku sú z liacieho prúdu rezané kusy odliatkov stanovenej dĺžky (8). Odrezaný odliatok putuje na chladník alebo na dohriatie a ďalšie spracovanie. Proces je teoreticky nekonečný, prerušuje sa zámerné, buď z technologických dôvodov (napríklad opotrebovanie jednotlivých súčastí), alebo ekonomicko – plánovacích dôvodov (zmena odlievanej chémie, zmena odlievaného profilu). Neplánované prerušenie odlievania môže byť spôsobené napríklad poruchami stroja, opotrebovaním jednotlivých súčastí (erózia ponornej trubice alebo iné), respektíve problémov v úseku výroby a spracovania ocele).

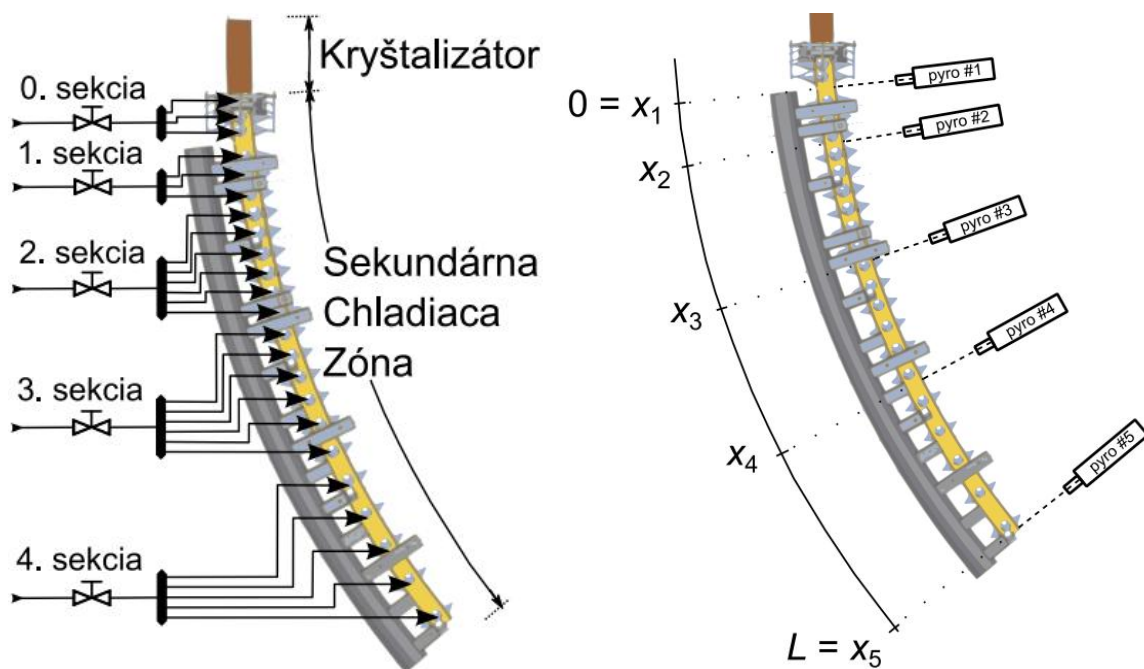
4 NÁVRH RIADENIA OCHLADZOVANIA V SEKUNDÁRNEJ ZÓNE ZPO

Pre smulačné štúdie regulácie teplotných polí a kosimuláciu softvérových prostredí ProCAST a MATLAB – Simulink bol na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave (STUBA) vyvinutý Distributed Parameter Systems Blockset (DPS Blockset). ProCAST je vyvíjaný spoločnosťou ESI Group a na základe metódy konečných prvkov slúži ako simulačné prostredie aj pre technológiu

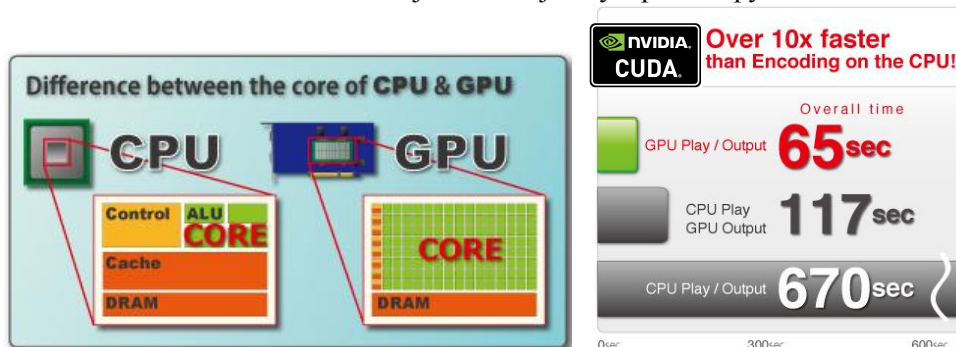
plynulého odlievania. ProCAST ponúka lepší náhľad do procesu riadenia a správania sa teplotných polí v celom objeme odliatku. DPS Blockset pre MATLAB – Simulink bol navrhnutý a vyvíjaný na Ústave automatizácie, merania a aplikovanej informatiky na Strojníckej fakulte, STUBA, ako časť programu MathWork's CONNECTIONS. Tieto softvérové nástroje pracujú na platforme Microsoft Windows, algoritmus kosimulácie v prostredí Simulink je implementovaný ako S-funkcia druhého stupňa a je dostupný v inštaláčnej zložke DPS Blockset.

Sekundárna chladiaca zóna je reprezentovaná ako systém so sústredeným vstupom a rozloženým výstupom a obsahuje viacero valcov kvôli smerovaniu odliatku po určenej dráhe odlievania, ďalej sú tu vodné trisky na chladenie odliatku zo všetkých štyroch strán a to v piatich sekciách a päť pyrometrov merajúcich teplotu povrchu odliatku na vnútornom priemere tiež v piatich bodoch hneď za každou sekciou chladiacích trisiek, Obr. 5. V minulom období boli získané dynamické charakteristiky namerané na ZPO v Železiarni Podbrezová a.s. a jeho numerický model bol overený v prostredí ProCAST. Tieto dáta sú využívané pre účely simulácií riadenia uvedených v článku.

Pri práci s obrovským množstvom dát a mnohých výpočtov vznikajú aj nároky na výpočtovú technológiu. Preto sa používa technológia CUDA GPGPU, s ktorou je možné numerické výpočty značne zrýchliť, respektíve skrátiť čas na ich vyriešenie, aby simulačný algoritmus pracoval v reálnom čase. Túto technológiu vyvíja firma NVIDIA a slúži na paralelné výpočtové procesy za pomoci procesorových jadier grafického čipu (GPU) na grafickej karte a využívať jej pamäťový priestor a výkon, ktorý by inak musela spracovávať a riešiť centrálna procesorová jednotka (CPU) počítača. Rozdiel medzi používaním CPU alebo (aj) GPU je možné vidieť na Obr. 6, kde vľavo je znázornené koľko výpočtového priestoru má k dispozícii procesor počítača a koľko grafická karta, čo je taktiež vyjadrené v číslach na pravo.



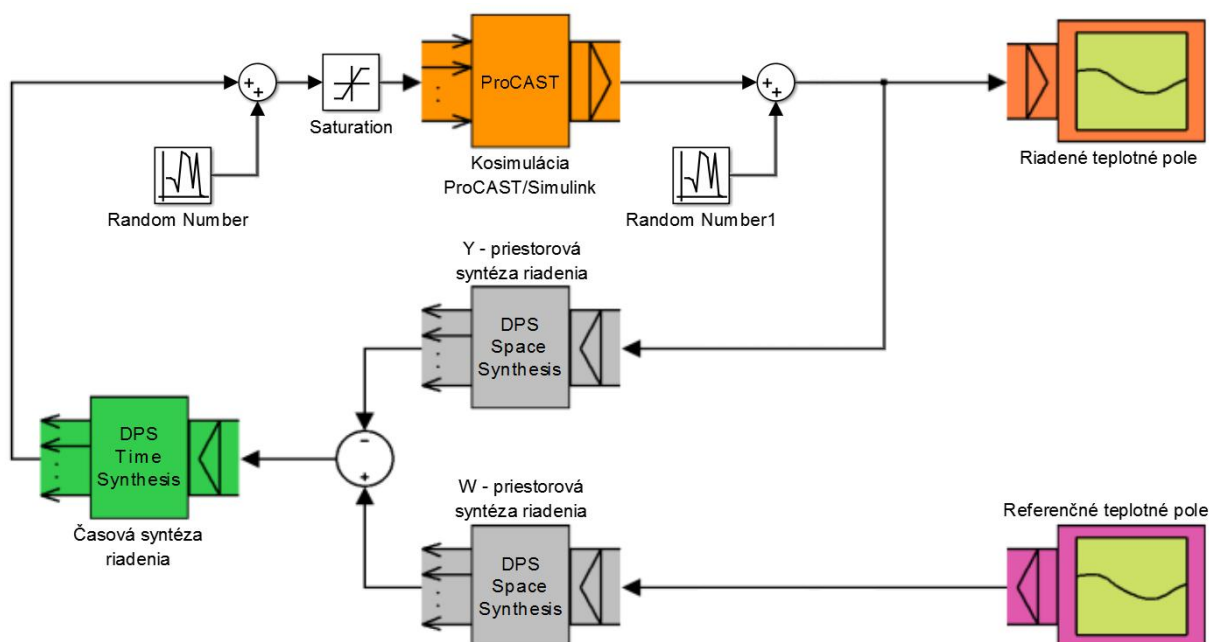
Obr. 5: Sekcie sekundárnej chladiacej zóny a pozície pyrometrov



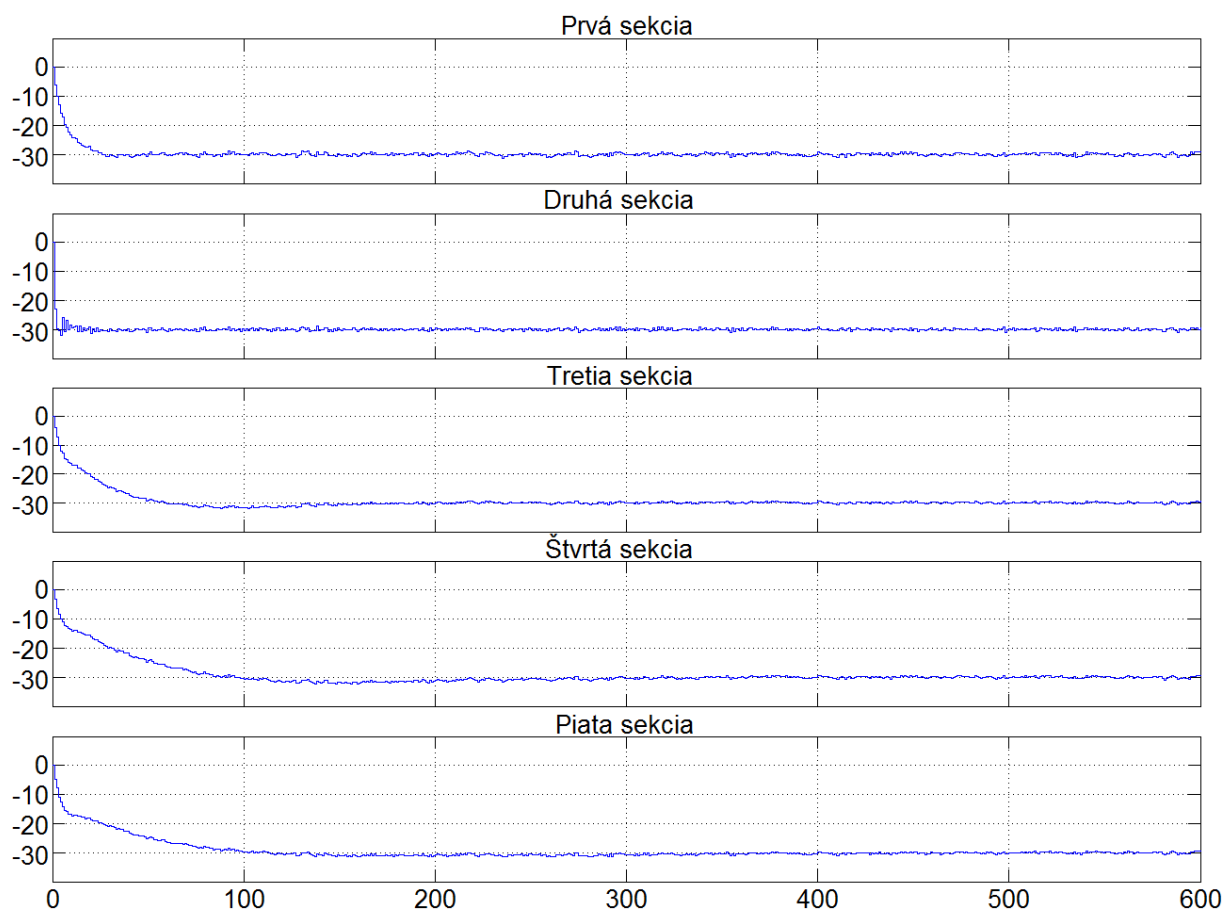
Obr 6: Rozdiel medzi CPU a GPU

Pre riadenie sekundárnej chladiacej zóny v priestore i čase je navrhnutý riadiaci algoritmus vo výpočtovom softvéri MATLAB – Simulink, kde sa využíva DPS Blockset, dáta simulované v prostredí ProCAST a technológia CUDA GPGPU. V práci je cieľ riadenia definovaný nasledovne: proces plynulého odlievania bude pre dané požadované teplotné pole v ustálenom stave, potom sa všetky hodnoty žiadaného teplotného poľa zmenia o 30°C (ochladí sa) a monitoruje sa výstupná teplota riadeného systému ako pomocou PID regulátorov sa dosiahne daný ustálený stav. Generátory náhodných čísel na vstupe i výstupe regulatívneho systému slúžia ako simulátory šumu, ktorý predstavuje nepresnosti merania pyrometrami (prostredie obsahuje množstvo pary a nečistôt) a taktiež nekonštantný prietok chladiacej vody na triskách počas celého času. Na Obr. 7 je schematické zapojenie simulačného algoritmu pre testovanie tohto typu riadenia. Na Obr. 8 sú zobrazené grafické výsledky simulácie, každá sekcia sekundárnej zóny je v jednom grafe, pričom hodnoty v nule predstavujú začiatkový ustálený stav a zmena na druhý stav je už v prvom kroku.

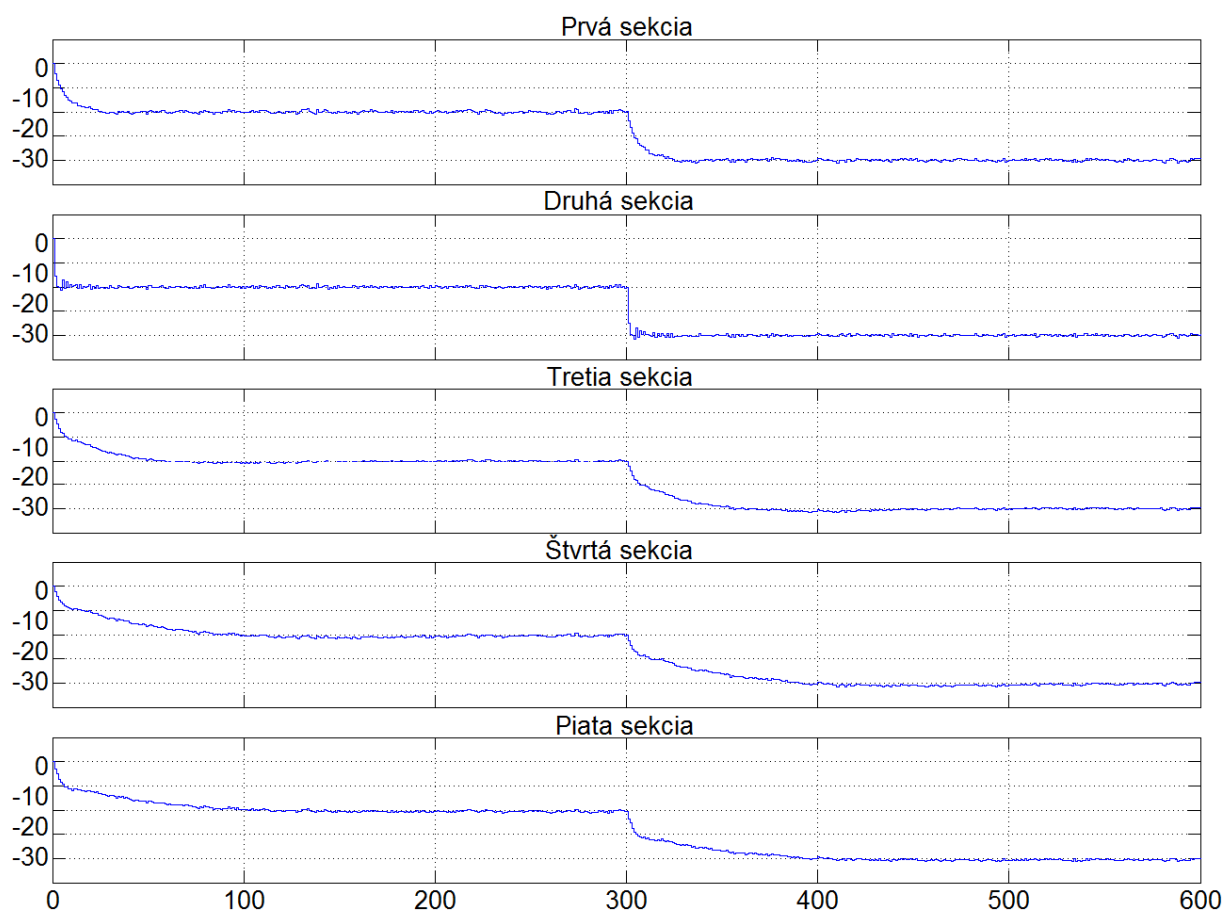
Ďalším testom sa overuje schopnosť simulačného algoritmu dosiahnuť ustáleného stavu aj ak zmeny žiadanej hodnoty sa zmenia niekoľkokrát počas priebehu. Na Obr. 9 sú vyobrazené výsledky pri zmene požadovaného teplotného poľa o -20°C v prvom kroku a znova o -20°C v kroku 300, konečné ochladenie je 40°C. Na Obr. 10 sú grafy ak zmeny nastanú v prvom kroku o -20°C, v kroku 200 o ďalších -20°C a v kroku 400 znova o ďalších -20°C, na konci je teda pokles o 60°C.



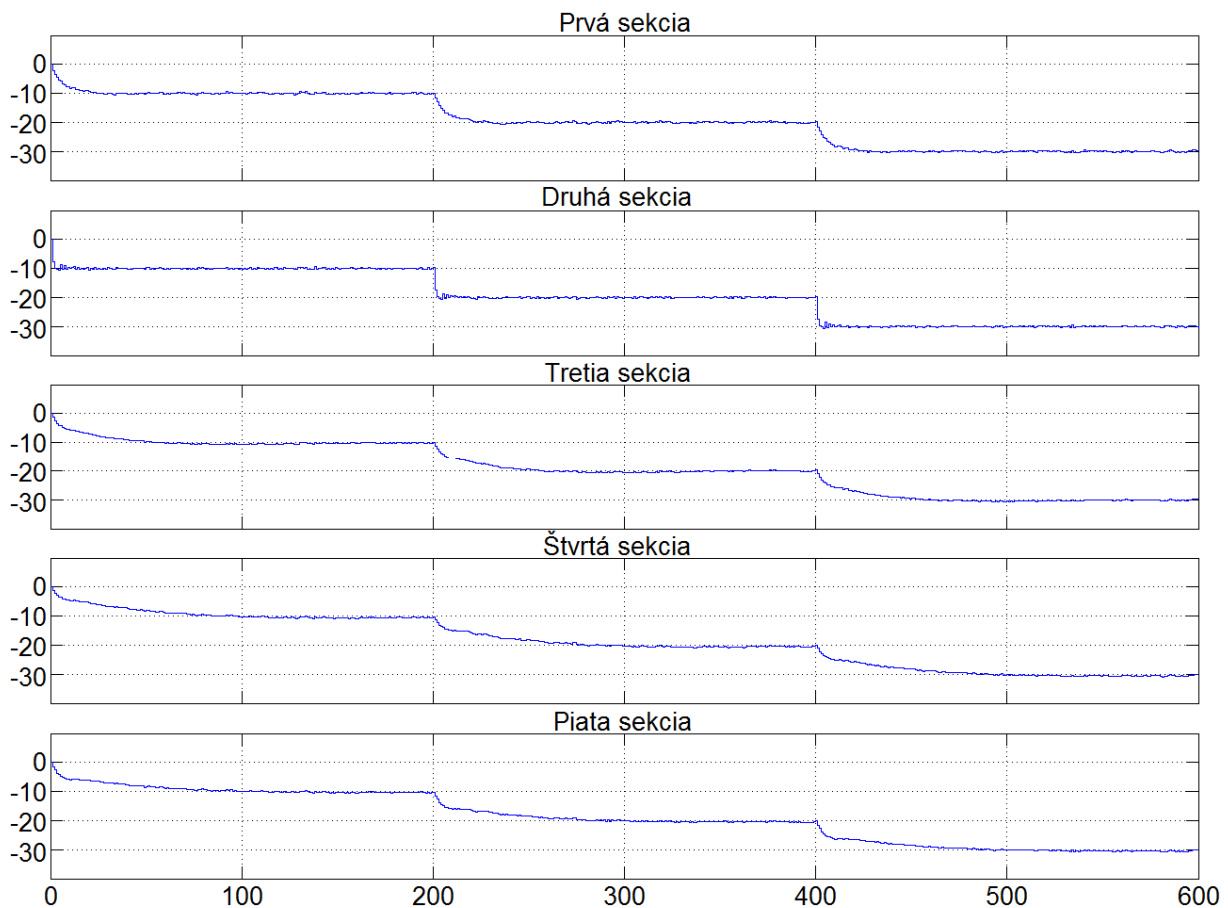
Obr. 7: Schéma kosimulácie paralelnej komunikácie ProCAST a DPS Blockset v softvérovom prostredí MATLAB – Simulink



Obr. 8: Výsledky simulácie pri jednom poklese o 30°C



Obr. 9: Výsledky simulácie pri poklese dvakrát 20°C



Obr. 10: Výsledky simulácie pri poklese trikrát 20°C

5 Vyhodnotenie

Použitím softvérových nástrojov MATLAB – Simulink spolu s knižnicou DPS Blockset a ProCAST na simuláciu plynulého odliavania ocele podáva možnosti nahliadnuť do procesu detailnejšie a získať informácie, ktoré z meraní nie je možné dostať. S ich pomocou je možné zlepšiť riadenie zariadenia plynulého odliavania a spolu s technológiou CUDA GPGPU taktiež umožniť spracovávanie veľkého množstva dát, ktoré pri systéme s rozloženými parametrami vznikajú, v reálnom čase. V práci je simulačne overená schopnosť navrhnutého simulačného algoritmu regulovať daný systém a v budúcnosti sa na základe predošlých simulácií a testov spôsob riadenia za použitia softvérových výpočtových a simulačných prostredí môže nahradiť zaužívaný systém regulácie nastavovaním hodnôt v procese pomocou tabuliek vytvorených na základe predošlých znalostí v tomto priemyselnom odvetví.

Ďalším cieľom je použiť prediktívne riadenie na základe modelu (Model Predictive Control) a priebežnú identifikáciu. Toto riadenie bude adaptívno – prediktívne samonastavujúce sa z parametrov získaných pomocou algoritmu priebežnej identifikácie v každom kroku, respektíve doby vzorkovania.

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] ONDREJKOVIČ, K. – BUČEK, P. – PYSZKO, R. – HULKÓ, G.: Control of Continuous Casting Processes as Distributed Parameter Systems. Proc. 7th European Continuous Casting Conference, Düsseldorf, 2011.

[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

[5] Nvidia. What is GPU accelerated computing? <http://www.nvidia.com/object/what-is-gpu-computing.html>

Ing. Michal Bartko

Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky, Strojnícka fakulta, slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Námestie Slobody 17, Bratislava, tel. (+421) 2 5249 7193, e-mail michal_bartko@stuba.sk

Ing. Lukáš Bartalský

Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky, Strojnícka fakulta, slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Námestie Slobody 17, Bratislava, tel. (+421) 2 5249 7193, e-mail lukas.bartalsky@stuba.sk

prof. Ing. Gabriel Hulkó, DrSc.

Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky, Strojnícka fakulta, slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Námestie Slobody 17, Bratislava, tel. (+421) 2 5249 7193, e-mail gabriel.hulko@stuba.sk