

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: P 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612V045 – Technická kybernetika

ŘÍZENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ POMOCÍ OHŘEVU INFRAČERVENÝMI ZÁŘIČI

Control of temperature field via infrared radiators

Ing. Petr Školník

Školitel: Doc. Ing. Osvald Modrlák, CSc.

Pracoviště: Ústav řízení systémů a spolehlivosti

Počet stran: 131

Počet příloh: 1

Liberec 2010

Anotace

Tato disertační práce se zabývá komplexním návrhem řídicího systému pro systém ohřevu výrobní linky na výrobu měkčených umělých kůží, pro kterou byla jako zdroj tepla zvolena soustava infračervených zářičů. Z hlediska řízení se jedná o návrh řízení rozsáhlého MIMO systému, který musí splňovat jak podmínky požadované kvality výrobků, tak i dodržet cenové limity na jeho pořízení a náklady spojené s výrobou jednotlivých výrobků. Jako výrobní nástroj je zde použita tvarově složitá výrobní forma, kterou je třeba vyhřát na teplotu definovanou použitou technologií. První část práce obsahuje rozbor vlivu polohy jednotlivých zářičů na rozložení teplot na formě a jejich dosažitelnost. Druhá část práce se zabývá tvorbou simulačního modelu systému ohřevu, jenž je vytvořen na základě naměřených dat z reálného zařízení. Součástí této části je návrh metodiky pro volbu optimální struktury řídicího systému teploty. Ve třetí části se práce zabývá výběrem, syntézou a implementací řídicího algoritmu, který umožní v rámci podmínek definovaných odběratelem dosáhnout optimálního teplotního pole výrobní formy. V závěru této části je pak provedeno ověření regulačního algoritmu a vyhodnocení dosažených výsledků na stroji pro prototypovou a pro malosériovou výrobu.

Klíčová slova:

MIMO

Technologie slush moulding

Kooperace PID

Teplotní pole

Měkčená umělá kůže

Annotation

This doctoral thesis deals with a complex control system design of the production line heating system used in manufacturing synthetic soft skins for which an infrared radiators system was selected as a heat source. The design concerns, from the control point of view, an extensive MIMO system control design which has to meet both the conditions of the required product quality as well as its purchasing price limits and expenses spent on manufacturing of each product. A complicated shape thin-wall form, which needs to be heated up at the temperature defined by the technology in-use, was used as the manufacturing tool. The first part of the thesis contains analysis of the effect of each radiator position on both the form temperature dispersion as well as its attainability. The second part of the thesis deals with the heating system model construction which is created on the basis of measured data obtained from real apparatus. A proposal of methodology for the optimal structure of the temperature control system is a component of this part of the thesis. The third part of this thesis deals with selection, synthesis and implementation of control algorithm which allows that the optimal temperature field of the manufacturing form can be reached within the conditions defined by the customer. Carrying out of the control algorithm verification and the acquired outcomes-based evaluation, for which a prototype and low-volume production machine was used, comprise the final part of this doctoral thesis.

Keywords:

MIMO

Slush moulding

Cooperation of PID

Temperature field

Artificial soft skin

Obsah

Anotace.....	2
Annotation	3
Obsah	4
1 Úvod	6
2 Současný stav problematiky	9
2.1 Výrobní technologie	9
2.2 Vyhřívání teplotních polí	9
3 Struktura zařízení	11
4 Cíle práce.....	12
5 Vlastní řešení	14
5.1 Analýza vlivu polohy zářičů	14
5.1.1 Simulace teplotního pole	14
5.1.2 Dosažitelnost ustálených stavů.....	15
5.2 Identifikace a tvorba modelu.....	16
5.2.1 Struktura zjednodušeného modelu	16
5.2.2 Identifikace.....	16
5.2.3 Přiřazení zářičů do regulační smyčky	18
5.2.3.1 Přiřazení čidel k zářičům podle maximálního statického zesílení.....	18
5.2.3.2 Přiřazení čidel k zářičům podle RGA.....	19
5.2.3.3 Přiřazení čidel k zářičům podle maximálního statického zesílení II.	20
5.2.3.4 Přiřazení čidel k zářičům podle nejrychlejšího čidla.....	21
5.2.3.5 Ověření podmínky říditelnosti a dosažitelnosti	21
5.3 Výběr a návrh řídicího algoritmu	23
5.3.1 Zjednodušený model	24
5.3.2 PID regulátor	25
5.3.3 Stavový regulátor	26
5.3.4 H_∞ návrh regulátoru.....	26
5.3.5 LMI návrh regulátoru	27
5.3.6 Optimální regulační algoritmus.....	28
5.3.6.1 PID regulátor s kooperací	30
5.3.6.2 PID regulátor bez kooperace	31

5.3.6.3 Implementace PID regulátoru.....	32
6 Závěr.....	33
Literatura	36
Vlastní literatura	37

1 Úvod

Nedílnou součástí mnoha výrobních procesů je tepelné zpracování materiálu, ať už jde o tavení, vysoušení materiálu nebo například tvrzení povrchu. Tyto procesy jsou využívány v mnoha průmyslových odvětvích jako například metalurgie, zpracování kovů a plastů nebo jen pro finální povrchové úpravy některých výrobků. Pro jednotlivé výrobní technologie, které jsou si často velice podobné, je pak zpravidla nutné vyvíjet specifické systémy ohřevu, které jsou navrhovány a optimalizovány pro jednotlivé technologie.

Jedním z hlavních parametrů systému ohřevu je pak zvolený zdroj tepla a transportní médium, které přenáší tepelnou energii ze zdroje k výrobnímu nástroji nebo přímo k výrobku. Jako transportní médium pak může být zvolen například horký olej, horký vzduch, infračervené záření, elektrické pole, elektrický proud a mnoho dalších. Při volbě topného média je pak hned několik kritérií, ke kterým je třeba přihlédnout. Mohou to být náklady na pořízení topného média a zdroje tepelné energie, nebo další náležitosti spojené s topným médiem a zdrojem tepla. Některá média vyžadují podpůrné hospodářství, které zajišťuje chod a hospodaření s médii systému ohřevu. Dalším neméně důležitým kritériem je pak ekologická zátěž životního prostředí, která je způsobena provozem takovéto technologie. V případě použití oleje jako topného média je to například nutnost zabránit úniku média, které je používáno ve velkých objemech a s tím pak spojené zřízení olejového hospodářství. Problém také může být v doprovodných jevech při provozu, které vznikají při použití některých médií. U vzduchu je to pak například nevýhoda vzniku vysokého hluku, který je způsoben nutností proudění velkého množství média. Horký vzduch totiž musí proudit kolem výrobku nebo výrobního nástroje v dostatečném množství, aby bylo dosaženo požadované teploty. Dále může vznikat například elektromagnetické rušení. To může být způsobeno při využití elektromagnetického pole pro ohřev.

Tato práce je výsledkem vývoje systému ohřevu pro zcela nový typ technologického zařízení. Tento vývoj probíhal na základě inovačního a vývojového programu firmy Magna (dříve Cadence Innovation), která je dodavatel plastových dílů pro automobilový průmysl. Jako topné médium, které transportuje teplo na rubovou stranu výrobní formy, na jejíž lícovou stranu je pak nanesen zpracovávaný materiál, zvolil zadavatel infračervené záření. V řešeném systému je infračervené záření generováno pomocí soustavy speciálních vláknových zářičů, které mají největší vyzařovanou intenzitu právě v infračervené části

elektromagnetického spektra. Podle dosažitelných zdrojů je použití takto koncipovaného systému ohřevu ojedinělé, a i přes některé nevýhody přináší řadu nesporných výhod.

Hlavními výhodami tohoto řešení vzhledem k velikosti jednotlivých zářičů vůči výrobní formě jsou:

- Možnost lokálně ovlivňovat teplotu jednotlivých částí výrobku během zpracování. To pak umožňuje lokálně měnit výsledné vlastnosti finálních produktů, které jsou závislé na teplotě. Tím je pak dána technologovi možnost optimalizovat výsledný produkt bez nutnosti **konstrukčních** zásahů do systému ohřevu.
- Další výhodou je minimální lokální ekologická zátěž na okolí a odpadá také další podpůrné hospodářství, jako například při ohřevu horkým olejem. Navíc v takto koncipovaném systému ohřevu je absence pohybu hmoty topného média a dalších pohyblivých částí spojených se systémem ohřevu, jako například při ohřevu horkým vzduchem nebo pískem. Takovýto systém ohřevu je tedy velice tichý.
- Předpokládaná úspora elektrické energie ve srovnání s jinými způsoby ohřevu.

Nevýhodou tohoto typu ohřevu je pak:

- Nutnost řešit problém se směřováním světelného toku jednotlivých zářičů. Ty je nutno směřovat přesně oproti jednotlivým čidlům na povrchu výrobní formy a zároveň je nutno zajistit co nejhomogennější dopadající světelnou intenzitu. Tímto pak bude možno snadněji zajistit požadovanou homogenitu výsledné teploty povrchu výrobní formy. (Akční veličina a její dynamické účinky závisí na vzdálenosti, úhlu natočení a povrchových vlastnostech rubové strany formy).
- Nutnost udržovat rubovou stranu výrobní formy ve vyhovujícím stavu (černění).
- Problém s přívodem poměrně vysokých elektrických proudů k infračerveným zářičům, které jsou ve výrobním zařízení umístěny na rotační části.
- Instalace a čtení sítě mnoha teplotních čidel nutných k regulaci správné teploty výrobní formy.

Vývoj nových plastových materiálů a jejich vlastností vede ke stále častějšímu používání plastových výrobků nejen v domácnostech, ale plastové výrobky nacházejí stále větší uplatnění i v letectví a zejména v automobilovém průmyslu. V projektu, který je částečně řešen v této práci a je v něm použit systém ohřevu tenkostěnné niklové formy

složitého tvaru pomocí soustavy infračervených zářičů, jsou vyráběny plastové díly slinováním termoplastů v podobě prášku („powder slush moulding“ – „technologie slushování“). V této technologii je třeba vyhřát výrobní nástroj (formu) na přesně definovanou teplotu a na ni pak následně nanést termoplastický polotovar v podobě prášku, který je pak za definované teploty slinut do finálního výrobku. Tato práce se pak zabývá syntézou a výběrem řídicího algoritmu pro systém ohřevu, ale okrajově také zmiňuje problematiku optimálního rozložení zářičů vůči výrobní formě.

2 Současný stav problematiky

2.1 Výrobní technologie

V současné době jsou pro výrobu plastových dílů (v našem případě umělých měkčených kůží) pro automobilový průmysl používány převážně dvě technologie. Je to především vstřikování plastů (injection moulding), které je obecně velice často používanou technologií i pro neměkčené plastové díly. Druhou používanou technologií je slinování práškových termoplastů (powder slush moulding).

Jak bylo uvedeno v [2] a [3], obě technologie mají své výhody a nevýhody. Technologie vstřikování plastů umožňuje daleko rychlejší výrobu než technologie slinování práškových termoplastů, ovšem vyžaduje poměrně složitý výrobní nástroj. Oproti tomu technologie slinování prášku dosahuje daleko kvalitnějšího povrchu výrobku, a to jak vzhledového, tak dotykového vjemu povrchu, ovšem za cenu prodloužení času výroby. Z těchto důvodů jsou výrobky vyrobené slinováním prášku určeny hlavně pro automobily vyšších tříd. Obě tyto technologie, jak je uvedeno v [1] a [3], pak mohou být použity pro produkci vícebarevných výrobků. V případě technologie vstřikování dochází ke vstřiku všech barevných složek najednou, což ale vyžaduje vybavení vstřikovací formy poměrně složitou vtokovou soustavou. V případě výroby vícebarevného výrobku technologií slinování termoplastického prášku jsou jednotlivé barvy nanášeny v několika fázích. Zde je pak potřeba pro každou barvu použít speciální masku, která vymezuje oblast jednotlivých barev.

2.2 Vyhřívání teplotních polí

Pro ohřev samotné výrobní formy pro technologii slinování termoplastického prášku, která je vyrobena galvanickým vylučováním za působení elektrického pole z niklu, je podle dostupných materiálů používáno několik způsobů. Ty užívají pro transport tepelné energie ze zdroje různá média například minerální olej, horký vzduch, písek nebo tepelné záření.

Při použití minerálního oleje jako média pro transport tepelné energie je médium přiváděno na rubovou stranu výrobní formy pomocí systému trubek. Tento způsob ohřevu používá pro své linky například výrobce Krauss Maffei [8]. Pro takovouto koncepci výrobní linky je pak výhodou například možnost rychlého chlazení a vyjímání výrobku v jedné pozici, což značně zmenšuje velikost výrobní linky a zkracuje dobu výroby. Problematická pak ale může být nutnost reagovat na technologické změny. V případě použití oleje jako topného média je také nutno vybudovat poměrně nákladné olejové hospodářství.

V dalším případě je možno použít horký písek, který je sypán na rubovou stranu formy. Zde je výhoda hlavně nenáročného ekologického hospodářství, nevýhodou pak může být nemožnost zvyšování teploty v průběhu výrobního cyklu.

Dalším nalezeným způsobem ohřevu je transport tepelné energie na výrobní formu prostřednictvím horkého vzduchu. Jeho hlavní nevýhodou je nutnost udržet dostatečné proudění velkého množství teplého vzduchu, ale výhodou je zde možnost poměrně snadné homogenizace teploty povrchu výrobní formy.

Poslední možností ohřevu je pak ohřev povrchu formy infračerveným zářením. Pro tento způsob ohřevu nebyl v dostupných zdrojích nalezen případ samostatného použití ohřevu pouze infračervenými zářiči. Byl ale nalezen výrobce strojů pro zpracování plastu slinováním termoplastického prášku, a to firma Kiefel [7]. Ta kombinuje tři z těchto metod zahřívání výrobní formy. Pro přehřev formy je použita univerzální sestava infračervených zářičů, která přehřeje formu nad určitou hranici, její teplota je pak následně homogenizována pomocí horkého vzduchu a dostatek tepelné energie při vlastním slinování prášku je pak zajištěn horkým pískem, který nakumuloval dostatečné teplo pro zpracování výrobku. Je nutno také poznamenat, že **teploty pro zpracování termoplastického prášku nejsou přesně známy.**

V literatuře se tedy nepodařilo nalézt systém ohřevu, pro který je použito pouze infračervených zářičů pro tak komplikovaný prostorový tvar vyhřívané plochy, jako je například palubní deska automobilu, pro kterou je prototypový stroj primárně vyvíjen. Je třeba si uvědomit, že je nutné pro infračervené zářiče zajistit nastavení do optimálních poloh vůči vyhřívané formě a zajistit jejich uchycení i při pohybu, který je nezbytný například při nanášení prášku. V literatuře byla nalezena pouze aplikace infračervených zářičů na výrazně jednodušší problémy, jako je například sušení nátěrů a laků, ohřev potravin, zpracování plastových fólií a podobně.

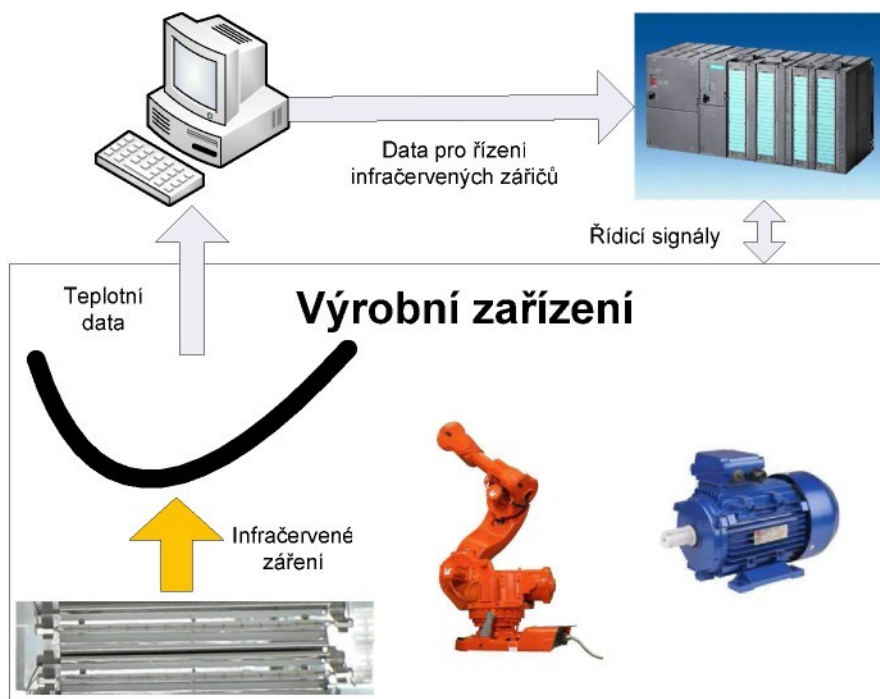


Obr. 2.1: Linka Krauss Maffei.

3 Struktura zařízení

Ideové schéma vyvíjené linky, na které bude řídicí systém nasazen, je pak na Obr. 3.1. Mozkem celé výrobní linky je zde programovatelný automat SIEMENS SIMATIC S7-300. Ten řídí celý výrobní cyklus, tedy měniče motorů, ovládá řídicí signály pro řídicí systém robotů, z nichž jeden manipuluje výrobní formou mezi rotační částí stroje, vyjímací a chladicí stanicí, a druhý stříká práškový materiál při výrobě dvoubarevných umělých kůží. Dále jsou přes PLC řízeny všechny měniče motorů a samozřejmě **zapínány** také infračervené zářiče. Teplota výrobní formy je přes speciální moduly snímána přímo počítačem, který tyto teploty vyhodnocuje a řídicí signály pro jednotlivé zářiče pak předává do PLC, které příslušné infračervené lampy rozsvěcí nebo zhasíná. Zde je nutno podotknout, že zářiče mohou být pouze zapnuty nebo vypnuty. Navíc modulace spínacího signálu je omezena tím, že pro napájení je použito síťové napětí a jako spínání jsou použity polovodičová relé spínající v nule.

V souladu se zadáním a cílem (viz kapitola 4) práce bylo nutno při návrhu regulačního algoritmu přihlídnout zejména k požadavkům odběratele na jednoduchost řídicího systému, a zejména na časové dispozice pro implementaci na reálném systému ohřevu. Z těchto a níže uvedených důvodů z kapitoly 5.3 bylo nakonec použito matice standardních PID regulátorů. Ty byly použity takovým způsobem, že můžeme hovořit o decentralizovaném řízení.



Obr. 3.1: Ideové schéma zařízení vyvíjené linky

4 Cíle práce

Vzhledem k tomu, že podobný vícerozměrový problém regulace teplot nebyl v žádné literatuře nalezen a není ani z průmyslové praxe znám, respektive nebyl úspěšně vyřešen, bylo nutno požadavky na nově navrhovaný řídicí systém s ohledem na technologické potřeby odběratele nově formulovat. Ukázalo se, že materiálové, konstrukční ani výrobně-technologické požadavky na řízení teplot nebylo možno na začátku řešení přesně definovat. Poskytované informace o rozložení teplot od výrobců byly nereálné, nejasné nebo dokonce i zavádějící, a nebylo je možno ověřit. Bylo tedy nutno vycházet z údajů v širokých tolerancích. Tyto skutečnosti se potvrdily během technologických experimentů.

Řešitel tedy zformuloval z hlediska řízení globální a dílčí cíle.

- **Globální cíle**

Samotným globálním cílem bylo vyvinutí systému řízení teplotního pole pro prostorově „složitě“ tvarovanou výrobní formu, jenž je využita pro výrobu umělých kůží „slushovací“ technologií, která je založena na spékání práškového termoplastického materiálu. Pro systém ohřevu je pak jako zdrojů tepelné energie využito infračervených zářičů, které jsou ovládány dodaným řídicím systémem SIEMENS SIMATIC S7-300. Systém ohřevu pak bude umožňovat

- I. Splnění požadavků na rozložení teplot pro jednotlivé výrobky tak, aby byly zajištěny dané kvalitativní ukazatele finálního výrobku při opakovaném výrobním cyklu.
- II. Zajištění požadovaných rychlostí, respektive časů ohřevu nebo předehřevu v jednotlivých výrobních cyklech.
- III. Implementaci řídicího systému na daném výrobním zařízení a možnost jeho implementace i na další projektované výrobní linky a kapacity.

- **Dílčí cíle**

Formulace globálních cílů zahrnuje kromě obecně daných požadavků na řízení také celou řadu rozsáhlých konstrukčních, technologických a montážních činností. Tato práce řeší v rámci celého týmu problematiku řízení a regulace teplotních polí. Dosažení **požadovaného rozložení teplotních polí na líci formy** je jedním z klíčových předpokladů provozu výrobní linky. Následná analýza z pohledu řízení ukázala, že k dosažení globálních cílů vzhledem k neurčitostem při formulaci cílů řízení je nutno definovat posloupnost dílčích úkolů a cílů řízení, jejichž postupné splnění je předpokladem splnění globálního cíle. Je tedy třeba:

1. Analyzovat možnosti daných akčních členů vzhledem k dosažení povrchových teplot rubu a líce výrobní formy.
2. Modelovat rozložení teplotního pole, zvláště pak s ohledem na požadavky řízení.
3. Navrhnout metodiku rozložení zářičů a čidel vůči výrobní formě, která zajistí optimální rozložení teplot výrobní formy.
4. Zajistit dosažitelnost požadovaných ustálených stavů teplotního pole v daných místech.
5. Na základě měření regulovaného systému ohřevu za účelem ověřování regulačních algoritmů vytvořit simulační model.
6. Vypracovat metodiku pro přiřazování čidel a akčních členů do jednotlivých regulačních smyček.
7. Navrhnout a vybrat regulační algoritmus vzhledem k možnostem zařízení a požadavkům zadavatele.
8. Umožnit částečné řízení lokální odchylky teplotního pole na výrobní formě a tím umožnit lokální řízení kvality vyráběných umělých kůží v konkrétních oblastech.
9. Analyzovat vliv cyklického opakování výroby na změny kvality kůže v průběhu několika cyklů.
10. Ověřit možnost použití „univerzálních“ zad, která umožní používat stejné rozmístění zářičů prakticky pro libovolný tvar výrobní formy.

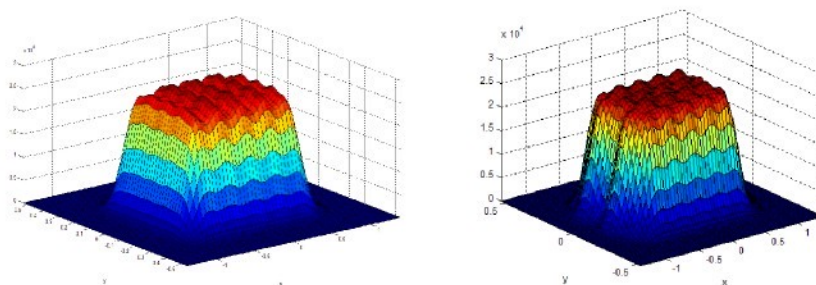
5 Vlastní řešení

5.1 Analýza vlivu polohy zářičů

5.1.1 Simulace teplotního pole

Před sestavením prvního fyzického experimentálního zařízení bylo nutno provést některé základní simulace a potvrdit, zda je vůbec možno danou vyhřívací technologií použít. Tato počáteční simulace byla provedena firmou LENAM, která provedla simulace ohřevu na počítačovém modelu. V dalším průběhu prací pak byly firmou LENAM zjišťovány reálné vyzařovací charakteristiky použitých zářičů, a na jejich základě firma dále vytvořila metodiku rozmisťování zářičů. Paralelně s tím, respektive než byla tato metodika vypracována, byly na našem pracovišti TUL provedeny simulace, které osvětlovaly některá fakta pro výběr struktury intuitivního rozmisťování zářičů, na kterých se naše pracoviště podílelo.

Tato kapitola se zabývá rozložením zářičů a čidel vůči povrchu výrobní formy a jeho vlivem na homogenitu respektive dosažitelnost požadovaného rozložení teplotního pole. Jinými slovy, je zde hledána cesta ke splnění dílčího cíle č.3. Kromě jiného vychází ze simulačních experimentů některých dějů vznikajících při zahřívání těles s použitím jednoho nebo více infračervených zářičů. Tyto simulace jsou provedeny na základě matematicko-fyzikálního popisu dané situace, která je dána reálným systémem ohřevu. Ten je tvořen soustavou infračervených zářičů a černěnou plochou, která je infračerveným zářením ohřívána. Situace jsou potom voleny tak, aby demonstrovaly vliv nastavení zářičů na teplotní pole při různých uspořádáních. Samotná simulace je pak provedena v programovém prostředí ANSYS, které využívá pro výpočet modelu metodu konečných prvků a její výsledky a metody jsou podrobně popsány v [10].



Obr. 5.1: Intenzita dopadajícího záření pro maticové (vlevo) a cihlové uspořádání zářičů (vpravo) [10].

5.1.2 Dosažitelnost ustálených stavů

Pro ověření možnosti dosažení homogenního pole je třeba si hned od počátku určit podmínky, za kterých je homogenita pole respektive teplota pole snímána v měřených bodech dosažitelná. Tato podmínka by měla určit dosažitelnost homogenního pole respektive pole požadovaných parametrů ještě před přistoupením k prvním pokusům o regulaci teplotního pole na reálném systému.

V našem případě, na kterém bude následující podmínka aplikována, bude podmínka dosažitelnosti ustálených stavů respektive ustálených teplot v nekonečném čase vycházet z hardwarového omezení akčních členů. Tedy v našem případě bude velice jednoduchá a bude definována následovně.

Vycházíme tedy z akčních členů, které jsou řízeny ve dvou stavech a to, že daný zářič je buď zapnut nebo vypnut, a také není v reálném systému ohřevu **dána žádná možnost aktivního chlazení**. K ochlazování výrobní formy tedy nelze použít jiných prostředků než vzduchu v okolí výrobní formy, a ten je pro jakékoliv řízené chlazení nepoužitelný. Pro model, který je popsán v dalším textu a je použit pro návrh regulačního algoritmu a ověření dosažitelnosti dané kvality teplotního pole, lze používat akční veličinu $u_i(t)$ pouze v rozmezí intervalu $<0; 1>$. Podmínka dosažitelnosti dané kvality teplotního pole je tedy následující:

Jestliže je dána čtvercová matice zesílení $\mathbf{G}$, jejíž prvky g_{ij} představují zesílení, kterým působí j -tý zapnutý zářič ($u_j=1$) na i -té čidlo teploty (y_i), pak je nutná podmínka dosažitelnosti daného ustáleného vektoru snímaných teplot $\mathbf{u}(\infty)$ pro popis ustálených stavů

$$\mathbf{u}(\infty) = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{y}(\infty) \quad (4.1)$$

takováto

$$0 \leq u_i(\infty) \leq 1, i = 0, 1, \dots, n. \quad (4.2)$$

V tomto konkrétním případě bude mít nedodržení těchto podmínek dosažitelnosti za následek pouze nouzové odstavení linky z důvodů přehřátí některých čidel (nouzové odstavení nastane po překročení bezpečné teploty na některém z čidel), nebo nerovnoměrné rozložení teplotního pole respektive odchylku od požadovaného rozložení teplotního pole, což může mít obojí za následek „pouze“ zmetkový výrobek, nikoli však poškození výrobní formy. Rovnicí (4.2) byla zformulována **nutná podmínka** dosažení požadovaných teplot v definovaných bodech v ustáleném stavu. Tímto byl splněn bod č.4 dílčích cílů.

5.2 Identifikace a tvorba modelu

5.2.1 Struktura zjednodušeného modelu

Tato kapitola obsahuje popis činností související s dílčím cílem č.5. Systém ohřevu je tvořen infračervenými zářiči jako akčními členy a načerněnou výrobní formou, která je galvanicky vytvořena z niklu a teplota její rubové strany je snímána jako regulovaná veličina. Pro první nástin jeho chování při regulaci, stejně jako pro určení správného spárování dvojic, které jsou tvořeny termočlánkem, který snímá teplotu v dané oblasti, a infračervenou lampou, která danou část výrobní formy nejvíce teplotně ovlivňuje, bylo třeba vytvořit matematický model. Model bylo možno vytvořit dvěma způsoby. Jednou z variant je matematicko-fyzikální model, který je založen na fyzikálním popisu reálné situace, ovšem tato metoda tvorby modelu nebyla vzhledem k vysokým požadavkům na tvorbu modelu a jeho výpočet použita. Navíc nebyl takto přesný model bezpodmínečně nutný. Pro naši potřebu postačoval zjednodušený parametrický model vyjádřený pomocí matice obrazových přenosů. Tento zjednodušený model nezahrnuje všechny detaily šíření tepla, ale pro návrh a odzkoušení regulačního algoritmu se ukázal jako dostačující.

Zvolený model pak popisuje vliv jednotlivých zářičů na všechna čidla a je reprezentován maticí obrazových přenosů $G(s)$. Matice $G(s)$ má rozměr $(m \times n)$, kde m je počet teplotních čidel použitelných pro regulaci a n je počet použitých infračervených zářičů. Prvek matice $G_{ij}(s)$ pak tedy určuje odezvu i -té výstupní veličiny, která je definována jako teplota měřená i -tým termočlánkem, na vstup, který je dán tokem infračerveného záření j -tého infračerveného zářiče. Získání parametrů jednotlivých obrazových přenosů je pak popsáno v další kapitole. Výstup modelu je pak dán rovnicí (5.3), kde je

$U(s)$ vektor transformovaných vstupních signálů o rozměru $n \times 1$ a
 $u_i(t) \in \langle 0, 1 \rangle; i = 1, 2 \dots m,$

$Y(s)$ vektor transformovaných výstupních teplot o rozměru $m \times 1$,

$G(s)$ matice obrazových přenosů použitého modelu o rozměru $m \times n$.

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) \quad (4.3)$$

5.2.2 Identifikace

Pro vlastní popis tedy bylo použito modelu, který aproximuje teplotní dynamiku systému ohřevu prostřednictvím matematického lineárního časově invariantního modelu

s neznámými parametry. Určení těchto neznámých parametrů je právě úkolem identifikace, která byla provedena na reálném systému ohřevu výrobní linky a je popsána v této kapitole.

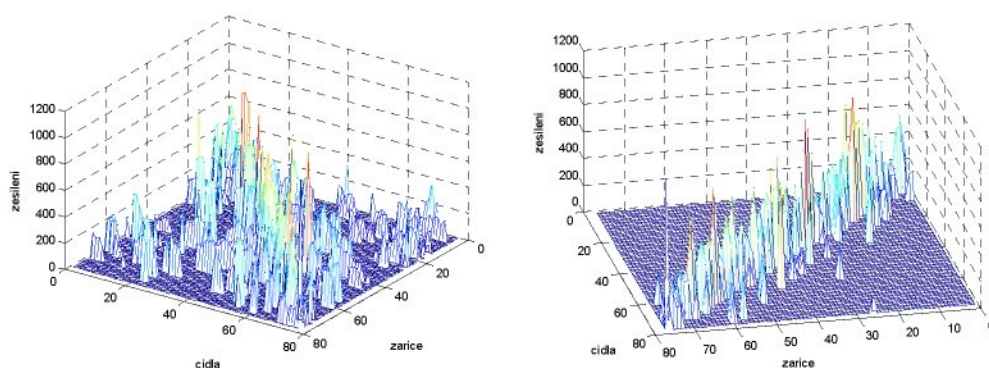
Pro identifikaci na použité výrobní formě, která má 77 nebo dokonce až 180 použitých zářičů, byla identifikace provedena v rámci 18 měřicích cyklů. V každém cyklu bylo zvoleno několik infračervených lamp, které vzájemně neovlivňují stejná čidla, respektive účinek jednotlivých lamp na stejné čidlo je pouze minimální. Takto navržená identifikační měření pak umožní naměřit potřebná data v průběhu pouze jedné pracovní směny, a tím výrazně urychlit proces zavedení nového sortimentu. Přiřazení jednotlivých odezev k příslušnému čidlu pak bylo automatizováno prostřednictvím postupného zapínání a vypínání jednotlivých lamp v měřicím cyklu.

Takto získaná data jsou pak identifikována. Pro jednotlivé obrazové přenosy zvoleného modelu $G(s)$ je pak použita struktura obrazového přenosu druhého řádu (5.4).

$$G_{jk}(s) = \frac{K_{jk}}{(T_1^{jk}s + 1)(T_2^{jk}s + 1)}, \quad (4.4)$$

kde:

K_{jk} je hledané statické zesílení obrazového přenosu $G_{jk}(s)$,
 T_1^{jk}, T_2^{jk} jsou hledané časové konstanty obrazového přenosu $G_{jk}(s)$ a
 j, k se mění v rozsahu $j, k = 1, 2, \dots, 77$.



Obr. 5.2: Grafická reprezentace matice zesílení před optimalizací poloh zářičů a čidel (vlevo) a po částečné optimalizaci.

Parametry konkrétních přenosů jsou pak získány parametrickou identifikací naměřených dat, která byla provedena metodou ARX získávající parametry metodou nejmenších čtverců. Tato metoda nám pak v porovnání s metodou využívající porovnání ve spojitě časové oblasti ušetří až 90% času. Základní náhled na charakter soustavy si lze udělat například z matic statických zesílení na Obr. 5.2, kde je vidět matice zesílení před a po částečné optimalizaci nastavení poloh zářičů a čidel. Zde je vidět, že po částečné optimalizaci

rozložení čidel a zářičů došlo k výraznému potlačení křížových vazeb, které vznikají osvětlením čidla infračervenou lampou, která není čidlem řízena. Na obrázcích je vidět, že na diagonále matice zesílení se zpravidla nacházejí nejsilnější přenosy, které jsou brány za přímé vazby mezi čidlem a infračerveným zářičem. Je však také patrné, že na prvcích mimo diagonálu se nachází množství přenosů s vysokým zesílením, které můžou vést k problémům z hlediska řízení. Toto lze odstranit buď další optimalizací nastavení zářičů a čidel nebo **úpravou přiřazení jednotlivých lamp a zářičů** (uvažujeme diagonální přiřazení) a tento postup je popsán níže.

5.2.3 Přiřazení zářičů do regulační smyčky

Součástí následných optimalizačních kroků je správné přiřazení infračervených zářičů a termočlávkových snímačů teploty do jednotlivých regulačních smyček a je těžištěm dílčího cíle č.6. U takto rozsáhlého průmyslového MIMO systému, kde je navíc k dispozici pouze velice zjednodušený model, pak ale nastává otázka, jak tento krok správně vyřešit. Pro tento účel bylo použito srovnání hned několika metod pro spárování vstupních a výstupních veličin, tedy zářiče a k němu odpovídajícího řídicího čidla. Byly aplikovány metody přiřazení:

1. Na základě maximálního statického zesílení
2. Podle matice RGA (Relative Gain Array)
3. Podle nejrychlejšího čidla

5.2.3.1 Přiřazení čidel k zářičům podle maximálního statického zesílení

V první řadě bylo použito metody, ve které je pro každý teplotní snímač vybrán infračervený zářič tak, aby k němu přiřazené teplotní čidlo mělo nejrychlejší odezvu, respektive odezvu s největším zesílením. Tímto způsobem přiřazení čidel a infračervených zářičů pak dostaneme strukturu řídicího obvodu takovou, že po přeuspořádání (přečíslování) čidel jsou přenosy s nejvyšším statickým zesílením na diagonále přenosové matice. Takto zvolené dvojice čidel a zářičů pak částečně zaručují možnost dosáhnout žádaných hodnot teplot na celém povrchu výrobní formy. Problém nastává pouze v případech, kde diagonála není dostatečně silná a dochází k ovlivňování některých čidel i ostatními zářiči a to pak vede k nemožnosti dosažení homogenního teplotního pole. Tato situace nastává například pro systém ohřevu před optimalizací poloh zářičů a čidel.

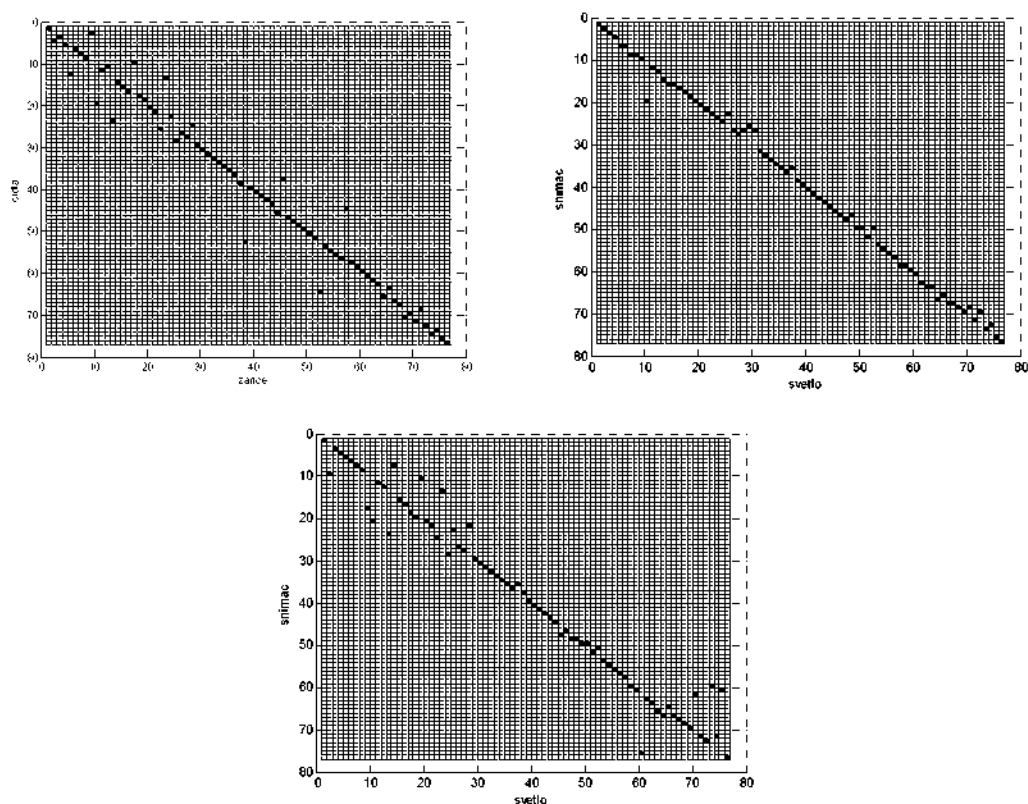
5.2.3.2 Přiřazení čidel k zářičům podle RGA

Jako druhý přístup byl zvolen přístup prostřednictvím výpočtu matice RGA (Relative Gain Array). Funkce RGA je pak dána jako

$$RGA(\mathbf{G}) = \Lambda(\mathbf{G}) \triangleq \mathbf{G} \times (\mathbf{G}^{-1})^T, \quad (4.5)$$

kde $\mathbf{G}$ je nesingulární komplexní čtvercová matice a $\times$ je matematická operace násobení matic po prvcích. Funkce RGA nám pak umožní - tedy spíše doporučí - spárovat dvojice čidlo a infračervený zářič. Matice $\mathbf{G}$ je matice statických zesílení zjednodušeného modelu. Podle pravidel v [5] pak můžeme provést párování vstupů a výstupů. Ovšem to může být pro takto rozsáhlý systém poměrně komplikované a nepřehledné. Proto můžeme využít iterativní vlastnost RGA funkce, která zjednodušuje párování rozsáhlých MIMO systému.

Pro výpočet matice RGA a její iterovaného výpočtu je použit model získaný identifikací a má nejsilnější zesílení na diagonále. Iterovaným výpočtem RGA (iterace proběhla 10 krát) pak byla vypočítána matice přiřazení, která je zobrazena na Obr. 5.3.



Obr. 5.3: Matice přiřazení podle RGA, maximálního zesílení a SVD rozkladu.

5.2.3.3 Přiřazení čidel k zářičům podle maximálního statického zesílení II

Jako třetí přístup byla použita metoda, která upravuje přiřazení čidla k danému světlu podle maximálního statického zesílení (popsána na začátku této kapitoly). Tato metoda potom umožňuje přiřadit jednomu čidlu více zářičů a dosáhnout tak potlačení zejména přehřátých míst, je však nutno říci, že k tomuto potlačení dochází za cenu možného zhoršení kvality homogenity pole. Ovšem je to metoda univerzální a funguje i pro neoptimální rozložení zářičů.

Tato metoda vychází s jednoduchého principu, který má snahu každému zářiči přiřadit pro řízení čidlo, které daný infračervený zářič nejvíce ovlivňuje. Postup je tedy takový, že při rozsvícení jednoho daného zářiče je hledáno takové teplotní čidlo, které se zahřeje nejvíce. Tato dvojice je pak použita pro regulaci. V případě, že je nalezeno více zářičů, které mají nejsilnější vliv na dané čidlo, pak jsou všechny tyto zářiče řízeny podle tohoto čidla. Výsledkem takového postupu je pak takzvaná matice přiřazení, která je zobrazena na Obr. 5.3. Tímto postupem pak dostaneme takový regulační obvod, jenž má nižší počet regulačních smyček, než je počet infračervených zářičů nebo teplotních čidel.

Pro praktické aplikace je třeba mít na zřeteli, že tyto metody pracují se zesílením, které je pouze odhadnuto z identifikačního měření, při kterém nebylo dosaženo ustálených stavů. Nejistota v odhadech zesílení zde představuje jisté nebezpečí, že dané třídění bude zatíženo jistou chybou, která je způsobena nepřesným popisem dynamiky ve zjednodušeném modelu, který je pro tuto problematiku používán. Proto by bylo dobré pracovat spíše s odhady říditelných „směrů“. Ty můžeme získat pomocí singulárního rozkladu matice $\mathbf{G}$, který je definován podle (5.6).

$$\mathbf{G} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^H, \quad (4.6)$$

kde $\mathbf{G}$ je matice zesílení modelu soustavy,

$\mathbf{U}$ je unitární matice výstupních směrů,

$\mathbf{V}$ je unitární matice vstupních směrů a

$\mathbf{S}$ je matice se singulárními čísly na hlavní diagonále. Nyní můžeme provést vyloučení zesílení v jednotlivých vstupních a výstupních směrech. Mějme tedy matici

$$\mathbf{G}_{UV} = \mathbf{U}\mathbf{V}^H, \quad (4.7)$$

kteřá vznikne roznásobením matic levých a pravých vektorů respektive vstupních a výstupních směrů. Na tuto matici pak můžeme uplatnit předcházející postup volby struktury regulačního obvodu. Výsledkem takového postupu je pak matice přiřazení na Obr. 5.3. Je na ní opět vidět redukce počtu regulačních smyček.

5.2.3.4 Přiřazení čidel k zářičům podle nejrychlejšího čidla

Na reálném případě přímo v provozu bylo nejprve prováděno přiřazení zářičů vůči čidlům pomocí prvního, respektive třetího způsobu. Ten se ukázal jako vhodný právě proto, že v podstatě není potřeba provádět žádnou zdlouhavou identifikaci. Po odzkoušení se ze začátku optimalizace ukázala jako nejrychlejší a bylo možno tento způsob „zhruba“ provést bez potřeby kompletní identifikace. Problémem ovšem bylo, že docházelo k lokálním přehřevům a teplotní pole nedosahovalo dostatečné kvality. Protože bylo nutno toto přiřazení ještě v průběhu výroby zkušebních kusů doladit, bylo přistoupeno k pokusům o přiřazení pomocí SVD rozkladu matice přenosů. Toto se ukázalo jako velice nadějně, ovšem v postupu optimalizace rozložení zářičů a čidel vůči výrobní formě se přiřazení regulačních smyček podle samotného zesílení, respektive podle rychlosti náběhu teploty na daném čidle, ukázalo jako dostatečné.

Nakonec ovšem bylo přistoupeno ještě k další úpravě metodiky, což bylo umožněno právě zlepšováním prvotního nastavení zářičů. Tyto úpravy pak vznikly z důvodů rychlejšího zavádění nového sortimentu do výroby, kdy bylo danému zářiči přiřazeno nejrychleji se ohřívající čidlo. Tato metoda je jakousi obměnou metod, které jsou zde popsány, a ukázala se jako nejrychlejší vzhledem k tomu, že není třeba čekat na ustálení teploty nebo provádět zdlouhavou identifikaci měření.

5.2.3.5 Ověření podmínky říditelnosti a dosažitelnosti

V této kapitole budou krátce ověřeny podmínky dosažitelnosti a říditelnosti identifikovaného systému. Ověření je zde provedeno pro přiřazení čidel a zářičů podle SVD rozkladu. Budeme se zde zabývat pouze dvěma podmínkami, a to zaprvé dosažitelností ustálených stavů, která byla definována v kapitole 5.1 a zabývá se ustálenou hodnotou akční veličiny vzhledem k ustálenému stavu vektoru výstupních veličin tedy teploty. Dále se pak budeme zabývat koeficientem podmíněnosti soustavy, který nám může napovědět něco o „říditelnosti“ modelovaného systému.

Nejdříve se tedy budeme zabývat koeficientem podmíněnosti soustavy. Samotný koeficient podmíněnosti je definován podílem největšího a nejmenšího singulárního čísla matice **A**. Je tedy dán vztahem

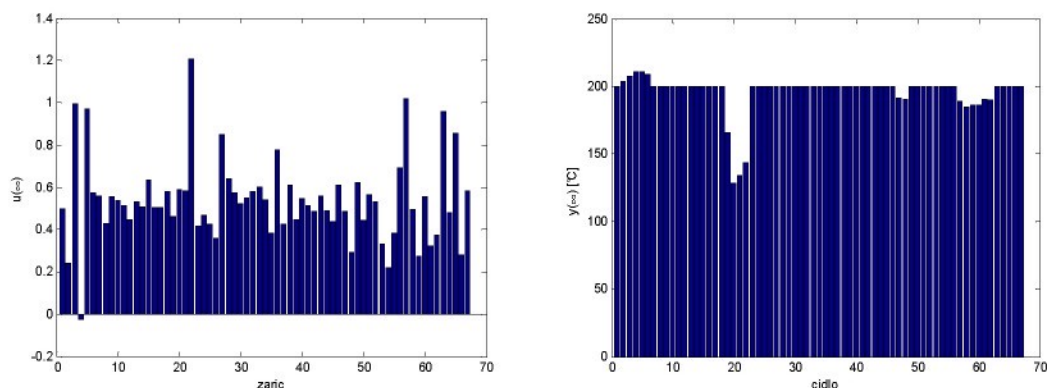
$$\gamma = \frac{\overline{\sigma}(\mathbf{A})}{\underline{\sigma}(\mathbf{A})}. \quad (4.8)$$

Potom v případě, když koeficient podmíněnosti vyjde veliký, dají se obecně předpokládat fundamentální problémy s regulací. Hodnota tohoto koeficientu vypovídá zejména o problémech, které mohou nastat ve spojitosti s neurčitostmi, které mohou na soustavu působit. Tento koeficient předpovídá hlavně velkou citlivost systému na tyto neurčitosti. Ovšem pokud je vysoká hodnota γ způsobena velikostí maximálního singulárního čísla a ne malou hodnotou minimálního singulárního čísla, nemusí nutně tento problém nastat. V našem případě pak koeficient podmíněnosti vychází poměrně veliký, a to jak pro případ řízení podle největšího zesílení, tak pro případ volby regulačních smyček podle SVD rozkladu. Koeficient podmíněnosti pak vychází v řádech tisíců, tedy $\gamma \approx 10^3$. Je nutno si ovšem uvědomit, že největší singulární číslo vychází v řádu desetitisíců, takže tato skutečnost nemusí nutně znamenat nějaký kritický problém.

Dále je zde ověřena podmínka dosažitelnosti ustálených stavů teploty, která je definována v kapitole 5.1. Podle těchto vztahů pak lze spočítat akční zásah, který bude nutno generovat pro udržení požadované teploty. Tato teplota bude v daném případě předpokládána na hladině 200°C. Hodnoty akčního zásahu a výstupní teploty vypočtené podle daného vztahu jsou zobrazeny na Obr. 5.4. Jak je vidět, hodnoty akční veličiny jsou přijatelné, tedy z realizovatelných hranic přesahují relativně málo. Pro takto nastavené akční veličiny je pak zobrazen i ustálený stav výstupních teplot povrchu výrobní formy.

Vzhledem k tomu, že nebylo možno dosáhnout všech vypočítaných hodnot vektoru akčních veličin, je vidět, že je teplotní pole poněkud nevyrovnané, a dochází na něm k výkyvům teploty. Je nutno ale pamatovat na to, že model je pouze přibližný a byl pro daný účel značně zjednodušen a je tedy nutno dané výsledky dále verifikovat na reálném vyhřívacím zařízení, kde se teprve ukáže konečná kvalita teplotního pole.

Lze říci, že tyto metody jsou použitelné na reálném regulačním systému, a byly také ověřeny při reálném řešení tvorby regulačních smyček. Některé metody ovšem nejsou použitelné při nízkém stupni optimalizace rozložení zářičů a čidel.



Obr. 5.4: Ustálený akční zásah a teploty pro zářiče přiřazené podle SVD rozkladu.

5.3 Výběr a návrh řídicího algoritmu

Naplnění předcházejících dílčích cílů 1 až 6 umožnilo provedení dílčího cíle číslo 7 „Návrh a výběr regulačního algoritmu, vzhledem k možnostem zařízení a požadavkům zadavatele“, který je popsán v této kapitole.

Jak již bylo řečeno v kapitole 3, z použité konstrukce výrobní linky, pro kterou je řídicí systém vyvíjen, a zvolené technologie výroby syntetických PVC kůží, vyplývají některá omezení na členy a prvky řídicího systému a na technologickou část výrobního procesu.

1. Z hlediska akční veličiny je to zejména omezení na akční veličině, která musí nabývat vždy kladných hodnot v intervalu $<0,1>$. To je dáno zejména nemožností chlazení povrchu výrobní formy.
2. Spínací části stroje pro jednotlivé zářiče umožňují pouze omezené možnosti spínání respektive modulování hodnot akční veličiny.
3. Výpočetní a realizační náročnost implementace řídicího systému.
4. Omezení na výstupní veličině, tedy teplotě jednotlivých regulovaných částí formy respektive teploty jednotlivých čidel snímajících teplotní rozložení na rubové straně formy. Je třeba zajistit, aby nedocházelo k výrazným překmitům teploty, což vyvolává pomalé ustalování teplot na požadovaných hodnotách. Velká lokální přehřátí mohou způsobit nevratnou změnu lícové strany formy (oxidace formy). Poškození dezénu líce formy má za následek výrazné snížení kvality finálního výrobku. V této souvislosti se též může vytvořit lokální přehřátí části lícové strany výrobní formy, které má za následek „spálení vyráběné kůže“, což se může projevit nejen změnou lesku, ale i výskytem zažloutlých míst na povrchu PVC kůže.

Použitý řídicí algoritmus pak byl vybrán z několika alternativ, které jsou rozebrány dále. Byla zde použita syntéza jak decentralizovaného systému řízení s PID regulátory, tak i

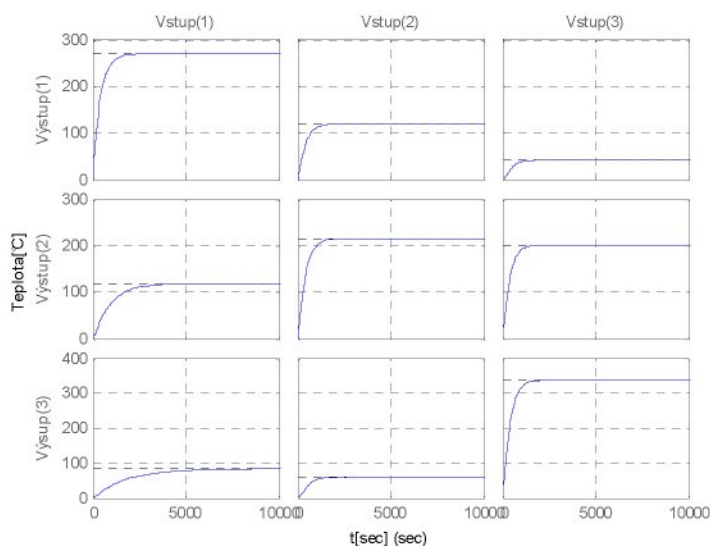
syntéza centralizovaných systémů řízení, která je zastoupena stavovou regulací, syntézou regulátoru pomocí lineárních maticových nerovností a syntéza regulátoru H_∞ .

5.3.1 Zjednodušený model

Vzhledem k tomu, že úplný MIMO systém reprezentující systém ohřevu, jak je popsán v kapitole 5.2, má velký počet vstupních a výstupních veličin, byl pro návrh a první vyhodnocení jednotlivých typů regulací (regulátoru) použit zjednodušený systém popsán maticí obrazových přenosů $\mathbf{G}_s(s)$ o rozměrech 3×3 . Tento zjednodušený MIMO systém byl získán vyextrahováním části původní matice $\mathbf{G}(s)$. Byla vybrána taková část, která popisuje systém s dostatečně silnou diagonální částí, má ale i relativně silné křížové vazby mezi teplotními čidly a zářiči mimo diagonálu. Zvolený model je pak ve tvaru popsaném následující rovnicí

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{G}_s(s) \cdot \mathbf{u}(s), \quad (4.9)$$

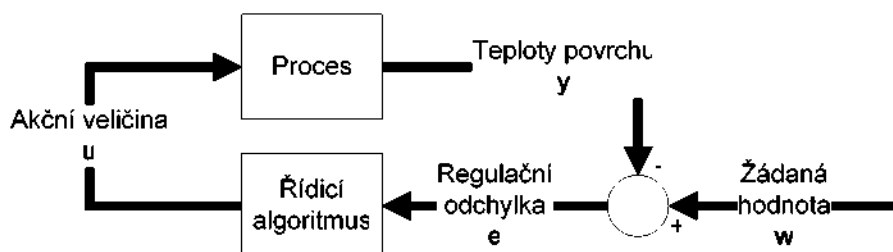
kde $\mathbf{u}(s)$ je obrazový vektor vstupní veličiny, $\mathbf{G}_s(s)$ je matice obrazových přenosů zjednodušeného modelu a $\mathbf{y}(s)$ je vektor laplaceových obrazů výstupní teploty povrchu rubu formy. Na Obr. 5.5 je pak zobrazena přechodová charakteristika zjednodušeného modelu.



Obr. 5.5: Přechodové charakteristiky zjednodušeného modelu.

Samotný regulační obvod je pak popsán soustavou rovnic (5.10), kde $\mathbf{R}(s)$ je matice obrazových přenosů regulátoru, který je získán postupem, jenž je popsán v následující části této kapitoly. Regulační odchylka vstupující do regulátoru je pak popsána vektorem laplaceových obrazů $\mathbf{e}(s)$, který je dán rozdílem obrazového vektoru žádaných hodnot $\mathbf{w}(s)$ a obrazu výstupního vektoru teplot rubové strany výrobní formy $\mathbf{y}(s)$.

$$\begin{aligned} u(s) &= R(s) \cdot e(s) \\ e(s) &= w(s) - y(s) \end{aligned} \quad (4.10)$$



Obr. 5.6: Regulační obvod.

5.3.2 PID regulátor

Jako jeden ze základních přístupů regulace teplotního pole výrobní formy byl zvolen standardní PID regulátor. Ten byl pro stávající problém řízení rozsáhlého MIMO systému použit pro oddělené, respektive decentralizované řízení každé regulační smyčky. Vzhledem k tomu, že matice zjednodušeného systému $G_s(s)$ má diagonální charakter, pro matici obrazových přenosů regulátorů $R(s)$ pak platí, že je diagonální. Máme tedy tři „oddělené“ regulační smyčky, pro které je nutno nastavit parametry PID regulátoru.

Pro návrh parametrů regulátoru pak bylo použito metody minimalizace kvadratického kritéria

$$J = \int (e^2(t) + Ku^2(t)) dt, \quad (4.11)$$

kde $e(t)$ je regulační odchylka, $u(t)$ je akční veličina na výstupu regulátoru a K je pak váhová konstanta akční veličiny, která redukuje vysoké hodnoty na akční veličině. Optimalizace parametrů regulátoru je pak provedena pro dva různé přístupy.

Pro první případ je návrh proveden pro každou regulační smyčku zvlášť. Optimalizací kritéria (4.11) pak byly získány tři sady hodnot (jedna pro každou regulační smyčku) parametrů PID regulátoru. Průběh teploty na čidlech je pak uveden v kapitole 0. Při použití tohoto přístupu pro rozsáhlý MIMO systém nastává ale nutnost návrhu poměrně velkého množství různých regulátorů, v našem případě to je až 96 různých regulátorů a pro sériovou linku s dvojitou výrobní formou to jsou téměř dvě stovky. To je důvod, proč bylo přistoupeno k pokusu použít stejné nastavení regulátoru pro všechny smyčky.

Pro tento přístup je optimalizací kritéria získána pouze jedna sada parametrů pro nastavení PID regulátoru. Pro optimalizaci je pak optimalizováno kritérium (5.12), kde e_i respektive u_i jsou regulační odchylka v i -té regulační smyčce respektive i -tá akční veličina na

i-tém vstupu zjednodušeného modelu. Průběh výstupních teplot pro jedno nastavení regulátorů pro všechny smyčky je pak uvedeno v kapitole 0.

$$J_i = \int (e_i^2(t) + Ku_i^2(t)) dt$$

$$J = \sum_{i=1}^3 J_i \quad (4.12)$$

5.3.3 Stavový regulátor

Jako druhá možnost pro regulaci byla ověřena možnost regulace s využitím řízení prostřednictvím stavové regulátoru. Stavový regulátor byl navržen jako centralizovaný řídicí systém pro celou řízenou soustavu. Jsou tedy ovládány všechny tři akční členy pomocí jednoho centralizovaného stavového regulátoru.

Stavový regulátor je pak navrhován pro rozšířený stavový popis, který vznikl standardním rozšířením stavového popisu zjednodušeného modelu $G_s(s)$ o další tři stavy, které jsou dány integrací regulační odchylky.

Samotný stavový regulátor byl nalezen optimalizací kvadratického kritéria (5.13). V tomto kritériu pak byly matice Q , R a N nastaveny tak, aby bylo dosaženo co nejrychlejšího přechodu výstupních teplot na žádanou hodnotu, ovšem bez výrazného překmitu, který by mohl výrobní formu poškodit. Zároveň bylo nutno prostřednictvím matice R na akční veličině potlačit nabývání nežádoucích hodnot akční veličiny, které jsou v praxi nedosažitelné.

$$J = \int x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u \quad (4.13)$$

Pro takto daný rozšířený stavový popis byly matice N , Q a R nastaveny tak, aby bylo dosaženo co nejlepší respektive nejrychlejší potlačení regulační odchylky e , ovšem s minimálními překmity regulované veličiny, respektive teploty a s minimálními nároky na akční veličinu u . Průběh teplot při regulačním pochodu je pak vidět v kapitole 0.

5.3.4 H_∞ návrh regulátoru

Vzhledem k předpokladu, že se vlastnosti reálného systému mohou časem měnit, ověřoval se způsob, jak zajistit robustnost vůči těmto změnám. Variabilita dynamických vlastností systému může být způsobena například změnami černění rubové strany výrobní formy, která absorbuje infračervené záření, dále pak může docházet ke snižování intenzity dopadajícího záření, což může být způsobeno třeba napečením rozsypaného PVC prášku na lampu nebo reflektor. Proto je nezbytné, aby algoritmus zajišťoval dostatečnou robustnost regulačního pochodu. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k návrhu a ověření regulátoru

navrženého metodou H_∞ alespoň na zjednodušené soustavě. Regulátor je pak navržen jako centralizovaný řídicí systém.

Regulátorem $\mathbf{R}$ je pak matice obrazových přenosů, která minimalizuje normu H_∞ pro matici smíšené citlivostní funkce $\mathbf{N}$. Regulátor $\mathbf{R}$ je pak hledán podle předpisu (5.14). Hledáme tedy takový stabilizující regulátor $\mathbf{R}$, který minimalizuje H_∞ normu smíšené citlivostní funkce $\mathbf{N}$, kde $\mathbf{S}(s)$ je citlivostní funkce a $\mathbf{T}(s)$ je doplňková citlivostní funkce. Prostřednictvím tvarování váhových funkcí ve frekvenční charakteristice je potom možno ovlivňovat jednotlivé vlastnosti regulačního obvodu. Váhovou funkcí $\mathbf{W}_p$ je možno ovlivnit kvalitu řízení respektive chování regulační odchylky e , váhovou funkcí $\mathbf{W}_u$ lze ovlivnit chování akčních veličin $\mathbf{u}$ a váhovou funkcí $\mathbf{W}_T$ lze charakterizovat neurčitost systému, kterou zpočátku neuvažujeme.

$$\min_{\mathbf{R}} \|\mathbf{N}(\mathbf{R})\|_\infty; \mathbf{N}(\mathbf{R}) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_p \mathbf{S} \\ \mathbf{W}_T \mathbf{T} \\ \mathbf{W}_u \mathbf{R} \mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Průběhy výstupních veličin regulované soustavy, řízené prostřednictvím regulátoru získaného H_∞ metodou, jsou pak zobrazeny v kapitole 0.

5.3.5 LMI návrh regulátoru

Posledním typem návrhu, který byl použit pro zjednodušený model systému ohřevu pro výrobu syntetických kůží, je návrh decentralizovaného stavového regulátoru, který byl navržen řešením lineárních maticových nerovnic (LMI). Tato metoda byla publikována ve sborníku konference ICCS 2007 [9].

Při návrhu je pak navržen stavový regulátor, který je optimalizován pro zjednodušený model $\mathbf{G}_s(s)$ ve stavovém tvaru

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}}_i(t) &= \mathbf{A}_i \mathbf{q}_i(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i(t) + \sum_{h=1}^N (\mathbf{G}_{ih} + \Delta \mathbf{G}_{ih}(t)) \mathbf{q}_h(t), i = 1, 2, \dots, N \\ \mathbf{y}_i(t) &= \mathbf{C}_i \mathbf{q}_i(t), i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4.15)$$

kde $\mathbf{A}_i$ je přenosová matice přímé vazby od i -tého vstupu na i -tý výstup (je dáno prvky $g_{sii}(s)$ matice $\mathbf{G}_s(s)$), matice $\mathbf{B}_i$ je vstupní matice pro tento přenos a výstupní matice těchto subsystémů je matice $\mathbf{C}_i$. Vektor $\mathbf{q}_i(t)$ je pak stavovým vektorem daného subsystému. Maticí $\mathbf{G}_i$ je pak vyjádřena neurčitost respektive porucha, která je pak obrazem vlivu ostatních vstupů na daný výstup. Průběhy výstupních teplot zjednodušeného modelu pro regulační obvod s regulátorem navrženým pomocí LMI je vidět v kapitole 0.

5.3.6 Optimální regulační algoritmus

Pro výběr toho správného regulačního algoritmu je v tomto případě nutno přihlédnout hned k několika hlediskům. V první řadě je třeba brát v potaz požadavky zákazníka. Ty byly definovány globálním cílem, jak je uveden v kapitole 4. Tyto se ovšem v průběhu vývoje postupně měnily, závěrečné úsilí pro dosažení globálního cíle bylo vyvinuto až v poslední fázi vývoje, kdy probíhala závěrečná příprava na sériovou výrobu. V předchozích fázích ale byly zpravidla formulovány cíle, které ověřovaly různé technologické postupy a principy, které umožňovaly získávat poznatky pro řešení globálních cílů - tedy plnit a ověřovat jednotlivé dílčí cíle.

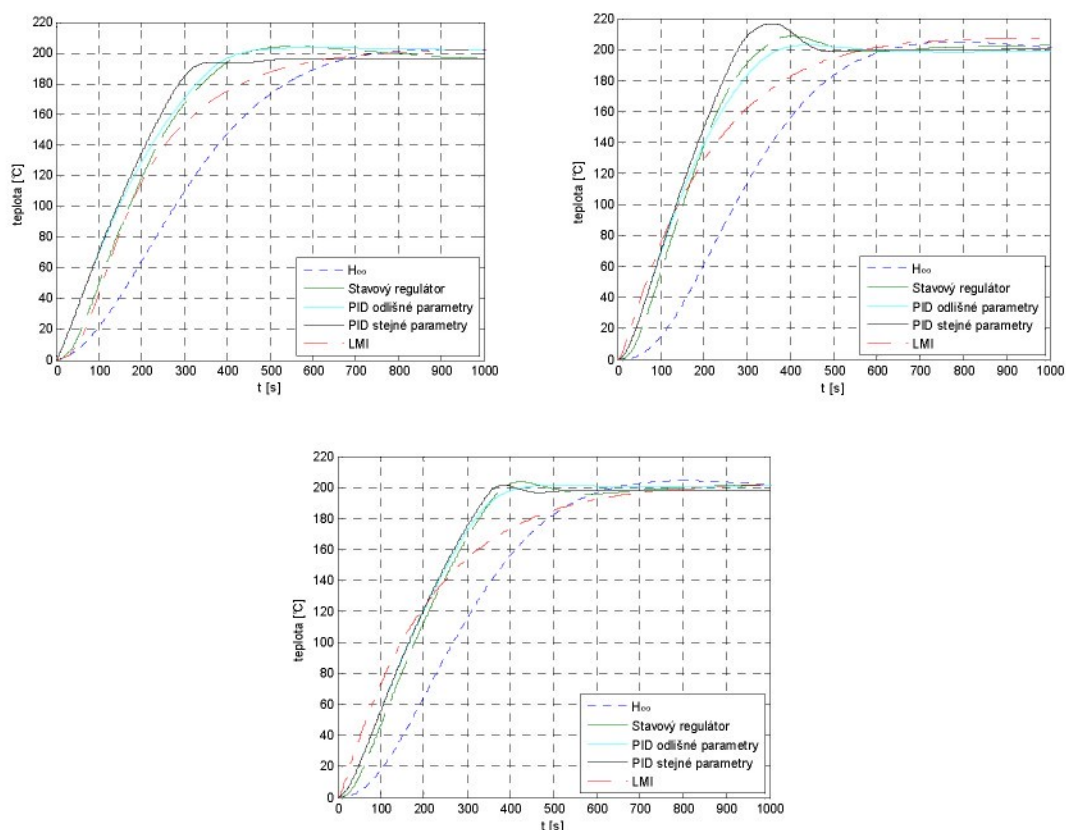
V prvních krocích byl hlavní požadavek odběratele zaměřen hlavně na co nejrychlejší zodpovězení otázky, jestli je vůbec možné výrobní formu vyhřát na požadovanou teplotu pomocí použitých infračervených zářičů. Ve druhé předvýrobní fázi bylo nutno zoptimalizovat homogenitu teplotního pole výrobní formy. Ve třetí zkušební fázi výroby bylo nutno rozložení teplot přizpůsobit kvalitě výrobku, takže na některých místech bylo třeba přizpůsobit teplotní pole změnou ustálené teploty v dané oblasti. V poslední fázi, ve které probíhala příprava na sériovou výrobu, byl kladen důraz kromě kvality teplotního pole také na rychlost dosažení požadovaných teplot.

Jak již bylo řečeno, v prvních krocích bylo nutno dokázat, zda je možno výrobní nástroj vyhřát na potřebnou teplotu, která je potřeba ke slinování práškového PVC. Tato teplota dosahuje zhruba hodnoty 230 °C. Vzhledem k prvnímu experimentu na zkušebním zařízení nebylo nutno dosahovat žádaných teplot s nijak vysokou přesností, a proto byla teplota regulována i vzhledem ke konstrukci zařízení, pouze s použitím dvoupolohové regulace.

V další fázi bylo nutno dosáhnout homogenního ustáleného teplotního pole v nějakém rozumném konečném čase, proto bylo nutno přikročit k použití sofistikovaného způsobu regulace. Vhodný regulační algoritmus byl vybrán vzhledem k požadavkům odběratele, které vycházely z požadavků na produktivitu výroby a na hardwarové možnosti implementace výrobní linky. Požadavky byly také kladeny na relativní jednoduchost návrhu. Dále bylo potřeba brát v úvahu nutnost dosažení nulové ustálené hodnoty regulační odchylky a také minimálního překmitu teplot pole. To by mohlo vést až k poškození výrobní formy, které by se opticky projevilo na finálním výrobku. Z cílů zadaných zadavatelem je třeba si uvědomit, že pro zvolený typ regulátoru je nutno posoudit jakési vyvážení mezi cenou a složitostí implementace daného regulátoru a jeho přínosem, který se promítne na kvalitě finálního výrobku. Lze předpokládat, že sofistikované přístupy k návrhu řídicího algoritmu systému

ohřevu mohou dosahovat lepších regulačních pochodů, potažmo kvality teplotního pole a snad i finálního výrobku. Ovšem je třeba vzít v úvahu, jestli náklady, které je nutno investovat do zařízení ve spojitosti s možnou aplikací sofistikovaných algoritmů řízení, vyváží pouze pravděpodobný přínos na kvalitu vyráběné umělé kůže. Toto kritérium pak pro zadavatele může mít zásadní vliv na nasazení takovýchto algoritmů.

Jak je vidět na Obr. 5.7, požadavek na žádanou hodnotu a malý překmit je splněn prakticky pro všechny ověřované regulátory. Pouze pro návrh stejných parametrů pro celou sadu PID regulátorů je překmit o něco větší. Problém je ale v požadavku na jednoduchost návrhu, tam jasně vítězí regulační obvod s PID regulátory. V případě změny výrobní formy za novou, nebo za formu jiného typu, je pak možno snadno upravit nastavení regulátorů dokonce ručně. To je jeden z důvodů, proč bylo zvoleno využití PID regulátorů. Dalším důvodem volby PID regulátoru byla jednoduchá implementace regulátoru, která je popsána dále a využívá zapojení relé s pružnou zpětnou vazbou.



Obr. 5.7: Porovnání řídicích algoritmů na zjednodušeném modelu pro 1. 2. 3. výstup.

Jedinou nevýhodou použití PID regulátorů jako řídicích prvků je nutnost pro každou regulační smyčku nastavovat jiné parametry regulátoru, což může být poměrně zdlouhavé. To

je důvod, proč byl zvolen kompromis mezi jedním nastavením pro všechny regulační smyčky a různým nastavením pro každou regulační smyčku. Smyčky tedy byly rozříděny podle rychlosti náběhu a statického zesílení do několika skupin, pro které bylo optimalizováno společné nastavení PID regulátoru.

Je třeba si ale uvědomit, že zároveň s optimalizací regulačního algoritmu docházelo k optimalizaci pozice zářičů vůči výrobní formě respektive termočláňkovým čidlům, ale v počátku přípravy výroby ještě zdaleka nebylo dosaženo optimálního stavu poloh zářičů a čidel. To mělo za následek poměrně velké překmity teplot na některých čidlech, a tím poměrně často docházelo k dosažení kritické teplotní hranice, při které musel být systém ohřevu nouzově odstaven. Proto bylo nutno přistoupit k modifikaci řídicího systému, jenž měl potlačit tento mezní stav. Tato modifikace je pak popsána v následující kapitole 0.

5.3.6.1 PID regulátor s kooperací

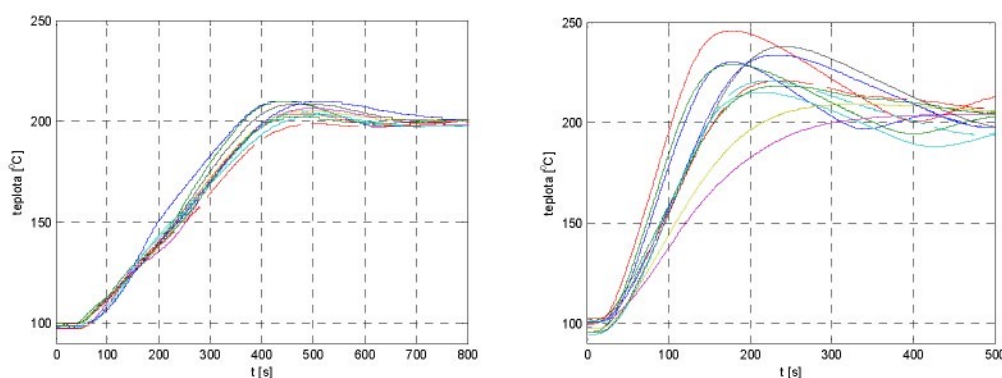
Jak již bylo řečeno, vzhledem k problematice dosažení optimálního stavu nastavení zářičů vůči teplotním čidlům docházelo na teplotním poli výrobní formy k poměrně výrazným překmitům při náběhu teplot na žádanou hodnotu. Bylo to díky tomu, že dodavatel výrobní formy udával maximální povolenou teplotu na lícové (výrobní) straně slushvací formy pouze 260°C. Nad touto hranicí tedy nebyla zaručena stálost povrchových vlastností výrobní formy. To mohlo v důsledku způsobit závažné a nevratné povrchové vady výrobní formy potažmo finálního produktu, jako je například nestejná lesklost a strukturu povrchu na PVC kůži. Vzhledem k obavám z tohoto poškození výrobní formy bylo přistoupeno k aplikaci některých opatření, aby bylo možno poškození formy zabránit. V první řadě bylo aplikováno nouzové odstavení ohřevu v případě dosažení kritické teploty 260°C. Dále pak bylo přistoupeno k opatření, které se při regulaci teplotního pole vypořádá s takto velkým teplotním překmitem při náběhu na žádanou hodnotu činící 210°C až 230°C.

Jelikož k lokálním přehřevům dochází na místech, která dosáhnou žádané hodnoty výrazně rychleji, než místa v jejich okolí, bylo nutno tuto rychlost ohřevu plošně vyrovnat. Tyto rozdíly rychlostí ohřevu jednotlivých částí jsou způsobeny nevhodným rozložením zářičů vůči složitému tvaru povrchu formy. Při daném uspořádání zářičů pak není možné dosáhnout rovnoměrného rozložení intenzity dopadajícího záření po celém povrchu formy bez dalšího zásahu. Je vlastně nutno řídit jednotlivé zářiče tak, aby se intenzita „homogenizovala“, a tím bylo také zajištěného rovnoměrného ohřevu na celém povrchu.

To by bylo možné dosáhnout seřízením jednotlivých regulačních smyček na stejnou rychlost náběhu. To však vede ke komplikovanému návrhu regulátoru, který musí zahrnout i

potlačení vlivu křížových vazeb jednotlivých zářičů na více čidel. Tato problematika je pak popsána v kapitole 5.2. Daleko jednodušší a přitom postačující se ukázala varianta druhá, která vytváří kooperaci mezi jednotlivými smyčkami a při stejném nastavení regulátoru pro všechny regulační smyčky dosahuje přijatelných výsledků. Tato kooperace je pak vytvořena prostřednictvím žádaných hodnot teploty povrchu výrobní formy, které se pro jednotlivé smyčky mění v závislosti na aktuální dosažené teplotě na jednotlivých čidlech. Celý kooperativní algoritmus pak pracuje na principu vyhledání částí povrchu formy, tedy teplot čidel na regulačních smyčkách, které nevyhovují požadavkům na homogenitu pole v průběhu náběhu na žádanou hodnotu. U těchto regulačních smyček je pak daná žádaná hodnota dočasně změněna.

Průběh regulovaných veličin je pak vidět na obrázku Obr. 5.8, kde je demonstrován na reálném zařízení. Na něm je vidět, že algoritmus řízení s využitím kooperace velmi dobře potlačuje veliké překmity při náběhu na požadovanou hodnotu teploty povrchu formy, ovšem dochází k prodloužení doby náběhu. To je důvod, proč je další optimalizace poloh čidel teploty a infračervených zářičů nezbytná.

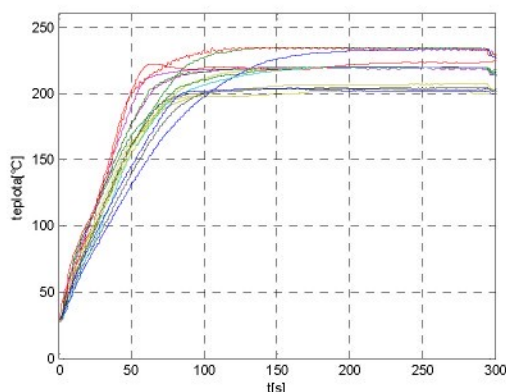


Obr. 5.8: Průběh teplot na reálném systému s použitím regulačního algoritmu s kooperací v levo a bez jeho použití vpravo.

5.3.6.2 PID regulátor bez kooperace

V poslední fázi, ve které probíhala příprava na sériovou výrobu a optimalizace PVC syntetických kůží, byla již optimalizací specializovaným dodavatelem zlepšena pozice lamp a jejich rozložení vůči povrchu formy respektive čidlům. Z tohoto důvodu bylo možno vypustit kooperační přístup k úpravě regulačního pochodu a bylo možno přistoupit k použití regulačního algoritmu, který byl vybrán na začátku kapitoly, tedy byl použit PID regulátor bez kooperace. V něm bylo použito několik různých nastavení PID regulátorů podle parametrů odezvy dané regulační smyčky.

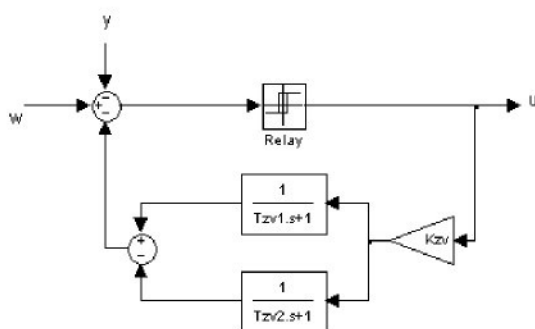
Při postupné opalizaci se ale ukázalo, že vzhledem k nesteré tloušťce výrobní formy nejsou na lícové (výrobní) straně formy na některých místech dostatečné teploty, respektive není naakumulována dostatečná tepelná energie v objemu formy, která dokáže dostatečně spéct práškový materiál. To bylo také důvodem proč používat více žádaných hodnot pro teploty na různých místech. Regulační pochod s více žádanými hodnotami na reálném systému ohřevu je pak vidět na následujícím obrázku.



Obr. 5.9: Průběh vybraných teplot regulačního pochodu na reálné soustavě pro tři žádané hodnoty.

5.3.6.3 Implementace PID regulátoru

Vzhledem k možnostem výrobní linky, která je řízena prostřednictvím PLC vybaveného ON/OFF výstupy, které ovládají spínací prvky spínající v nule (to byl i jeden z důvodů použití PID regulátoru), bylo rozhodnuto, že PID regulátor byl implementován jako dvupolohový PID regulátor s interakcí [6]. Schéma použitého regulátoru je pak na následujícím obrázku.



Obr. 5.10: Dvupolohový regulátor s pružnou zpětnou vazbou.

6 Závěr

V závěru této práce je možno konstatovat, že předložená práce vznikala v rámci vývoje zkušební výrobní linky pro výrobu měkčených umělých kůží pro automobilový průmysl, která využívá technologii takzvaného „slushování“, tedy technologie založené na spékání práškového termoplastického materiálu. Během celého vývoje zkušební linky byly získávány cenné poznatky a závěry, které ve výsledku vedly k realizaci sériové výrobní linky. Je nutno si uvědomit, že na vývoji výrobní linky se podílela celá řada firem, jako například firma Magna (Cadence Innovation), která byla zadavatelem a zároveň vyvíjela výrobní postupy pro použití „slushovací“ technologie na vyvíjeném zařízení. Dále se podílela na vývoji firma AURA Engineering jako projektant a dodavatel technologického zařízení, firma Lenam jako dodavatel matematických analýz a matematické simulační podpory a Technická Univerzita v Liberci jako dodavatel měřicích systémů a řídicích nástrojů.

Návrhy a řešení řídicího systému, kterým se tato práce zabývá, pak byly v daných fázích vázány na časové termíny dalších dodavatelů, montáží a zkouškami výroby. Bylo nutno neustále komunikovat s ostatními pracovníky a dodavateli, a zároveň se podílet na jednotlivých zkouškách vyvíjeného zařízení. Výrobní zkoušky, které byly průběžně prováděny, pak okamžitě poukázaly jednak na problémy s řízením teplotního pole, ale také na problémy konstrukce a nedostatky výrobních postupů. V rámci následných analýz těchto zkoušek bylo nutno zpracovat v první řadě velké množství dat a následně upravit teoretické předpoklady, které již byly nasazeny na výrobní lince podle dostupných výsledků analýz. Tato skutečnost kladla enormní požadavky na návrh řídicího systému a formovala komplexnost daného vývoje a výzkumu ve smyslu analýzy problému a návrhu teoretického řešení. Toto řešení bylo v mnoha případech ověřeno následnou matematicko-fyzikální simulací problému, která zpravidla předcházela realizaci řešení a jeho následnému odzkoušení na vyvíjeném zařízení. Následná analýza výsledků pak měla odhalit případné další problémy spojené s daným řešením a popřípadě nastínit další postup vývoje pro řešení daného problému.

Pro řešení systém ohřevu, který je využit pro vyhřívání výrobní formy na lince pro výrobu měkčených umělých kůží, a který je možno z hlediska řízení označit jako rozsáhlý MIMO systém, byly v rámci této disertační práce prováděny výzkumné činnosti, které zahrnují:

- Analýzu a výběr infračervených zářičů jako akčních členů pro systém ohřevu.

- Vývoj a tvorbu simulačního modelu pro MIMO systém, který je tvořen vyhřívacím zařízením a výrobní formou.
- Výběr vhodné struktury řízení.
- Analýzu možností vybraných řídicích algoritmů.
- Návrh a výběr řídicí strategie žádaných hodnot podle požadavků, které byly definovány odběratelem a jenž vycházely z kvality finálního výroku.

Vybraný algoritmus řízení i metodika pro výběr optimální struktury řízení byly odzkoušeny na prototypovém stroji pro před-sériovou výrobu a současné době jsou již reálně nasazeny na stroji, který slouží k výrobě sériové. Vypracovaná metodika, která je popsána v rámci této práce, pak může být v budoucnu použita na systémech podobných vlastností a nadále bude rozvíjena a optimalizována v rámci plánovaného projektu ministerstva průmyslu a obchodu.

Je možno konstatovat, že na základě výrobních zkoušek byly z hlediska zadavatele Magna (Cadence Innovation), globální cíle splněny (I., II. a III.)

Shrneme-li tedy výsledky této práce, pak můžeme konstatovat, že práce:

- 1) Přispívá k rozšíření teoretických poznatků v oboru zaměřeném na návrh a implementaci MIMO řídicích systémů pro ohřev pomocí infračervených zářičů v těchto bodech:
 - Metodika polohování infračervených zářičů a následné přiřazení zářičů a čidel s ohledem na požadavky řízení na základech měření.
 - Analýza vlastností sofistikovaných algoritmů řízení a PID regulátorů při řešení úlohy ohřevu skupinou infračervených zářičů z hlediska kvality regulace a její implementace.
 - Předkládá základní poznatky pro vývoj metodiky určené k analýze a syntéze řízení systému ohřevu skupinou infračervených zářičů, které budou základem připravovaného systému, který umožní automatickou syntézu nastavení regulátorů a volbu struktury regulačního obvodu.
 - Návrh strategie řízení pro dosažení požadovaných technologických parametrů teplotního pole pomocí žádaných hodnot teploty na jednotlivých čidlech. Tento způsob řízení se označuje jako „regulátory v kooperaci“.

- 2) Má okamžitý přínos pro průmyslovou praxi, za který pak lze pokládat:
- Návrh řídicího systému pro řízení teplotního pole výrobní formy vyhřívané infračervenými zářiči a jeho implementace na PC, který zajistí dosažení požadovaných technologických parametrů vzhledem k teplotám tak, aby bylo dosaženo definovaných kvalitativních parametrů finálního výrobku.
 - Implementaci řídicího systému jednak na před-sériové prototypové lince a následně na lince pro sériovou výrobu, která provádí ohřev na třech nezávislých pozicích, a to dvě pozice přehřevu a jedna pozice pro nanášení a spečení materiálu. Tato linka pak může využívat i většího počtu výrobních forem.
- 3) Přináší nové poznatky a metodiky, a ty pak lze použít v budoucnosti při vývojových a výzkumných činnostech pro:
- Další vývoj automatizované přípravy výroby z hlediska ohřevu a regulace teploty, a to zejména při zařazování nového sortimentu, respektive zavádění nového modelového produktu do sériové výroby.
 - Nalezení takových principů řízení teplotního pole pomocí infračervených zářičů, které umožní dosáhnout teplotního pole požadované kvality a to bez použití tak vysokého počtu čidel. Tato metodika předpokládá použití pouze několika čidel v klíčových oblastech, která umožní vyhřát výrobní formu na základě „zkušeností“ regulačního algoritmu z předcházejících cyklů.

Literatura

- [1] KNIGHTS, Mikell. Injection molding. *Plastics Technologi*. Aug. 2006, no. 52, s. 52-71.
- [2] Slush TPOs now match PVC for detail. , *European Automotive Design*. Sep. 2005, no. 9, s. 25.
- [3] TOLINSKI, Mike. The TPO Skins Game. *Automotive Plastics*. Dec. 2008, no. 58, s. 36-39.
- [4] *United States Patent and Trademark Office* [online]. 2007 , 9.1.2007 [cit. 2008-09-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.uspto.gov/>>.
- [5] SKOGESTAD, Sigurd, POSTLETHWAITE, Ian. *Multivariable Feedback Control : Analysis and Design*. 2nd edition. England : John Wiley & Sons Ltd, 2005. 575 s.
- [6] BEQUETTE, B. Waine. *Process Control : Modeling, Design, and Simulation*. New Jersey : Pearson Education, Inc., 2003. 770 s.
- [7] *Aktuelles Kiefel Kunststofftechnologien* [online]. 2007 [cit. 2007-01-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.kiefel.de/>>.
- [8] *KraussMaffei* [online]. 2007 [cit. 2007-01-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.krauss-maffei.de>> .
- [9] KROKAVEC, Dušan, FILASOVÁ, Anna. Decentralized control design using LMI. In *Proceedings of 8th International Carpathian Control Conference*. Košice : [s.n.], 2007. s. 381-384. ISBN 978-80-8073-8.
- [10] NÁHLOVSKÝ, Tomáš. *Model teplotních polí jednoduchých těles při ohřevu zářiči*. Liberec, 2008. 93 s. , CD-ROM. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Osvald Modrlák, CSc. .

Vlastní literatura

- [V1] ŠKOLNÍK, Petr, MODRLÁK, Osvald. Control methods of temperature field heated by infrared radiators. In *Proceedings of 9-th International Carpathian Control Conference*. Romania : University of Craiova, 2008. s. 623-626. ISBN 9789737468970.
- [V2] MODRLÁK, Osvald, ŠKOLNÍK, Petr. Practical approach for temperature control in an industrial heating process with infrared radiators. In *Proceedings of 8th International Carpathian Control Conference*. Košice : Tu Košice, 2007. s. 466-469. ISBN 978-80-8073-8.
- [V3] HUBKA, Lukáš, ŠKOLNÍK, Petr. A practical approach for temperature modelling and control of industrial heating process with infrared radiators in a predevelopment of a production line, In *Miedzynarodowa konferencja młodych naukowcow szkol wyszych Euroregionu Nysa*. Jelenia Gora: Akademia Ekonomiczna we Wrocławiu, 2007. s. 115-118. ISBN: 978-83-60975-00-8
- [V4] MARTINEC, Tomáš, ŠKOLNÍK, Petr, HUBKA, Lukáš. *Modelling and control of temperature field of an industrial form with infrared radiators*. In *ECMS 2007*. Liberec : Technical University of Liberec, 2007. s. 215-220. ISBN: 978-80-7372-202-9
- [V5] HUBKA, Lukáš, MENKINA, Michal, ŠKOLNÍK, Petr. *Modelling of the drum-boiler in Matlab*. In *ECMS 2007*. Liberec : Technical University of Liberec, 2007. s. 203-208. ISBN: 978-80-7372-202-9
- [V6] Distributed temperature control of a body part surface. In *Control of power & heating systems 2006*. Zlín : Tomas Bata University in Zlín, 2006. s. 1-4. ISBN 80-7318-409-5.
- [V7] ŠKOLNÍK, Petr, MODRLÁK, Osvald. Rotationspeed state and fuzzy control of DC motor. In *Process control2006*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2006. s. 1-4. ISBN 80-7194-860-8.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: P 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612V045 – Technická kybernetika

ŘÍZENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ POMOCÍ OHŘEVU INFRAČERVENÝMI ZÁŘIČI

Control of temperature field via infrared radiators

Ing. Petr Školník

Školitel: Doc. Ing. Osvald Modrlák, CSc.

Pracoviště: Ústav řízení systémů a spolehlivosti

Počet stran: 131

Počet příloh: 1+CD-ROM

Liberec 2010

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací se školitelem disertační práce a ostatními odborníky v oboru.

V Liberci, 29. 1. 2010

Anotace

Tato disertační práce se zabývá komplexním návrhem řídicího systému pro systém ohřevu výrobní linky na výrobu měkčených umělých kůží, pro kterou byla jako zdroj tepla zvolena soustava infračervených zářičů. Z hlediska řízení se jedná o návrh řízení rozsáhlého MIMO systému, který musí splňovat jak podmínky požadované kvality výrobků tak i dodržet cenové limity na jeho pořízení a náklady spojené s výrobou jednotlivých výrobků. Jako výrobní nástroj je zde použita tvarově složitá výrobní forma, kterou je třeba vyhřát na teplotu definovanou použitou technologií. První část práce obsahuje rozbor vlivu polohy jednotlivých zářičů na rozložení teplot na formě a jejich dosažitelnost. Druhá část práce se zabývá tvorbou simulačního modelu systému ohřevu, jenž je vytvořen na základě naměřených dat z reálného zařízení. Součástí této části je návrh metodiky pro volbu optimální struktury řídicího systému teploty. Ve třetí části se práce zabývá výběrem, syntézou a implementací řídicího algoritmu, který umožní v rámci podmínek definovaných odběratelem dosáhnout optimálního teplotního pole výrobní formy. V závěru této části je pak provedeno ověření regulačního algoritmu a vyhodnocení dosažených výsledků na stroji pro prototypovou a pro malosériovou výrobu.

Klíčová slova:

MIMO

Technologie slush moulding

Kooperace PID

Teplotní pole

Měkčená umělá kůže

Annotation

This doctoral thesis deals with a complex control system design of the production line heating system used in manufacturing synthetic soft skins for which an infrared radiators system was selected as a heat source. The design concerns, from the control point of view, an extensive MIMO system control design which has to meet both the conditions of the required product quality as well as its purchasing price limits and expenses spent on manufacturing of each product. A complicated shape thin-wall form, which needs to be heated up at the temperature defined by the technology in-use, was used as the manufacturing tool. The first part of the thesis contains analysis of the effect of each radiator position on both the form temperature dispersion as well as its attainability. The second part of the thesis deals with the heating system model construction which is created on the basis of measured data obtained from real apparatus. A proposal of methodology for the optimal structure of the temperature control system is a component of this part of the thesis. The third part of this thesis deals with selection, synthesis and implementation of control algorithm which allows that the optimal temperature field of the manufacturing form can be reached within the conditions defined by the customer. Carrying out of the control algorithm verification and the acquired outcomes-based evaluation, for which a prototype and low-volume production machine was used, comprise the final part of this doctoral thesis.

Keywords:

MIMO

Slush moulding

Cooperation of PID

Temperature field

Artificial soft skin

Obsah

Anotace	2
Annotation	4
Obsah	5
Seznam obrázků	7
Seznam symbolů	12
1 Úvod	14
2 Současný stav problematiky	17
2.1 Výrobní technologie	17
2.2 Vyhřívání teplotních polí	17
2.3 Řízení teplotních polí	19
3 Výrobní zařízení a požadavky odběratele na homogenitu teplotního pole	20
3.1 Cíle práce	20
3.2 Struktura vyvíjeného zařízení	22
3.3 Zkušební zařízení	23
3.4 Výrobní zařízení	25
4 Rozbor vlivu polohy zářičů a teplotních snímačů na teplotní pole	28
4.1 Základní pojmy	28
4.1.1 Teplotní pole	28
4.1.2 Šíření tepla	29
4.1.3 Materiálové konstanty při šíření tepla	30
4.2 Matematicko-fyzikální model přenosu tepla	30
4.2.1 Stefan-Boltzmannův zákon	30
4.2.2 Rovnice vedení tepla	31
4.2.3 Okrajové a počáteční podmínky	33
4.3 Charakteristiky infračervených zářičů	34
4.3.1 Infračervené zářiče jako zdroje tepla pro vyhřívání výrobní formy	34
4.4 Simulace teplotního pole výrobní formy	37
4.4.1 Charakteristiky infračervených zářičů	37
4.4.2 Simulace teplotního pole pro ověření proveditelnosti	45
4.4.3 Simulace pro ověření regulace	48
4.4.4 Simulace teplotního pole pro různé struktury rozmístění zářičů	53

4.5	Dosažitelnost ustálených stavů	60
5	Identifikace a tvorba modelu	62
5.1	Volba typu modelu	62
5.2	Struktura zjednodušeného modelu	62
5.3	Identifikace	63
5.4	Přiřazení zářičů do regulační smyčky	68
5.4.1	Přiřazení čidel a zářičům podle maximálního statického zesílení	68
5.4.2	Přiřazení čidel k zářičům podle RGA	69
5.4.3	Přiřazení čidel a zářičů podle maximálního statického zesílení II	74
5.4.4	Přiřazení čidel k zářičům podle nejrychlejšího čidla	80
5.5	Ověření podmínky říditelnosti a dosažitelnosti	81
6	Výběr a návrh řídicího algoritmu	86
6.1	Zjednodušený model	86
6.2	PID regulátor	88
6.3	Stavový regulátor	91
6.4	H_∞ návrh regulátoru	95
6.5	LMI návrh regulátoru	98
6.6	Výběr optimálního regulátoru a jeho implementace	100
6.6.1	PID regulátor s kooperací	105
6.6.2	PID regulátor bez kooperace	109
6.6.3	Implementace PID regulátoru	111
7	Regulační pochody při výrobním cyklu	113
7.1	Vliv uspořádání zářičů ve výrobním cyklu	113
7.2	Lokální řízení teploty lícе formy podle rubové strany formy	114
7.3	Stabilita výrobního cyklu	119
7.4	Průběh teplot na čidlech v jednotlivých fázích výrobního cyklu	121
8	Shrnutí výsledků	124
9	Závěr	126
	Literatura	129
	Vlastní literatura	131

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Linka Krauss Maffei.....	18
Obr. 3.1: Ideové schéma zařízení vyvíjené linky	22
Obr. 3.2: Experimentální prototypové zařízení.	24
Obr. 3.3: Experimentální systém ohřevu.....	24
Obr. 3.4: Snímací prvek teploty PT100 na experimentálním zařízení.	25
Obr. 3.5: Přichycení termočlánku k výrobní formě.....	25
Obr. 3.6: celkový pohled na výrobní linku.....	26
Obr. 3.7: Svazkování dvoudrátových termočlánků	26
Obr. 3.8: Forma s jedno-vodičovými termočlánky.	27
Obr. 3.9: Rozložení zářičů (vlevo) vůči tvaru formy (vpravo).....	27
Obr. 4.1: Prezentace teplotního pole prostřednictvím obrázku.	29
Obr. 4.2: Princip přenosu tepelné energie zářením.	35
Obr. 4.3: Interakce záření s překážkou.....	35
Obr. 4.4: Schematický náčrt reflektoru s IR žárovkou [16].	36
Obr. 4.5: Vyzařovací charakteristiky 1kW a 500W zářičů [19].....	38
Obr. 4.6: Naměřené vyzařovací charakteristiky reálných zářičů. [16]	39
Obr. 4.7: Parametrizovaný model naměřené vyzařovací charakteristiky. [16]	39
Obr. 4.8: Vyzařovací charakteristika 2kW zářiče [18].	40
Obr. 4.9: Zavedený souřadný systém [16].....	41
Obr. 4.10: Grafické znázornění funkce popisující parametr α_p [16].....	42
Obr. 4.11: Grafická prezentace funkce popisující intenzitu dopadajícího záření.....	43
Obr. 4.12: Řez prostorovou funkcí pro vzdálenost zářiče od ozařovaného povrchu $z=0,1\text{m}$	44
Obr. 4.13: Řez prostorovou funkcí pro vzdálenost zářiče od ozařovaného povrchu $z=0,2\text{m}$	44
Obr. 4.14: Řez prostorovou funkcí pro vzdálenost zářiče od ozařovaného povrchu $z=0,3\text{m}$	45
Obr. 4.15: Část reálné formy [20].....	46
Obr. 4.16: Použitý model ohřevu [20].....	46
Obr. 4.17: Výsledek simulace ohřevu s malou vyzařovací plochou [20].....	47
Obr. 4.18: Rozložení vyzařované energie zářiče PHILIPS [16].....	48

Obr. 4.19: Model použitý pro simulaci ohřevu výrobní formy s konkrétními zářiči [22].	49
Obr. 4.20: Výsledek simulace po 250 sekundách při zapnutí všech zářičů najednou [22].	51
Obr. 4.21: Výsledek simulace po 250 sekundách při použití PI regulátorů [22].	51
Obr. 4.22: Průběh teploty pro simulaci zapnutí všech zářičů [22].	52
Obr. 4.23: Průběh teploty výrobní formy pro simulaci s dvoupolohovou regulací [22].	52
Obr. 4.24: Průběh teploty výrobní formy pro simulaci s použitím PI regulátoru [22].	53
Obr. 4.25: Teplota v čase 230 sekund pro maticové uspořádání zářičů ve vzdálenosti 5, 10 a 20 centimetrů od ozařovaného povrchu [21].	54
Obr. 4.26: Teplota v čase 230 sekund pro cihlové uspořádání zářičů ve vzdálenosti 5, 10 a 20 centimetrů od ozařovaného povrchu [21].	54
Obr. 4.27: Výsledek simulace pro maticové (vlevo) a cihlové (vpravo) uspořádání zářičů [21].	55
Obr. 4.28: Simulovaná struktura zářičů. Vlevo maticová a vpravo cihlová struktura [16].	56
Obr. 4.29: Intenzita dopadajícího záření pro maticové (vlevo) a cihlové uspořádání zářičů (vpravo) [16].	57
Obr. 4.30: Teplota v čase 4000 sekund pro cihlové (vlevo) a maticové uspořádání zářičů. Vzdálenost zářičů od desky je 10 centimetrů [16].	57
Obr. 4.31: Teplota v čase 4000 sekund pro cihlové (vlevo) a maticové uspořádání zářičů. Vzdálenost zářičů od desky je 15 centimetrů [16].	57
Obr. 4.32: Příčný řez teplotním polem pro maticovou (vlevo) a cihlovou strukturu. Zářiče jsou vzdáleny 10 centimetrů od povrchu ozařované desky [16].	58
Obr. 4.33: Podélný řez teplotním polem pro maticovou (vlevo) a cihlovou strukturu. Zářiče jsou vzdáleny 10 centimetrů od povrchu ozařované desky [16].	58
Obr. 4.34: Příčný řez teplotním polem pro maticovou (vlevo) a cihlovou strukturu. Zářiče jsou vzdáleny 15 centimetrů od povrchu ozařované desky [16].	58
Obr. 4.35: Podélný řez teplotním polem pro maticovou (vlevo) a cihlovou strukturu. Zářiče jsou vzdáleny 10 centimetrů od povrchu ozařované desky [16].	59
Obr. 5.1: Data pro identifikaci posunutá do počátku.	64
Obr. 5.2: Grafická reprezentace matice zesílení před optimalizací poloh zářičů a čidel.	66
Obr. 5.3: Grafická reprezentace matice zesílení před optimalizací poloh zářičů a čidel.	66

Obr. 5.4: Grafická reprezentace matice zesílení po částečné optimalizaci poloh zářičů a čidel.....	67
Obr. 5.5: Grafická reprezentace matice zesílení po částečné optimalizaci poloh zářičů a čidel.....	67
Obr. 5.6: Porovnání dat z modelu a dat naměřených.....	68
Obr. 5.7: Matice RGA pro neoptimální nastavení čidel a infračervených zářičů.....	71
Obr. 5.8: Grafická reprezentace matice zesílení pro neoptimální rozložení čidel a zářičů. Prvky matice jsou přeuspořádány podle RGA.....	71
Obr. 5.9: Grafická reprezentace matice zesílení pro neoptimální rozložení čidel a zářičů. Prvky matice jsou přeuspořádány podle RGA.....	72
Obr. 5.10: Matice RGA pro částečně optimalizované nastavení čidel a infračervených zářičů.....	72
Obr. 5.11: Grafická reprezentace matice zesílení pro optimalizované rozložení čidel a zářičů. Prvky matice jsou přeuspořádány podle RGA.....	73
Obr. 5.12: Grafická reprezentace matice zesílení pro částečně optimalizované rozložení čidel a zářičů. Prvky matice jsou přeuspořádány podle RGA.....	73
Obr. 5.13: Matice přiřazení podle statického zesílení.....	75
Obr. 5.14: Matice statických zesílení pro přiřazení podle statického zesílení (všechna čidla).....	75
Obr. 5.15: Matice statických zesílení pro přiřazení podle statického zesílení (matice zredukováno o neřízená čidla).....	76
Obr. 5.16: Matice RGA pro přiřazení podle statického zesílení.....	76
Obr. 5.17: Grafická prezentace matice G_{UV}	78
Obr. 5.18: Matice přiřazení sestavená podle SVD rozkladu.....	78
Obr. 5.19: Matice statických zesílení pro přiřazení podle SVD rozkladu (pro všechna čidla).....	79
Obr. 5.20: Matice statických zesílení pro přiřazení podle SVD rozkladu (Matice zredukováno o neřízená čidla).....	79
Obr. 5.21: Matice RGA pro přiřazení podle SVD rozkladu.....	80
Obr. 5.22: Akční zásah pro zářiče přiřazené podle zesílení.....	83
Obr. 5.23: Akční zásah pro zářiče přiřazené podle SVD rozkladu.....	84
Obr. 5.24: Teploty pro vypočtený akční zásah na zredukováném systému.....	84
Obr. 5.25: Teploty pro vypočtený akční zásah na nezredukováném systému.....	85
Obr. 6.1: Přejímové charakteristiky zjednodušeného modelu.....	87

Obr. 6.2: Regulační obvod.....	88
Obr. 6.3: Regulační obvod pro zapojení s PID regulátorem.	88
Obr. 6.4: Průběh teploty na zjednodušeném modelu formy pro regulátor navržený pro každou regulační smyčku.	89
Obr. 6.5: Průběh teploty na zjednodušeném modelu formy pro stejný regulátor ve všech regulačních smyčkách.	90
Obr. 6.6: Schéma regulačního obvodu se stavovým regulátorem.	91
Obr. 6.7: Průběh výstupních teplot zjednodušeného modelu se stavovou regulací.	94
Obr. 6.8: regulační schéma s H_∞ regulátorem.	95
Obr. 6.9: Přechodové charakteristiky regulátorů získaného metodou H_∞	97
Obr. 6.10: Frekvenční amplitudové charakteristiky regulátorů získaného metodou H_∞	97
Obr. 6.11: Průběh teplot zjednodušeného modelu pro H_∞ regulátor.	98
Obr. 6.12: Schema regulačního obvodu pro LMI návrh regulátoru.	99
Obr. 6.13: Výstupní teploty zjednodušeného modelu řízeného LMI regulátorem.	100
Obr. 6.14: Průběhy teplot povrchu rubové strany formy pro dvupolohovou regulaci bez hystereze.....	101
Obr. 6.15: Regulační obvod pro regulaci s dvupolohovým relé bez hystereze.....	102
Obr. 6.16: Porovnání řídicích algoritmů pro 1. výstup zjednodušeného modelu.....	103
Obr. 6.17: Porovnání řídicích algoritmů pro 2. výstup zjednodušeného modelu.....	104
Obr. 6.18: Porovnání řídicích algoritmů pro 3. výstup zjednodušeného modelu.....	104
Obr. 6.19: Průběh regulované teploty zjednodušeného systému s použitím regulačního algoritmu s kooperací.	107
Obr. 6.20: Průběh regulované teploty zjednodušeného systému bez použití regulačního algoritmu s kooperací.	108
Obr. 6.21: Průběh teplot na reálném systému při použití algoritmu regulace s kooperací.....	108
Obr. 6.22: Průběh teplot na reálném systému bez použití algoritmu regulace bez kooperací.....	109
Obr. 6.23: Průběh vybraných teplot regulačního pochodu na reálné soustavě.....	110
Obr. 6.24: Průběh vybraných teplot regulačního pochodu na reálné soustavě pro tři žádané hodnoty.	111
Obr. 6.25: Dvupolohový regulátor s pružnou zpětnou vazbou.....	112
Obr. 7.1: Vliv jednotlivých záříčů na teplotu výrobní formy.....	114
Obr. 7.2: Pohled termokamerou na vyhřátou výrobní formu.	114

Obr. 7.3: Průběh na několika čidlech pro různé žádané hodnoty.....	115
Obr. 7.4: Teploty všech čidel v regulaci pro různé žádané hodnoty.	116
Obr. 7.5: Průběh teploty a spínání zářiče v několika cyklech.	117
Obr. 7.6: Průběh teploty a spínání zářiče v několika cyklech. Žádaná hodnota je zde snížena o 10°C.....	118
Obr. 7.7: Průběh teploty na čidle, které je použito pro řízení dvou zářičů.....	118
Obr. 7.8: Teploty v několika cyklech při použití dvou výrobních forem (regulované čidlo).....	120
Obr. 7.9: Průběh teploty v několika cyklech při použití dvou výrobních forem (neregulované čidlo).....	120
Obr. 7.10: Fáze cyklu pro čidlo s regulací.....	122
Obr. 7.11: Fáze cyklu pro čidlo s regulací.....	122
Obr. 7.12: Fáze cyklu pro čidlo s regulací.....	123
Obr. 7.13: Fáze cyklu pro čidlo bez regulace.....	123

Seznam symbolů

A, B, C, D	matice stavového popisu systému
a	koeficient absorpce,
c	měrná tepelná kapacita [J kg/K^{-1}]
c_0	rychlost světla $c_0=2,99792458 \times 10^8$ m/s
$\mathbf{e}(s)$	vektor obrazů regulační odchylky
$e, e_b(T)$	úhrnná intenzita záření [W/m^2]
$e_b(\lambda_c, T)$	intenzita záření černého tělesa na dané vlnové délce při dané teplotě [W/m^2]
f	hustota zdrojů
G	matice zesílení modelu soustavy
G(s)	matice obrazových přenosů modelu soustavy
g_{ij}	prvek matice Λ
$G_{jk}(s)$	obrazový přenos z k-tého vstupu na j-tý výstup
G_S(s)	matice obrazových přenosů zjednodušeného modelu
G_{UV}	matice zesílení modelu soustavy upravená podle SUV rozkladu
h	Planckova konstanta $h=6,62606876 \times 10^{-34}$ J·s,
J	hodnota kritéria
k_B	Boltzmanova konstanta $k_B=1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K.
K_{jk}	statické zesílení obrazového přenosu $G_{jk}(s)$
K_R	stavový regulátor
LMI	lineární maticová nerovnost (<u>L</u> inear <u>M</u> atrix <u>I</u> nequality)
MIMO	systém s více vstupy a více výstupy (<u>M</u> ulti- <u>I</u> mput <u>M</u> ulti- <u>O</u> utput)
N	matice smíšené citlivostní funkce.
n	normálový vektor k hranici Γ .
PID	<u>P</u> roportional- <u>I</u> ntegral- <u>D</u> erivative regulátor
Q	měrný dodávaný výkon [W/m^3],
q	rychlost toku
q_n	hustota tepelného toku [W/m^2],
r	koeficient reflexe,
R, R(s)	regulátor, matice obrazových přenosů regulátoru
r_0, r_1, r_2	parametry PID regulátoru
RGA	<u>R</u> elative <u>G</u> ain <u>A</u> rray

S	diagonální matice se singulárními čísly na hlavní diagonále
T	absolutní teplota [K],
T_1^{jk}, T_2^{jk}	časové konstanty obrazového přenosu $G_{jk}(s)$
T_{ext}	teplota okolního prostředí
u	potenciál
U	unitární matice výstupních směrů
u(s)	Laplaceův obraz vektoru vstupů
u_i, y_i	i-tý vstup soustavy, i-tý výstup soustavy
v	rychlost pohybu kontinua [m/s],
V	unitární matice vstupních směrů
w(s)	vektor obrazů žádaných hodnot
W_P, W_U, W_T	váhové funkce smíšené citlivostní funkce
y(s)	Laplaceův obraz vektoru výstupů
α	součinitel přestupu tepla z jednoho prostředí do druhého [W/m ² ·K].
Γ	hranice obklopující uvažované kontinuum
ε	emisivita tělesa, $0 < \varepsilon \leq 1$.
λ	měrná tepelná vodivost [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
$\Lambda(G)$	RGA matice pro matici G
λ_c	vlnová délka elektromagnetického záření [m],
ρ	hustota prostředí [kg/m ³],
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta a platí $\sigma=5,670400 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$,
τ	koeficient respektující konečnou rychlost šíření tepla [kg/m ³].
τ	koeficient transmise
Ω	kontinuum

1 Úvod

Nedílnou součástí mnoha výrobních procesů je tepelné zpracování materiálu, ať už jde o tavení, vysoušení materiálu nebo například tvrzení povrchu. Tyto procesy jsou využívány v mnoha průmyslových odvětvích jako například metalurgie, zpracování kovů a plastů nebo jen pro finální povrchové úpravy některých výrobků. Pro jednotlivé výrobní technologie, které jsou si často velice podobné, je pak zpravidla nutné vyvíjet specifické systémy ohřevu, které jsou navrhovány a optimalizovány pro jednotlivé technologie.

Jedním z hlavních parametrů systému ohřevu je pak zvolený zdroj tepla a transportní médium, které přenáší tepelnou energii ze zdroje k výrobnímu nástroji nebo přímo k výrobku. Jako transportní médium pak může být zvoleno například horký olej, horký vzduch, infračervené záření, elektrické pole, elektrický proud a mnoho dalších. Při volbě topného média je pak hned několik kritérií, ke kterým je třeba přihlédnout. Mohou to být náklady na pořízení topného média a zdroje tepelné energie, nebo další náležitosti spojené s topným médiem a zdrojem tepla. Některá média vyžadují podpůrné hospodářství, které zajišťuje chod a hospodaření s médii systému ohřevu. Dalším neméně důležitým kritériem je pak ekologická zátěž životního prostředí, která je způsobena provozem takovéto technologie. V případě použití oleje jako topného média je to například nutnost zabránit úniku média, které je používáno ve velkých objemech a s tím pak spojené zřízení olejového hospodářství. Problém také může být v doprovodných jevech při provozu, které vznikají při použití některých médií. U vzduchu je to pak například nevýhoda vzniku vysokého hluku, který je způsoben nutností proudění velkého množství média. Horký vzduch totiž musí proudit kolem výrobku nebo výrobního nástroje v dostatečném množství, aby bylo dosaženo požadované teploty. Dále může vznikat například elektromagnetické rušení. To může být způsobeno při využití elektromagnetického pole pro ohřev.

Tato práce je výsledkem vývoje systému ohřevu pro zcela nový typ technologického zařízení. Tento vývoj probíhal na základě inovačního a vývojového programu firmy Magna (dříve Cadence Innovation), která je dodavatel plastových dílů pro automobilový průmysl. Jako topné médium, které transportuje teplo na rubovou stranu výrobní formy, na jejíž lícovou stranu je pak nanesen zpracováváný materiál, zvolil zadavatel infračervené záření. V řešeném systému je infračervené záření generováno pomocí soustavy speciálních vláknových zářičů, které mají největší vyzařovanou intenzitu právě v infračervené části

elektromagnetického spektra. Podle dosažitelných zdrojů je použití takto koncipovaného systému ohřevu ojedinělé a i přes některé nevýhody přináší řadu nesporných výhod.

Hlavními výhodami tohoto řešení vzhledem k velikosti jednotlivých zářičů vůči výrobní formě jsou:

- Možnost lokálně ovlivňovat teplotu jednotlivých částí výrobku během zpracování. To pak umožňuje lokálně měnit výsledné vlastnosti finálních produktů, které jsou závislé na teplotě. Tím je pak dána technologovi možnost optimalizovat výsledný produkt bez nutnosti **konstrukčních** zásahů do systému ohřevu.
- Další výhodou je minimální lokální ekologická zátěž na okolí a odpadá také další podpůrné hospodářství, jako například při ohřevu horkým olejem. Navíc v takto koncipovaném systému ohřevu je absence pohybu hmoty topného média a dalších pohyblivých částí spojených se systémem ohřevu, jako například při ohřevu horkým vzduchem nebo pískem. Takovýto systém ohřevu je tedy velice tichý.
- Předpokládaná úspora elektrické energie ve srovnání s jinými způsoby ohřevu.

Nevýhodou tohoto typu ohřevu je pak:

- Nutnost řešit problém se směřováním světelného toku jednotlivých zářičů. Ty je nutno směřovat přesně oproti jednotlivým čidlům na povrchu výrobní formy a zároveň je nutno zajistit co nejhomogennější dopadající světelnou intenzitu. Tímto pak bude možno snadněji zajistit požadovanou homogenitu výsledné teploty povrchu výrobní formy. (Akční veličina a její dynamické účinky závisí na vzdálenosti, úhlu natočení a povrchových vlastnostech rubové strany formy).
- Nutnost udržovat rubovou stranu výrobní formy ve vyhovujícím stavu (černění).
- Problém s přívodem poměrně vysokých elektrických proudů k infračerveným zářičům, které jsou ve výrobním zařízení umístěny na rotační části.
- Instalace a čtení sítě mnoha teplotních čidel nutných k regulaci správné teploty výrobní formy.

Vývoj nových plastových materiálů a jejich vlastností vede ke stále častějšímu používání plastových výrobků nejen v domácnostech, ale plastové výrobky nacházejí stále větší uplatnění i v letectví a zejména v automobilovém průmyslu. V projektu, který je částečně řešen v této práci a je v něm použit systém ohřevu tenkostěnné niklové formy

složitého tvaru pomocí soustavy infračervených zářičů, jsou vyráběny plastové díly slinováním termoplastů v podobě prášku („powder slush moulding“ – „technologie slushování“). V této technologii je třeba vyhřát výrobní nástroj (formu) na přesně definovanou teplotu a na ni pak následně nanést termoplastický polotovar v podobě prášku, který je pak za definované teploty slinut do finálního výrobku. Tato práce se pak zabývá syntézou a výběrem řídicího algoritmu pro systém ohřevu, ale okrajově také zmiňuje problematiku optimálního rozložení zářičů vůči výrobní formě.

2 Současný stav problematiky

2.1 Výrobní technologie

V současné době jsou pro výrobu plastových dílů (v našem případě umělých měkkčených kůží) pro automobilový průmysl používány převážně dvě technologie. Je to především vstřikování plastů (injection moulding), které je obecně velice často používanou technologií i pro neměkkčené plastové díly. Druhou používanou technologií je slinování práškových termoplastů (powder slush moulding).

Jak bylo uvedeno v [2] a [3], obě technologie mají své výhody a nevýhody. Technologie vstřikování plastů umožňuje daleko rychlejší výrobu než technologie slinování práškových termoplastů, ovšem vyžaduje poměrně složitý výrobní nástroj. Oproti tomu technologie slinování prášku dosahuje daleko kvalitnějšího povrchu výrobku, a to jak vzhledového, tak dotykového vjemu povrchu, ovšem za cenu prodloužení času výroby. Z těchto důvodů jsou výrobky vyrobené slinováním prášku určeny hlavně pro automobily vyšších tříd. Obě tyto technologie, jak je uvedeno v [1] a [3], pak mohou být použity pro produkci vícebarevných výrobků. V případě technologie vstřikování dochází ke vstřiku všech barevných složek najednou, což ale vyžaduje vybavení vstřikovací formy poměrně složitou vtokovou soustavou. V případě výroby vícebarevného výrobku technologií slinování termoplastického prášku, jsou jednotlivé barvy nanášeny v několika fázích. Zde je pak potřeba pro každou barvu použít speciální masku, která vymezuje oblast jednotlivých barev.

2.2 Vyhřívání teplotních polí

Pro ohřev samotné výrobní formy pro technologii slinování termoplastického prášku, která je vyrobena galvanickým vylučováním za působení elektrického pole z niklu, je podle dostupných materiálů používáno několik způsobů. Ty užívají pro transport tepelné energie ze zdroje různá média jako například minerální olej, horký vzduch, písek nebo tepelné záření.

Při použití minerálního oleje jako média pro transport tepelné energie je médium přiváděno na rubovou stranu výrobní formy pomocí systému trubek. Tento způsob ohřevu používá pro své linky například výrobce Krauss Maffei [10]. Pro takovouto koncepci výrobní linky je pak výhodou například možnost rychlého chlazení a vyjímání výrobku v jedné pozici, což značně zmenšuje velikost výrobní linky a zkracuje dobu výroby. Problematická pak ale může být nutnost reagovat na technologické změny. V případě použití oleje jako topného média je také nutno vybudovat poměrně nákladné olejové hospodářství.

V dalším případě je možno použít horký písek, který je sypán na rubovou stranu formy. Zde je výhoda hlavně nenáročného ekologického hospodářství, nevýhodou pak může být nemožnost zvyšování teploty v průběhu výrobního cyklu.

Dalším nalezeným způsobem ohřevu je transport tepelné energie na výrobní formu prostřednictvím horkého vzduchu. Jeho hlavní nevýhodou je nutnost udržet dostatečné proudění velkého množství teplého vzduchu, ale výhodou je zde možnost poměrně snadné homogenizace teploty povrchu výrobní formy.

Poslední možností ohřevu je pak ohřev povrchu formy infračerveným zářením. Pro tento způsob ohřevu nebyl v dostupných zdrojích nalezen případ samostatného použití ohřevu pouze infračervenými zářiči. Byl ale nalezen výrobce strojů pro zpracování plastu slinováním termoplastického prášku, a to firma Kiefel [9]. Ta kombinuje tři z těchto metod zahřívání výrobní formy. Pro předehřev formy je použita univerzální sestava infračervených zářičů, která předehřeje formu nad určitou hranici, její teplota je pak následně homogenizována pomocí horkého vzduchu a dostatek tepelné energie při vlastním slinování prášku je pak zajištěn horkým pískem, který nakumuloval dostatečné teplo pro zpracování výrobku. Je nutno také poznamenat, že **teploty pro zpracování termoplastického prášku nejsou přesně známy.**

V literatuře se tedy nepodařilo nalézt systém ohřevu, pro který je použito pouze infračervených zářičů pro tak komplikovaný prostorový tvar vyhřívané plochy, jako je například palubní deska automobilu, pro kterou je prototypový stroj primárně vyvíjen. Je třeba si uvědomit, že je potřeba pro infračervené zářiče zajistit nastavení do optimálních poloh vůči vyhřívané formě a zajistit jejich uchycení i při pohybu, který je nutný například při nanášení prášku. V literatuře byla nalezena pouze aplikace infračervených zářičů na výrazně jednodušší problémy, jako je například sušení nátěrů a laků, ohřev potravin, zpracování plastových fólií a podobně.



Obr. 2.1: Linka Krauss Maffei.

2.3 Řízení teplotních polí

Z pohledu řízení teplotních polí pak nebyl nalezen konkrétní příklad pro řízení podobného systému ohřevu. Byla však nalezena řada článků týkajících se řízení MIMO systémů, z nichž jsem vybral čtyři (lit. [5], [6], [7] a [8]), které dobře popisují současný vývoj problematiky řízení rozsáhlých MIMO systémů. V prvních dvou je zmíněna metoda Autonomní regulace (Decoupling control). Ta počítá buď s diagonálním modelem, což není náš případ, nebo se zápornými akčními zásahy, jež náš systém bohužel neumožňuje. Čtvrtý případ pak používá stavové regulace systému. Tento přístup je problematický v nárocích na model a ve složitosti návrhu regulátoru. Nastává také komplikace při nutnosti potlačit záporné regulační zásahy. V poslední době se stává velice populární Fuzzy regulace. Její zajímavý příklad je uveden ve třetím článku. Zde je třeba navrhnout vhodný fuzzy prostor, což může být v tomto případě poměrně komplikované, a také je nutno počítat s požadavkem na snadnou implementaci do výrobního zařízení. Ve všech případech je také možno najít spoustu odkazů na adaptivní nebo samo se učící algoritmy pro návrh regulátorů. Ty však vyžadují relativně mnoho zkušebních cyklů (minimálně cca 1000), navíc je zde nebezpečí poškození výrobního stroje. To se týká zejména zničení výrobní formy, která je citlivá na přehřátí a je provozována těsně pod kritickou teplotní hranicí nad kterou může dojít k jejímu nevratnému poškození.

3 Výrobní zařízení a požadavky odběratele na homogenitu teplotního pole

Firma Magna (Cadence Innovation) je jedním z předních dodavatelů plastových dílů pro automobilový průmysl. Proto v této společnosti vznikl i zájem o výrobu plastových komponent z měkčených plastů. Důvodem pro zavedení této výroby byl fakt, že jen velice málo firem v České republice má dostatečnou kapacitu pro výrobu umělých měkčených kůží. Magna (Cadence Innovation) však v době tohoto strategického rozhodnutí neměla strojové vybavení pro tuto výrobu. Nerozhodla se však pro pořízení nákladných strojů, které využívají patentovanou technologii, které byly popsány v kapitole 2. Právě naopak upřednostnila vývoj vlastní výrobní linky, včetně technologie ohřevu a výroby. Tato technologie by pak měla produkovat výrobky, které by měly být dále zpracovávány až do finálního produktu (včetně pění, frézování a dalších úprav). Jako příklad těchto produktů můžeme uvést palubní desku s měkčeným povrchem která bude dodávána do renomovaných automobilek. Celé zpracování by tedy mělo probíhat v rámci jednoho koncernu, a to včetně výroby měkčené fólie, pění výrobku nebo frézování finálního výrobku.

3.1 Cíle práce

Vzhledem k tomu, že podobný vícerozměrný problém regulace teplot nebyl v žádné literatuře nalezen a není ani z průmyslové praxe znám, respektive nebyl úspěšně vyřešen, bylo nutno požadavky na nově navrhovaný řídicí systém s ohledem na technologické potřeby odběratele nově formulovat. Ukázalo se, že materiálové, konstrukční ani výrobně-technologické požadavky na řízení teplot nebylo možno na začátku řešení přesně definovat. Poskytované informace o rozložení teplot od výrobců byly nereálné, nejasné nebo dokonce i zavádějící a nebylo je možno ověřit. Bylo tedy nutno vycházet z údajů v širokých tolerancích. Tyto skutečnosti se potvrdily během technologických experimentů.

Řešitel tedy zformuloval z hlediska řízení globální a dílčí cíle.

- **Globální cíle**

Samotným globálním cílem bylo vyvinutí systému řízení teplotního pole pro prostorově „složitě“ tvarovanou výrobní formu, jenž je využita pro výrobu umělých kůží slushovací technologií, která je založena na spékání práškového termoplastického materiálu. Pro systém ohřevu je pak jako zdrojů tepelné energie využito infračervených zářičů, které

jsou ovládány dodaným řídicím systémem SIEMENS SIMATIC S7-300. Systém ohřevu pak bude umožňovat

- I. Splnění požadavků na rozložení teplot pro jednotlivé výrobky tak, aby byly zajištěny dané kvalitativní ukazatele finálního výrobku při opakovaném výrobním cyklu.
- II. Zajištění požadovaných rychlostí, respektive časů ohřevu nebo předehřevu v jednotlivých výrobních cyklech.
- III. Implementaci řídicího systému na daném výrobním zařízení a možnost jeho implementace i na další projektované výrobní linky a kapacity.

- **Dílčí cíle**

Formulace globálních cílů zahrnuje kromě obecně daných požadavků na řízení také celou řadu rozsáhlých konstrukčních, technologických a montážních činností. Tato práce řeší v rámci celého týmu problematiku řízení a regulace teplotních polí. Dosažení **požadovaného rozložení teplotních polí na lici formy** je jedním z klíčových předpokladů provozu výrobní linky. Následná analýza z pohledu řízení ukázala, že k dosažení globálních cílů vzhledem k neurčitostem při formulaci cílů řízení, je nutno definovat posloupnost dílčích úkolů a cílů řízení, jejichž postupné splnění je předpokladem splnění globálního cíle. Je tedy třeba:

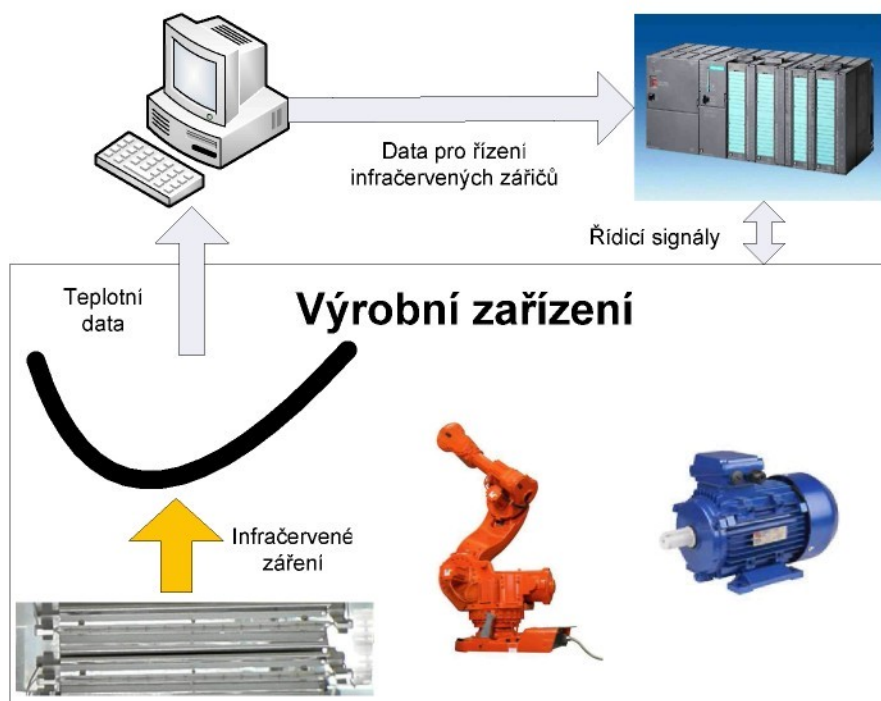
1. Analyzovat možnosti daných akčních členů vzhledem k dosažení povrchových teplot rubu a lice výrobní formy.
2. Modelovat rozložení teplotního pole, zvláště pak s ohledem na požadavky řízení.
3. Navrhnout metodiku rozložení zářičů a čidel vůči výrobní formě, která zajistí optimální rozložení teplot výrobní formy.
4. Zajistit dosažitelnost požadovaných ustálených stavů teplotního pole v daných místech.
5. Vytvořit simulační model, na základě měření regulovaného systému ohřevu za účelem ověřování regulačních algoritmů.
6. Vypracovat metodiku pro přiřazování čidel a akčních členů do jednotlivých regulačních smyček.
7. Navrhnout a vybrat regulační algoritmus vzhledem k možnostem zařízení a požadavkům zadavatele.
8. Umožnit částečné řízení lokální odchylky teplotního pole na výrobní formě a tím umožnit lokální řízení kvality vyráběných umělých kůží v konkrétních oblastech.
9. Analyzovat vliv cyklického opakování výroby na změny kvality kůže v průběhu několika cyklů.

10. Ověřit možnost použití „univerzálních“ zad, která umožní používat stejné rozmístění zářičů prakticky pro libovolný tvar výrobní formy.

3.2 Struktura vyvíjeného zařízení

Ideové schéma vyvíjené linky, na které bude řídicí systém nasazen, je pak na Obr. 3.1. Mozkem celé výrobní linky je zde programovatelný automat SIEMENS SIMATIC S7-300. Ten řídí celý výrobní cyklus, tedy měniče motorů, ovládá řídicí signály pro řídicí systém robotů, z nichž jeden manipuluje výrobní formou mezi rotační částí stroje, vyjímací a chladicí stanicí, a druhý stříká práškový materiál při výrobě dvoubarevných umělých kůží. Dále jsou přes PLC řízeny všechny měniče motorů a samozřejmě **zapínány** také infračervené zářiče. Teplota výrobní formy je přes speciální moduly snímána přímo počítačem, který tyto teploty vyhodnocuje a řídicí signály pak předává do PLC, které příslušné infračervené lampy rozsvěcí nebo zhasíná.

V souladu se zadáním a cílem práce bylo nutno při návrhu regulačního algoritmu přihlídnout zejména k požadavkům odběratele na jednoduchost řídicího systému a zejména na časové dispozice pro implementaci na reálném systému ohřevu. Z těchto důvodů bylo nakonec použito matice standardních PID regulátorů. Ty byly použity takovým způsobem, že můžeme hovořit o decentralizovaném řízení.



Obr. 3.1: Ideové schéma zařízení vyvíjené linky

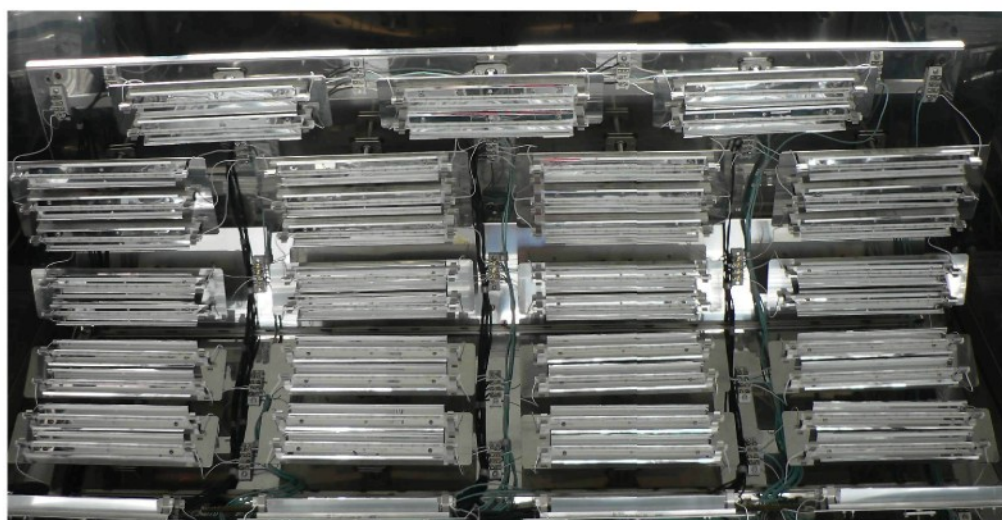
3.3 Zkušební zařízení

Na základě rozboru a simulací, které byly provedeny firmou Lenam a které jsou popsány v dalším textu, bylo vyrobeno první experimentální zařízení. Jeho účelem nebyla zkušební výroba umělých kůží, ale bylo sestrojeno pouze k dosažení dvou dílčích cílů. Tedy v první fázi vývoje výrobní linky mělo toto zařízení posloužit pouze k ověření předpokladu, že niklovou galvanicky vyrobenou formu lze pomocí skupiny infračervených zářičů zahřát na požadovanou teplotu. V druhé fázi měla na tomto zařízení být odzkoušena regulace teploty na požadovanou výši, popřípadě odzkoušeno chování systému ohřevu na simulovanou poruchu. V této části bylo zahájeno řešení dílčího cíle č.1 a 3. Zařízení je pak vidět na Obr. 3.2, Obr. 3.3 a Obr. 3.4.

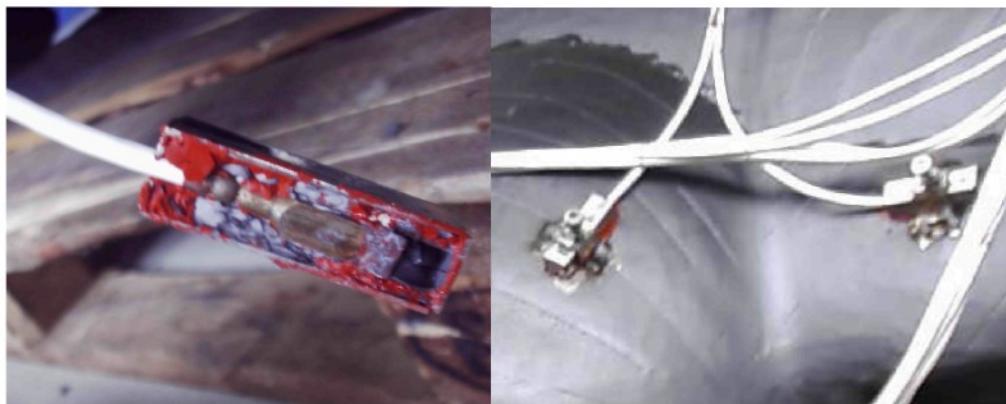
Ze začátku experimentování byla teplota výrobní formy snímána prostřednictvím odporových čidel PT100. Ty byly k formě připevněny prostřednictvím tepelně vodivého silikonového tmelu, který zajišťoval přenos tepla a šroubu, jenž zajišťoval mechanické uchycení. To se ukázalo jako nešťastné, protože velká hmota čidla a tepelný odpor tmelu vedly ke značnému zkreslení dynamiky a tím i ke sklonům ke kmitání reálné teploty na výrobní formě. Proto byla odporová čidla vyměněna na čidla termočláňková, jejichž instalace je vidět na Obr. 3.5. Vzhledem k jeho malé hmotě a skutečnosti, že termoelektrický přechod je přivařen přímo na formu, je zkreslení dynamiky vlivu rozsvíceného zářiče na teplotu formy snímané termočláňky minimální. Samotný regulační algoritmus je pak implementován prostřednictvím počítače, který také zajišťuje čtení dat snímané teploty a jejich záznam. Zapínání a vypínání lamp je pak zajištěno prostřednictvím výstupních dvoupolohových obvodů řídicího PLC SIEMENS SIMATIC S7-300. PLC a řídicí PC je propojeno prostřednictvím sběrnice Profibus.



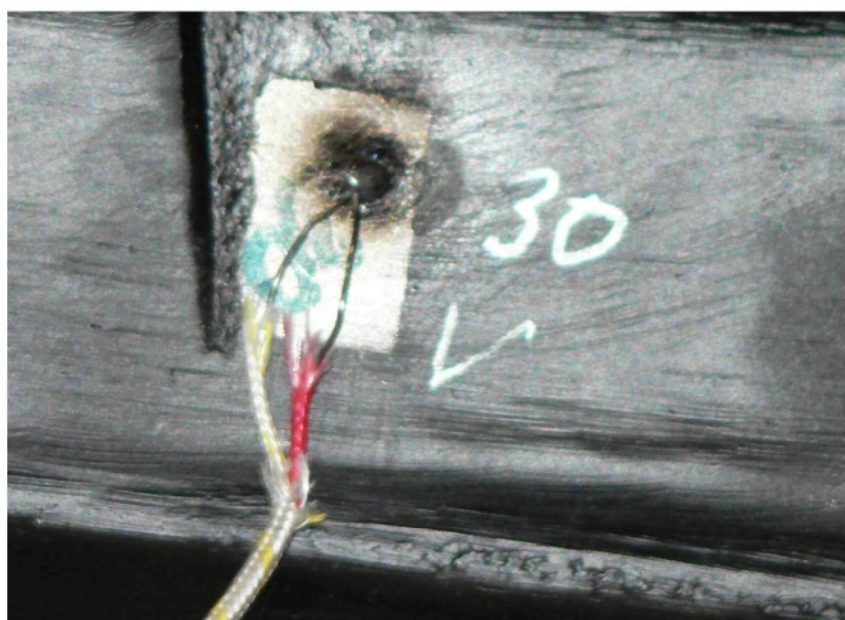
Obr. 3.2: Experimentální prototypové zařízení.



Obr. 3.3: Experimentální systém ohřevu.



Obr. 3.4: Snímací prvek teploty PT100 na experimentálním zařízení.



Obr. 3.5: Přichycení termočládku k výrobní formě.

3.4 Výrobní zařízení

Na základě zkušeností s rozmístěním zářičů a termočládků na experimentálním zařízení bylo postaveno plně funkční prototypové výrobní zařízení, které kromě ohřevu výrobní formy umožňuje už také uskutečnit plný výrobní cyklus pro výrobu syntetické měkčené kůže. Je tedy rozšířeno o rotační část a nádobu na práškový materiál, který je právě rotací nanášen na výrobní formu. Také jsou přidány chladicí a vyjímací stanice, které zajišťují ochlazení výrobku na vyjímací teplotu a prostor pro jeho vyjmutí, očištění, kontrolu a zabalení. Tím byla provedena příprava na cyklické opakování výroby s opakovaným řízením teplot. Celkový pohled na výrobní linku, která sloužila k ladění výrobního procesu, nastavení světla a rozložení čidel na výrobní formě, je pak znázorněn na následujícím obrázku.



Obr. 3.6: celkový pohled na výrobní linku.



Obr. 3.7: Svazkování dvoudrátových termočlánků.

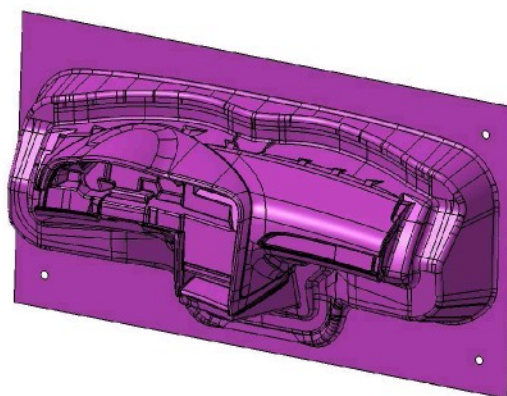
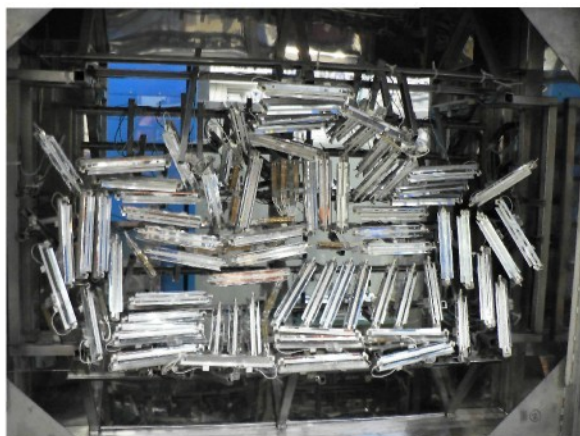
Pro sběr dat a implementaci řídicího algoritmu je použito řídicího PC a pro snímání teplot povrchu výrobní formy bylo použito termočlánekových čidel. Jako čidla byla nejdříve použita standardní termočláneková dvou vodičová čidla, která byla přivařena na rubovou stranu formy, jak je vidět na Obr. 3.5. Ta byla svazkována a zavedena do svorkovnice, jak ukazuje Obr. 3.7. To po nějaké době ovšem vedlo k problémům, které se projevily odlamováním tenkých termočlánekových drátů od svaru nebo prodíráním izolace termočlánekového drátu. To bylo řešeno zavedením snímání teploty jedno-vodičovým termočlánekovým snímačem, kde druhý vodič je společný pro všechna čidla a je tvořen niklovou výrobní formou. Popisem

vývoje snímání teploty se zabývá disertační práce ing. Tomáše Martince [12]. Vyvedení jednodrátových termočlánekových čidel je pak vidět na Obr. 3.8.



Obr. 3.8: Forma s jedno-vodičovými termočláanky.

Nedílnou součástí dosažení správné funkčnosti výrobní linky je také správné rozložení infračervených zářičů vůči složitému tvaru výrobní formy. Rozložení zářičů a tvar výrobní formy jsou vidět na následujícím obrázku. Vhodné nastavení zářičů je pak bezpodmínečnou podmínkou pro dosažení správné funkce řízení systému ohřevu tak, aby bylo dosaženo požadovaného rozložení teplotního pole na formě. Teprve potom je zajištěna produkce výrobní linky finálními výrobky v požadované kvalitě.



Obr. 3.9: Rozložení zářičů (vlevo) vůči tvaru formy (vpravo)

4 Rozbor vlivu polohy zářičů a teplotních snímačů na teplotní pole

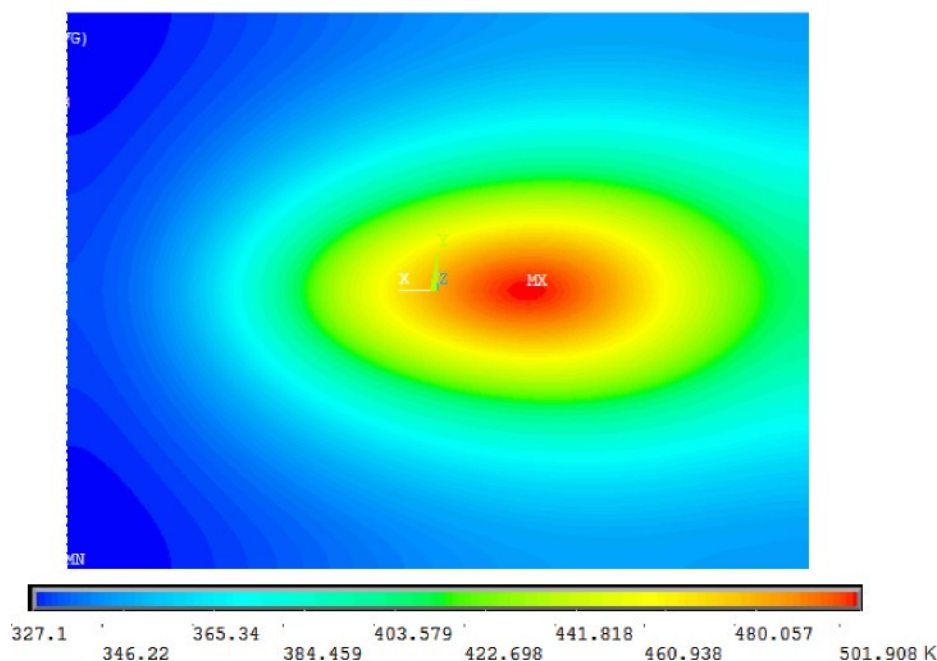
Tato kapitola se zabývá rozložením zářičů a čidel vůči povrchu výrobní formy a jeho vlivem na homogenitu respektive dosažitelnost požadovaného rozložení teplotního pole. Jinými slovy, je zde hledána cesta ke splnění dílčího cíle č.3. Kromě jiného vychází ze simulačních experimentů některých dějů vznikajících při zahřívání těles s použitím jednoho nebo více infračervených zářičů. Tyto simulace jsou provedeny na základě matematicko-fyzikálního popisu dané situace, která je dána reálným systémem ohřevu. Ten je tvořen soustavou infračervených zářičů a černěnou plochou, jenž je infračerveným zářením ohřívána. Situace jsou potom voleny tak, aby demonstrovaly vliv nastavení zářičů na teplotní pole při různých uspořádáních. Samotná simulace je pak provedena v programovém prostředí ANSYS, které využívá pro výpočet modelu metodu konečných prvků.

4.1 Základní pojmy

4.1.1 Teplotní pole

Teplotním polem se rozumí prostor, v jehož každém místě je definována zcela určitá termodynamická teplota, za stacionárních podmínek konstantní, za nestacionárních časově proměnná. Teplotní pole je polem skalárním. Termodynamickou teplotou T se pak rozumí teplota určovaná podle zákonů termodynamiky a lze ji volit za míru kinetické energie pohybujících se molekul.

Teplotní pole tedy charakterizuje rozložení teploty a jeho změny v prostoru a čase. Výsledky jsou zobrazovány nejčastěji graficky jako barevné pole, nebo v podobě grafů či přímo numericky ve formě souborů. Na Obr. 4.1 je vidět ukázka možného rozložení teplotního pole ozařované desky v určitém časovém okamžiku.



Obr. 4.1: Prezentace teplotního pole prostřednictvím obrázku.

4.1.2 Šíření tepla

Teplo se může šířit prostředím třemi známými způsoby a to vedením, prouděním, nebo tepelným zářením. Tyto způsoby jsou pak definovány takto:

- Při šíření tepla vedením (nebo též kondukcí) se tepelná energie šíří hmotou, která je v klidu tak, že částice látky v oblasti s vyšší kinetickou energií předávají část své kinetické energie prostředním vzájemných srážek částicím v oblastech s nižší střední kinetickou energií. Částice přitom kmitají kolem svých rovnovážných poloh, nikam se tedy nepřemísťují. Vedení tepla probíhá tedy především v pevných tělesech, jejichž různé části mají různou teplotu. Teplo se vedením šíří také v kapalinách a plynech, kde se však také uplatňuje přenos tepla prouděním. Veličina, která ukazuje míru jak látka vede teplo, neboli jak snadno se v ní vyrovnávají teplotní rozdíly, se nazývá teplotní vodivost respektive součinitel teplotní vodivosti.
- Při šíření tepla prouděním, které je také nazýváno konvekci, dochází k proudění hmoty o různé teplotě. Tepelné proudění se uplatňuje pouze u kapalin a plynů. Pohybem hmoty dochází k promíchávání jednotlivých částí, které mají odlišnou teplotu, a tím se přenáší teplo mezi různými částmi hmoty. Ve srovnání s vedením tepla může být proudění tepla rychlejší. Proudění je obvykle spojeno se změnou některé vlastnosti látky v závislosti na teplotě. Samovolné tepelné proudění stoupá

vzhůru, což je způsobeno tím, že teplejší části kapalin a plynů mají menší hustotu a tudíž stoupají nad chladnější části.

- Při šíření tepla tepelným zářením (nebo také sáláním či radiací) dochází k vyzařování energie ze zdroje ve formě elektromagnetických vln a jeho následnému pohlcování ozářeným tělesem. Tímto způsobem je vyzařována energie z každého tělesa, které má nenulovou absolutní teplotu. Tepelná energie je přenášena ve formě elektromagnetického záření. Na rozdíl od přenosu tepla vedením nebo prouděním se může prostřednictvím záření teplo přenášet i ve vakuu, tzn. bez zprostředkování přenosu látkovým prostředím. Tepelné záření se nejlépe šíří ve vakuu. Množství vyzařovaného a přijímaného tepla závisí na rozdílu teplot těles, která na sebe vzájemně zářením působí, na tvaru a materiálu těles, tedy spíše na jejich barvě povrchu (tmavá a matná tělesa vyzařují a přijímají více tepla, světlá a lesklá tělesa vyzařují a přijímají méně tepla).

4.1.3 Materiálové konstanty při šíření tepla

V následujícím textu budou v matematicko-fyzikálním modelu uvažovány tyto materiálové konstanty, které jsou nezbytné ke správnému nastavení simulace daného modelu.

- Měrná tepelná kapacita - c - [J kg/K^{-1}] - je množství tepla potřebného k ohřátí 1 kilogramu látky o 1 teplotní stupeň (1 kelvin nebo 1 stupeň Celsia). Tato konstanta ovlivňuje dynamiku přechodového děje vývoje teploty v čase.
- Hustota - ρ - [kg/m^3] - je míra hmotnosti na jednotku objemu, hustota hmotnosti je definována jako podíl hmotnosti m a objemu V tělesa
- Tepelná vodivost - λ - [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] - jedná se o schopnost látky vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné zahřáté části látky do jiných, chladnějších částí.

4.2 Matematicko-fyzikální model přenosu tepla

4.2.1 Stefan-Boltzmannův zákon

Stefan-Boltzmannův zákon popisuje tok energie vyzářené z tělesa v závislosti na jeho teplotě a na jeho barvě (emisivitě). Intenzita záření na určité vlnové délce záření je pak dána vztahem

$$e_b(\lambda_c, T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c_0^2}{\lambda_c^5 \left(e^{\frac{h \cdot c_0}{k_B \cdot T \cdot \lambda_c}} - 1 \right)}, \quad (4.1)$$

kde

$e_b(\lambda_c, T)$	je intenzita záření černého tělesa na dané vlnové délce při dané teplotě [W/m ²],
T	je absolutní teplota [K],
λ_c	je vlnová délka záření [m],
h	je Planckova konstanta $h=6,62606876 \times 10^{-34}$ J·s,
c_0	je rychlost světla $c_0=2,99792458 \times 10^8$ m/s,
k_B	je Boltzmanova konstanta $k_B=1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K.

Pro celkový vyzářený výkon pak platí vztah

$$e_b(T) = \int_0^{\infty} e_b(\lambda_c, T) d\lambda. \quad (4.2)$$

Stefan-Boltzmanův zákon je pak možno vyjádřit vztahem (4.3) pro černé těleso, respektive vztahem (4.4) pro těleso jiné barvy, který byl získán experimentálně. Platí tedy vztahy

$$e_b(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (4.3)$$

$$e(T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4.4)$$

kde

e, e_b	je intenzita záření [W/m ²],
T	je absolutní teplota [K],
σ	je Stefan-Boltzmannova konstanta a platí $\sigma=5,670400 \times 10^{-8}$ W/m ² ·K ⁴ ,
ε	je emisivita tělesa a platí pro ni, že $0 < \varepsilon \leq 1$.

4.2.2 Rovnice vedení tepla

Jedním z možných popisů mnoha fyzikálních jevů je potenciálové proudění. Vyjadřuje jejich vzájemné analogie mezi vedením tepla, elektrostatickým polem atd. [14]. Toto proudění je popsáno následujícími parciálními diferenciálními rovnicemi

$$\nabla q = f \quad (4.5)$$

$$q = -\lambda \nabla u, \quad (4.6)$$

kde

u	je potenciál v našem případě teplota [K],
q	je rychlost toku v našem případě tepelný tok [W/m ²],
f	je hustota zdrojů v našem případě hustota zdroje tepla [W/m ³] a
λ	je koeficient úměrnosti (vlastnost prostředí) tedy měrná tepelná vodivost [Wm ⁻¹ K ⁻¹].

Rovnice (4.5) vyjadřuje bilanci veličiny (lokální rozdíly toků jsou v rovnováze se zdroji). Rovnice (4.6) pak vyjadřuje fakt, že tok je úměrný gradientu potenciálu. Rovnice potenciálového proudění jsou případem typu eliptických parciálních diferenciálních rovnic druhého řádu.

Obecně pak můžeme parciální diferenciální rovnice druhého řádu rozdělit do tří typů a to:

- Eliptické

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f \quad (4.7)$$

- Parabolické

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f \quad (4.8)$$

- Hyperbolické

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f \quad (4.9)$$

Eliptické rovnice vyjadřují stacionární fyzikální jevy, parabolické nestacionární nevratné jevy (vedení tepla) a hyperbolické rovnice popisují vlnění a kmitání. Zařazení rovnic v rámci této klasifikace má význam pro správnou formulaci okrajových a počátečních podmínek. Jouleovy ztráty, změny skupenství či energie dodané zvnějšku konvekci, vedením či zářením způsobuje v tepelně vodivém kontinuu (označujeme ho jako oblast Ω) nestacionární teplotní pole popsané rovnicí, která je odvozená z prvního zákona termodynamiky [13]. Platí tedy

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c v \cdot \text{grad}(T) + \lambda \tau \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} - Q \quad (4.10)$$

pro $\forall t \geq 0$ a oblast Ω , kde

- ρ je hustota prostředí [kg/m^3],
- v je rychlost pohybu kontinua [m/s],
- c je měrná tepelná kapacita [J kg/K^{-1}],
- Q je měrný dodávaný výkon [W/m^3],
- τ je koeficient respektující konečnou rychlost šíření tepla [kg/m^3].

Uvažujeme-li pak, že termodynamická teplota se mění s časem relativně pomalu (rychlé změny vznikají např. při ohřevu laserovým paprskem), lze v (4.10) zanedbat třetí člen na

pravé straně. Dále je-li kontinuum Ω v klidu, lze zanedbat druhý člen na pravé straně rovnice (4.10). Rovnici šíření tepla je pak možno zapsat ve tvaru

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad (4.11)$$

pro $\forall t \geq 0$ a oblast Ω .

4.2.3 Okrajové a počáteční podmínky

Úlohy popsané diferenciálními rovnicemi se skládají jednak z příslušné diferenciální rovnice, jako je v našem případě rovnice vedení tepla (4.11), dále je daný problém popsán dodatečnými diferenciálními rovnicemi, které se nazývají okrajové a počáteční podmínky. Diferenciální rovnice (4.11) popisuje fyzikální podstatu řešeného problému a rovnice okrajových podmínek, respektive počáteční podmínky, popisují interakci s okolím, respektive stav systému v nulovém čase. [15]

Okrajové podmínky se používají na hranici Γ , která obklopuje kontinuum Ω , a vyskytují se nejčastěji v následujících čtyřech tvarech:

- **I.druhu – Dirichletovy** - Tyto podmínky se aplikují zejména tam, kde je známá teplota na povrchu. Předepisuje se přímo hodnota teploty.

$$T(\Gamma, t) = T_\Gamma(\Gamma, t) \quad (4.12)$$

- **II.druhu – Neumannovy** - Tyto podmínky popisují bilanci tepelného toku s příslušnou hranicí

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_n(\Gamma, T, t), \quad (4.13)$$

kde

q_n je hustota tepelného toku [W/m^2],

n je normálový vektor k hranici Γ .

- **III.druhu – Newtonovy** - Tyto podmínky pak reprezentují přestup tepla do prostředí o teplotě T_{ext} .

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{\text{ext}}), \quad (4.14)$$

kde

α je součinitel přestupu tepla z jednoho prostředí do druhého [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

- **IV. druhu** – Při uvažování šíření tepla radiací se u této okrajové podmínky uplatňuje větší počet zákonů (Snellův, Lambertův, Stefan–Boltzmannův, Planckův, Wienův či Kirchhoffův). V praxi a i v tomto případě je většinou uvažován pouze Stefan-Boltzmannův zákon, který je popsán v kapitole 4.2.1 a tuto okrajovou podmínku lze prezentovat následujícím vztahem.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{ext}^4) \quad (4.15)$$

Počáteční podmínky – Počáteční podmínky jsou v tomto problému prezentovány pouze jako teplota vyhřívaného tělesa, které je v našem případě tvořeno výrobní formou, a jsou dány vztahem

$$T(r, t_{START}) = T_0(r), \quad (4.16)$$

kde T_0 představuje hodnotu teploty v daném místě v počátečním okamžiku vyšetřování teplotního pole.

4.3 Charakteristiky infračervených zářičů

4.3.1 Infračervené zářiče jako zdroje tepla pro vyhřívání výrobní formy

V této práci jsou pro simulaci systému ohřevu uvažovány infračervené zářiče firmy Philips, a to konkrétně typ 13168Z/98 o výkonu 2kW s příslušným reflektorem IRZ1000ICT. Infračervené zářiče se standardně využívají v průmyslu při vysoušecích a tepelných procesech v odvětví potravinářství, zpracování povrchových vrstev a mnoha dalších, zkrátka všude tam, kde je třeba použít bezkontaktního přenosu tepla ze zdroje do zpracovávaného produktu. To může být například při vysoušení a vypalování různých barev a laků, vysoušecí průmyslová zařízení, ve vypalovacích pecích a při mnoha dalších průmyslových aplikacích. Ovšem v literatuře a dostupných zdrojích se nepodařilo nalézt případ, kde by bylo použito infračervených zářičů pro ohřev povrchu tak složitého tvaru, a přitom by bylo dosaženo tak vysokého stupně homogenity teplotního pole jako v případě, který je popsán v této práci.

Vlnová délka infračerveného záření se pohybuje v pásmu spektra 780nm až 1mm a toto záření pak můžeme rozdělit na tři spektrální pásma:

- IR-A spektrum 780 – 1400nm – krátké vlny,
- IR-B spektrum 1400 – 3000nm – střední vlny a

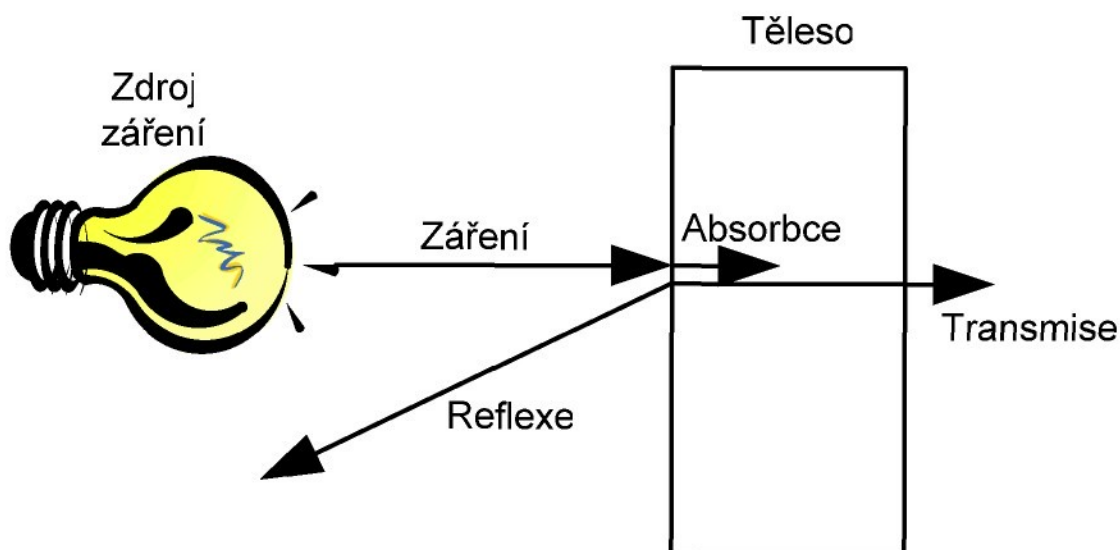
- IR-C spektrum $3000 - 1 \times 10^6 \text{ nm}$ – dlouhé vlny.

Infračervené halogenové zářiče, které jsou použity v našem případě pro ohřev povrchu výrobní formy, emitují většinu tepelného záření v IR-A a IR-B části spektra. Zářiče také emitují značnou část vyzařené energie ve viditelné části spektra elektromagnetického záření. Princip přenosu tepelné energie je na Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Princip přenosu tepelné energie zářením.

Záření dopadající na těleso, které chceme ohřívat, se pak může odrážet (reflexe), a to buď částečným nebo totálním odrazem, může být pohlceno objektem (absorpce) čímž mu předá svou energii, nebo může projít tělesem na jeho druhou stranu (transmise).



Obr. 4.3: Interakce záření s překážkou.

Pro interakci záření s okolím pak platí následující vztah

$$\alpha + r + \tau = 1, \quad (4.17)$$

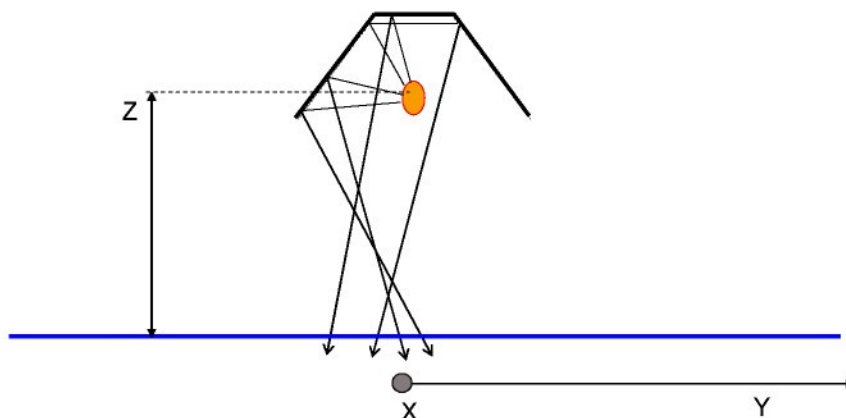
kde:

α je koeficient absorpce,

r je koeficient reflexe,

τ je koeficient transmise a jeho hodnota odpovídá podílu záření, které reaguje s prostředím daným způsobem. Objekty s vysokým koeficientem α jsou vhodné pro ohřev infračerveným zářením, který pak má vysokou účinnost. Bílé a černé povrchy reprezentují nejlepší a nejhorší případy.

Infračervené zářiče použité pro ohřev výrobní formy se skládají z halogenového zářiče a reflektoru, který odráží infračervené paprsky ze zářiče a zaostřuje je přesněji na ozařované těleso. Takto lze volbou vhodného reflektoru dosáhnout relativně rovnoměrného ozáření povrchu vyhřívaného tělesa, nicméně nikdy nemůžeme zcela zabránit rozptylu záření přenášejícího tepelnou energii. Navíc, jak bude vidět v další diskusi problematiky vyzařování energie zvolenými zářiči, tak i u cenově dostupných reflektorů, které jsou vyráběny sériově, není dosaženo rovnoměrného rozložení dopadajícího záření a intenzita dopadající energie na ozařované těleso je silně závislá na tvaru daného tělesa, vzdálenosti zářiče od tělesa a na některých dalších podmínkách. Nicméně tento zvolený způsob ohřevu povrchu výrobní formy má, jak již bylo uvedeno, nesporně několik výhod kvůli kterým byl zvolen, a to například rychlost ohřevu, ekologická šetrnost k prostředí a nízká energetická náročnost.



Obr. 4.4: Schematický náčrt reflektoru s IR žárovkou [16].

4.4 Simulace teplotního pole výrobní formy

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.3, bylo nutno před sestavením prvního fyzického experimentálního zařízení provést některé základní simulace a potvrdit, zda je vůbec možno danou vyhřívací technologii použít. Tato počáteční simulace byla provedena firmou LENAM, která provedla simulace ohřevu na počítačovém modelu. Ten zahrnoval tvary používané na povrchu výrobní formy. V dalším průběhu prací pak byly firmou LENAM zjišťovány reálné vyzařovací charakteristiky použitých zářičů, a na jejich základě firma dále vytvořila metodiku rozmísťování zářičů. Paralelně s tím, respektive než byla tato metodika vypracována, byly na našem pracovišti TUL provedeny simulace, které osvětlovaly některá fakta pro výběr struktury intuitivního rozmísťování zářičů.

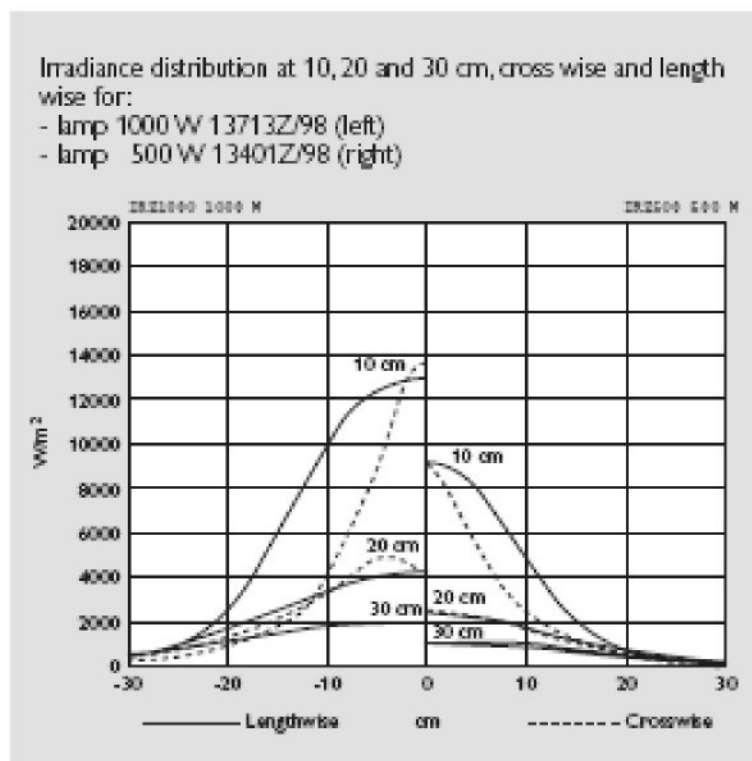
4.4.1 Charakteristiky infračervených zářičů

Pro dosažení správného výsledku simulace teplotního pole vyhřívané formy je nezbytné použít korektní matematický popis zářičů, které budou pro simulaci použity. Za tímto účelem byly provedeny parametrizace použitých zářičů jednak podle charakteristik, které jsou uváděny výrobcem, a v druhé řadě byly také naměřeny vyzařovací charakteristiky reálných použitých zářičů, a ty pak byly parametrizovány pro použití v simulačním modelu. Parametrizace zářičů tedy probíhala na dvou pracovištích - jednak na pracovišti firmy LENAM (tato parametrizace je popsána v dokumentu [16]), a pak probíhala na pracovišti TUL a ta je podrobně popsána v [16]. Je třeba podotknout, že veškeré práce firmy LENAM byly poptávány odběratelem, tedy firmou Magna (Cadence Innovation), zatímco identifikace a simulace provedené na pracovišti TUL byly použity pro vnitřní účely TUL, a to hlavně z důvodu ručního respektive intuitivního nastavení zářičů vůči výrobní formě. Na tom se TUL podílela v období, než firma LENAM vypracovala metodiku pro (optimální) rozmísťování zářičů pomocí počítačového modelu.

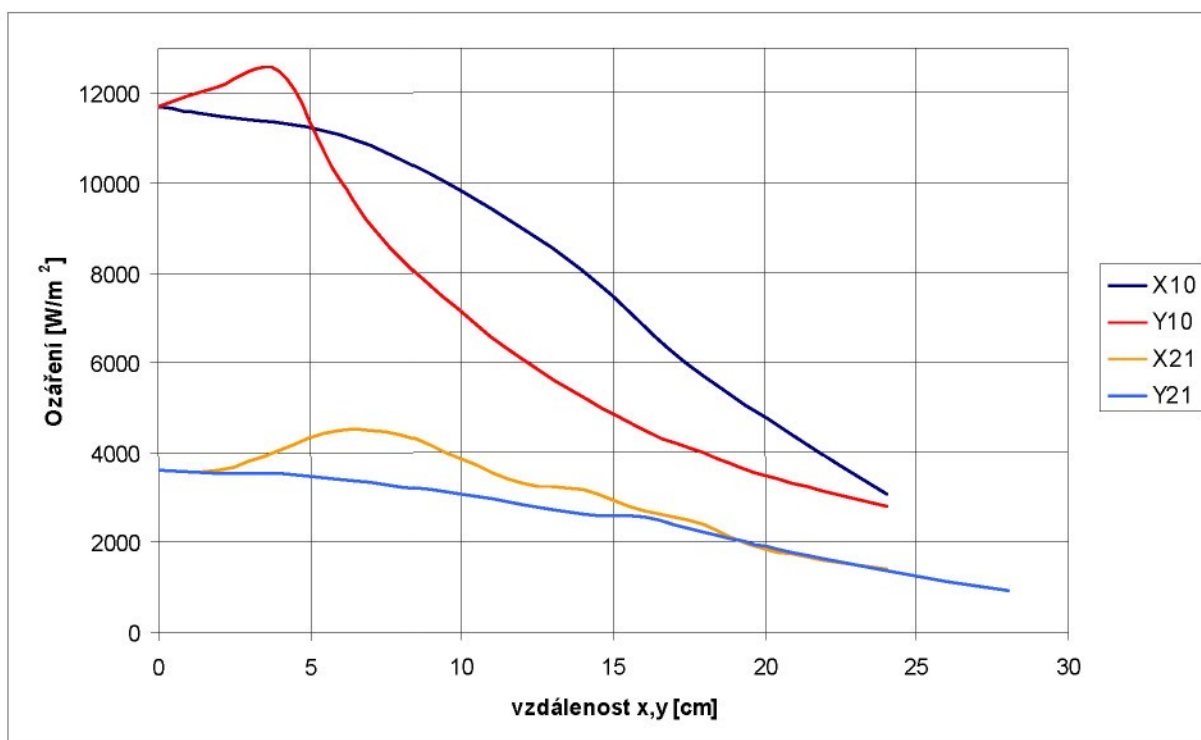
Jak je vidět na Obr. 4.5 a Obr. 4.8, byly ze zdrojů PHILIPS získány dvě vyzařovací charakteristiky. Na Obr. 4.5 je obrázek vyzařovací charakteristiky pouze 1kW a 500W zářičů, ovšem na reálném systému ohřevu byly použity zářiče 2kW, které mají vyzařovací charakteristiku na Obr. 4.8. Ovšem na zářiči popsaném obrázkem Obr. 4.8 je použit reflektor typu IR-3, který má jiný tvar než reflektor IRZ, jenž je použit v reálu a je udáván pro vyzařovací charakteristiku na Obr. 4.5.

Pro simulace, které byly provedeny firmou LENAM, tj. pro simulace souvisící s optimálním rozložením infračervených zářičů vůči výrobní formě, bylo také použito vyzařovacích charakteristik, které byly naměřeny na reálných zářících, jenž jsou použity na

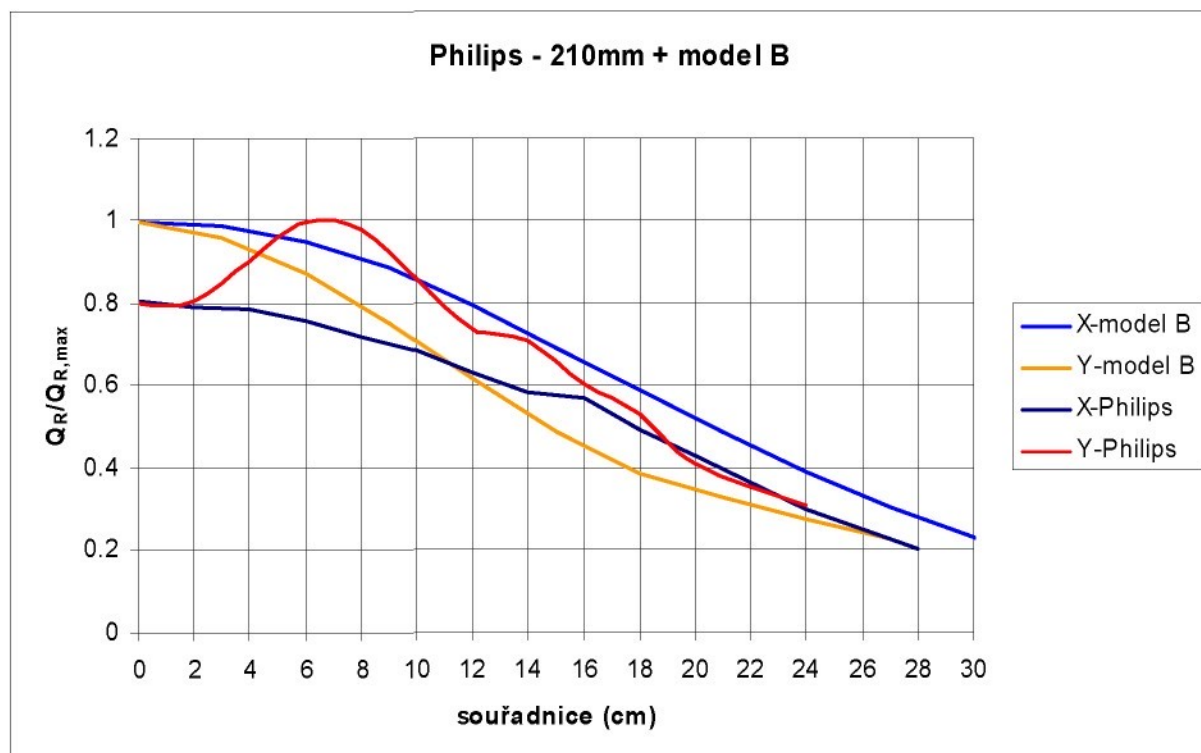
systému ohřevu. K tomuto bylo přistoupeno vzhledem k nutnosti aplikovat výsledky na reálném systému, tedy použít výsledná data pro nastavení poloh infračervených zářičů na systému ohřevu. Způsob měření a vyhodnocení naměřených dat pro několik typů použitých zářičů je podrobněji popsán v [17]. Zde jsou uvedeny pouze ilustrativní výsledky z měření. Na Obr. 4.5 je vidět charakteristika, která popisuje vyzařování zářiče PHILIPS s reflektorem. Ten má stejné parametry jako reálný infračervený zářič, který je použit na systému ohřevu, pouze jeho výkon je poloviční oproti použitým zářičům tedy 1000W. Na Obr. 4.6 je pak vidět naměřená vyzařovací charakteristika zářiče PHILIPS, a to pro umístění zářiče 21 centimetrů (čára X21 a Y21) a 10 centimetrů (čára X10 a Y10) od ozařovaného povrchu. Jak je tedy vidět, charakter naměřených dat je pro 10 centimetrů stejný jako pro zářič s polovičním výkonem, jak udává výrobce. Pro 21 centimetrů již v charakteru dat dochází k jisté odchylce. Na Obr. 4.7 je pak vidět model infračervených zářičů použitý pro simulace firmou LENAM. Je zde vidět naměřená vyzařovací charakteristika (čára X-Philips a Y-Philips) a použitá charakteristika modelu (čára X-model B a Y-model B).



Obr. 4.5: Vyzařovací charakteristiky 1kW a 500W zářičů [19].

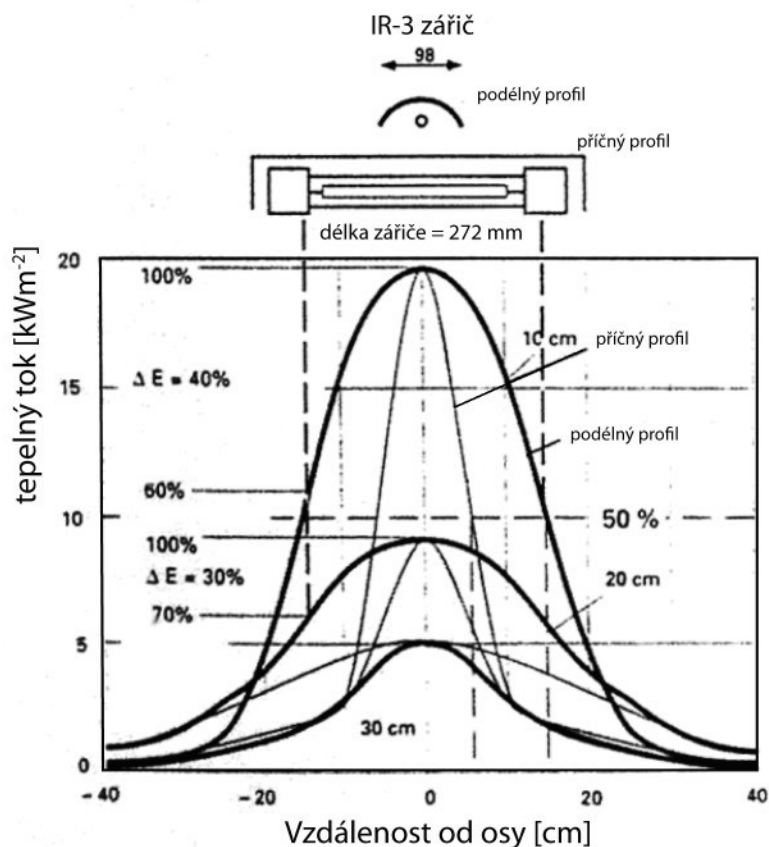


Obr. 4.6: Naměřené vyzařovací charakteristiky reálných zářičů. [16]



Obr. 4.7: Parametrizovaný model naměřené vyzařovací charakteristiky. [16]

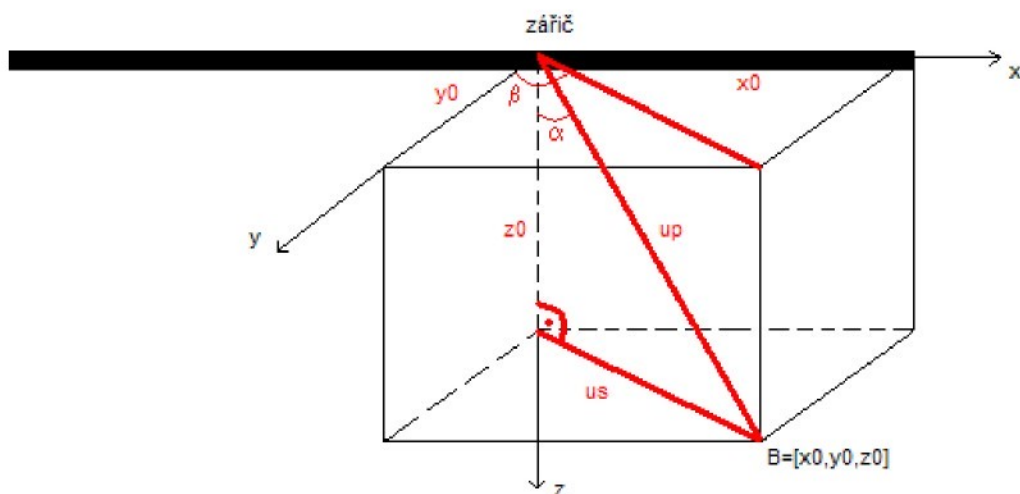
Jak již bylo řečeno výše, některé simulace teplotního pole byly také provedeny na našem pracovišti TUL. Jednalo se hlavně o tvorbu a výpočet matematického modelu, který měl sloužit jako pomůcka (pro jakýsi návod) pro intuitivní respektive ruční rozložení zářičů. Za tímto účelem pak byly zkoumány různé struktury rozmístění skupin zářičů, o které se pak rozmisťování infračervených zářičů systému ohřevu opíralo. Nejdříve však bylo nutné daný typ zářiče popsat pomocí jeho charakteristik (identifikovat). Pro tento účel byla z literatury [18] získána vyzařovací charakteristika daného zářiče s osazeným reflektorem typu IR-3, ten sice nakonec nebyl použit v konečném řešení systému ohřevu, ale pro jistý náhled na problematiku, jenž byl cílem tvorby tohoto matematického modelu, měl dostatečný vypovídající charakter. Vyzařovací charakteristika je pak dána na obrázku Obr. 4.8, a dále je ve stručnosti popsán výsledek její identifikace. Samotná identifikace a její popis jsou pak podrobně popsány v [16].



Obr. 4.8: Vyzařovací charakteristika 2kW zářiče [18].

Pro samotnou identifikaci bylo nejprve nutno zvolit způsob aproximace, respektive zvolit příslušnou parametrickou funkci, která nám dá dostatečně přesný prostorový popis vyzařovací charakteristiky udané výrobcem. Funkce popisující vyzařovací charakteristiku

byla nejprve zvolena na základě fyzikální analýzy intenzity elektromagnetického pole. Tento přístup ovšem vedl k poměrně složité rovnici, jenž měla velký počet neznámých parametrů a při pokusu o jejich nahrazení funkčními závislostmi, které ji zobecní pro obecnou vzdálenost od ozařované plochy, nastaly problémy s fyzikálně nemožnými výsledky. Proto bylo přistoupeno k aproximaci tepelného toku zářiče jiným, jednodušším přístupem, a to pomocí nahrazení zářiče jedním bodem, který je umístěn v jeho středu a parametrickou rovnicí, která popíše intenzitu tepelného toku v dané vzdálenosti od zdroje záření, tedy v našem případě od infračerveného zářiče. Souřadný systém pro daný zářič je pak zvolen jako kartézský, tak aby počátek byl ve středu zářiče, osa x pak prochází osou infračerveného zářiče, osa y je pak na zářič kolmá. Osa z je pak kolmá na zářič a zároveň na osu y. Souřadný systém je pak naznačen na Obr. 4.9 a zajímá nás právě intenzita v bodě B.



Obr. 4.9: Zavedený souřadný systém [16].

Prostorová exponenciální funkce popisující intenzitu záření dopadajícího na ozařovaný povrch, je pak zvolena ve tvaru

$$E(x, y, z) = \alpha_p(z) \cdot \exp^{-(\beta_p(z) \cdot x^2 + \gamma_p(z) \cdot y^2)}, \quad (4.18)$$

kde

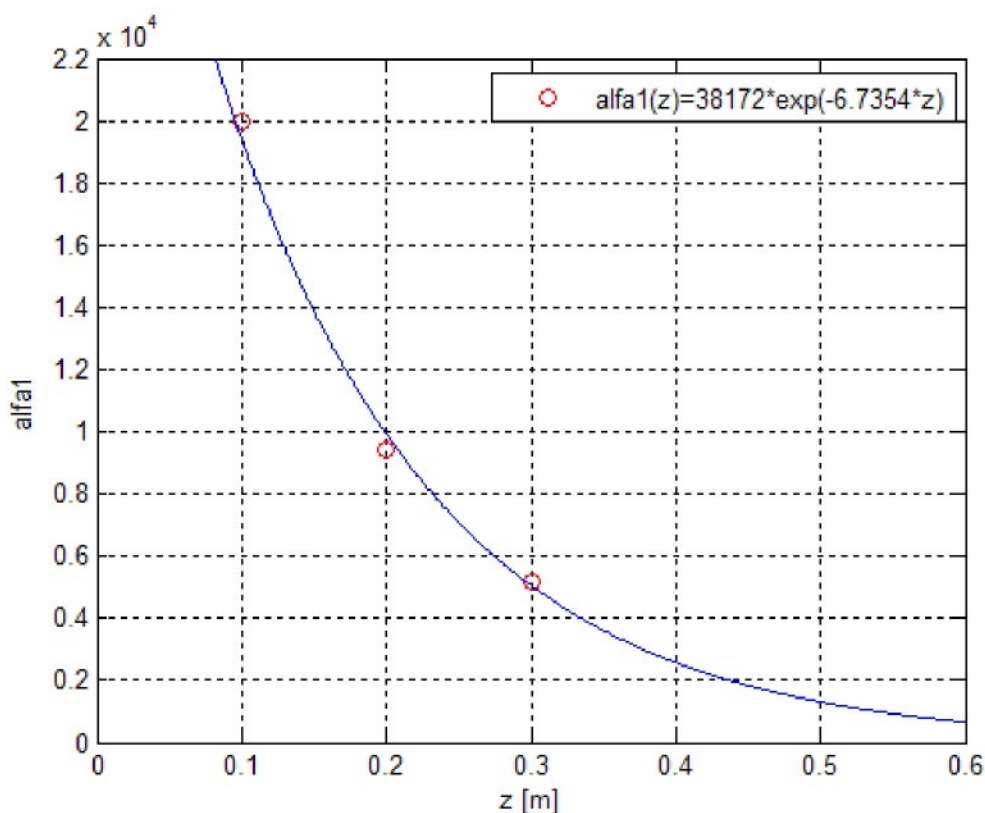
x, y, z jsou souřadnice a

$\alpha_p, \beta_p, \gamma_p$ jsou parametry závislé na souřadnici z . Tyto tři proměnné parametry pak byly parametrizovány jako exponenciální funkce a metodou nejmenších čtverců byly určeny její parametry. Dané parametry α_p, β_p a γ_p pak lze zapsat pomocí funkce (4.19)

$$\begin{aligned}
\alpha_p(z) &= 38172 \cdot \exp^{(-6.7354 \cdot z)} \\
\beta_p(z) &= 49.483 \cdot \exp^{(-4.5952 \cdot z)}, \\
\gamma_p(z) &= 431.91 \cdot \exp^{(-7.74402 \cdot z)}
\end{aligned}
\tag{4.19}$$

kteřá je závislá pouze na vzdálenosti ozařovaného bodu od roviny zářiče, tedy jako funkce z souřadnice zkoumaného ozařovaného bodu. Tato funkční závislost je pak graficky znázorněna na obrázku Obr. 4.10. Prostorovou funkci pak můžeme psát ve tvaru (4.20).

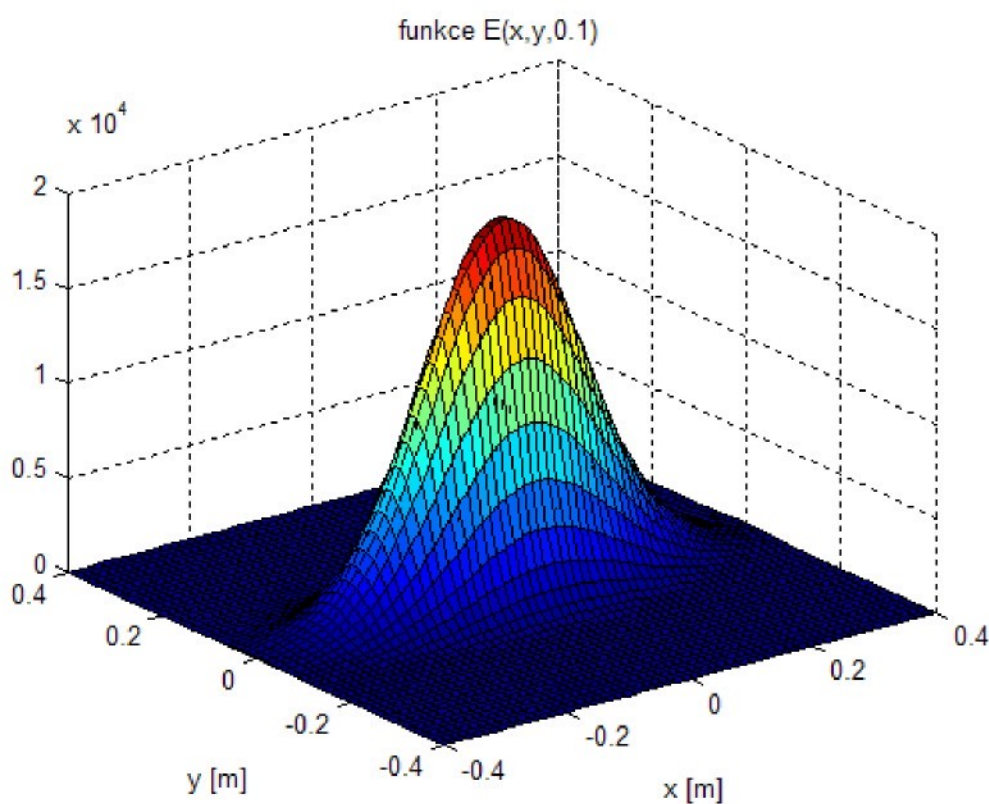
$$E(x, y, z) = (38172 \cdot \exp^{(-6.7354 \cdot z)}) \cdot \exp^{-((49.483 \cdot \exp^{(-4.5952 \cdot z)}) \cdot x^2 + (431.91 \cdot \exp^{(-7.74402 \cdot z)}) \cdot y^2)} \tag{4.20}$$



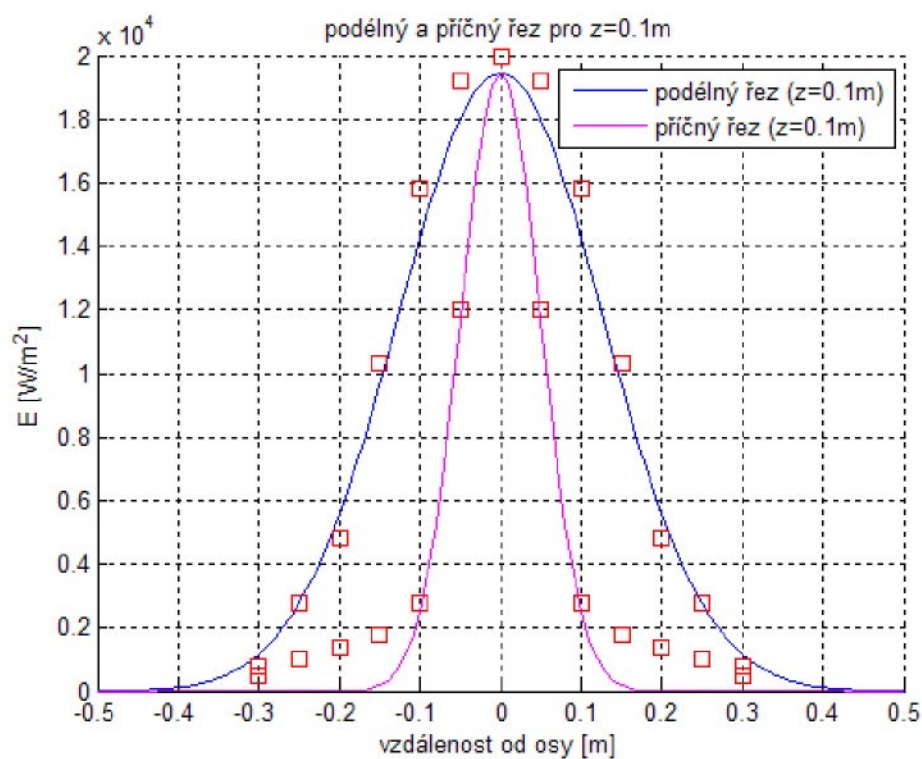
Obr. 4.10: Grafické znázornění funkce popisující parametr α_p [16]

Graficky je pak na 3D grafu, který je na Obr. 4.11, zobrazena prostorová exponenciální funkce $E(x,y,z)$, která popisuje intenzitu dopadajícího záření na plochu ve vzdálenosti 10 centimetrů, tedy $z=0,1\text{m}$. Na Obr. 4.12, Obr. 4.13 a Obr. 4.14 jsou pak vidět podélné a příčné řezy (procházející osou x a y) touto prostorovou funkcí a to pro vzdálenost 10, 20 a 30

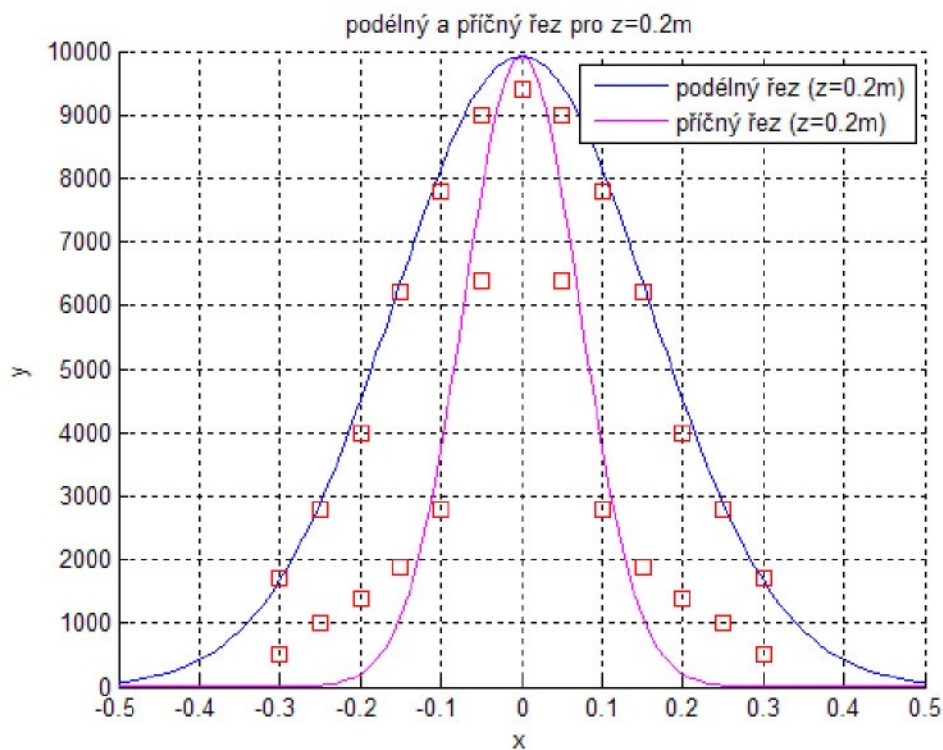
centimetrů zářiče od ozařované roviny. Na grafech jsou znázorněny body odečtené z výrobce dodané vyzařovací charakteristiky (znázorněny červenými čtverečky). Plnou čarou je pak znázorněna vyzařovací charakteristika, která byla použita pro výpočty matematicko-fyzikálního modelu. Ty byly provedeny na pracovišti TUL a jejich výsledky jsou popsány v dalším textu. Jak je zde vidět, nalezený popis vyzařovací charakteristiky sice úplně neodpovídá charakteristikám, které jsou udávány výrobcem, ani charakteristikám které naměřila firma LENAM, ale pro potřebu námi prováděných simulací, které mají pouze přiblížit mechanismy systému ohřevu, je zcela dostačující.



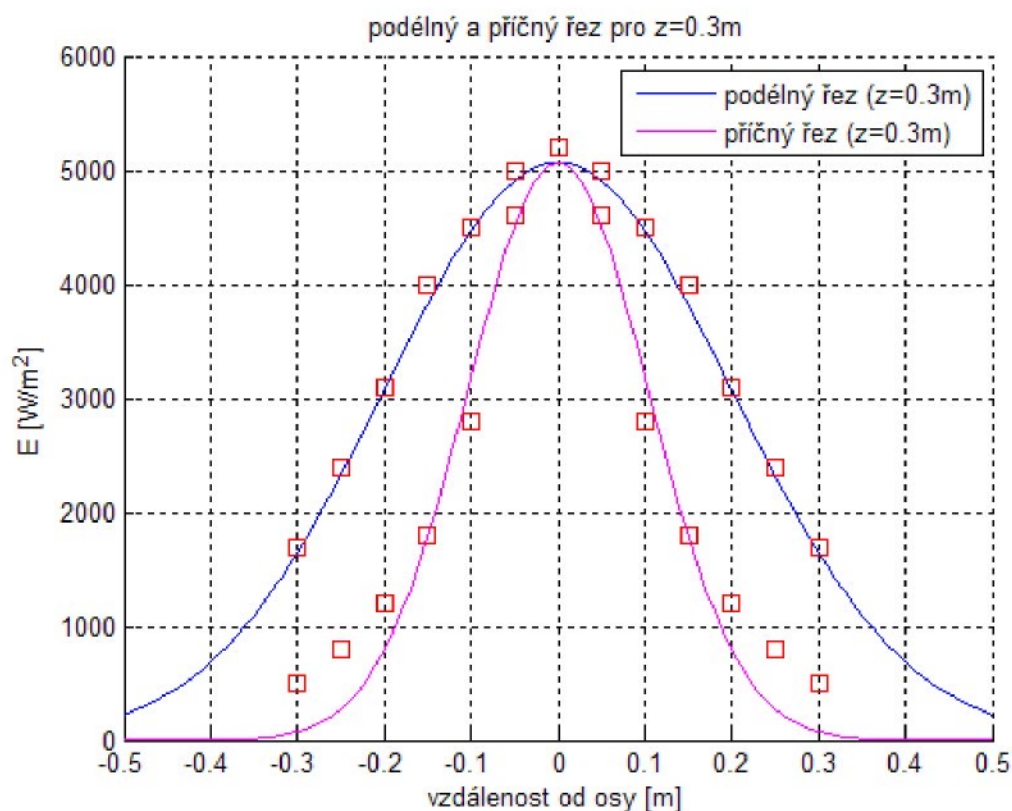
Obr. 4.11: Grafická prezentace funkce popisující intenzitu dopadajícího záření.



Obr. 4.12: Řez prostorovou funkcí pro vzdálenost zářiče od ozařovaného povrchu $z=0,1\text{m}$.



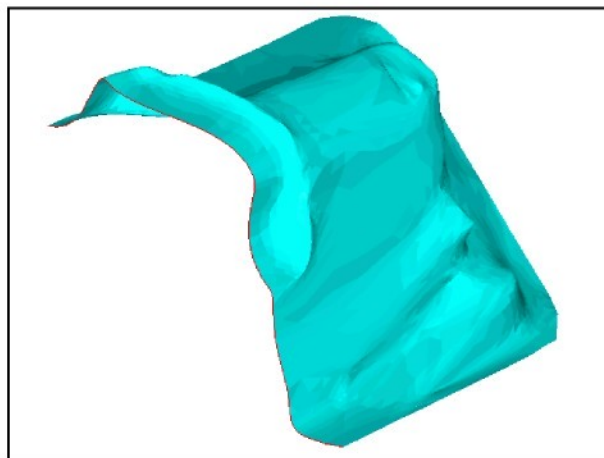
Obr. 4.13: Řez prostorovou funkcí pro vzdálenost zářiče od ozařovaného povrchu $z=0,2\text{m}$.



Obr. 4.14: Řez prostorovou funkcí pro vzdálenost zářiče od ozařovaného povrchu $z=0,3\text{m}$.

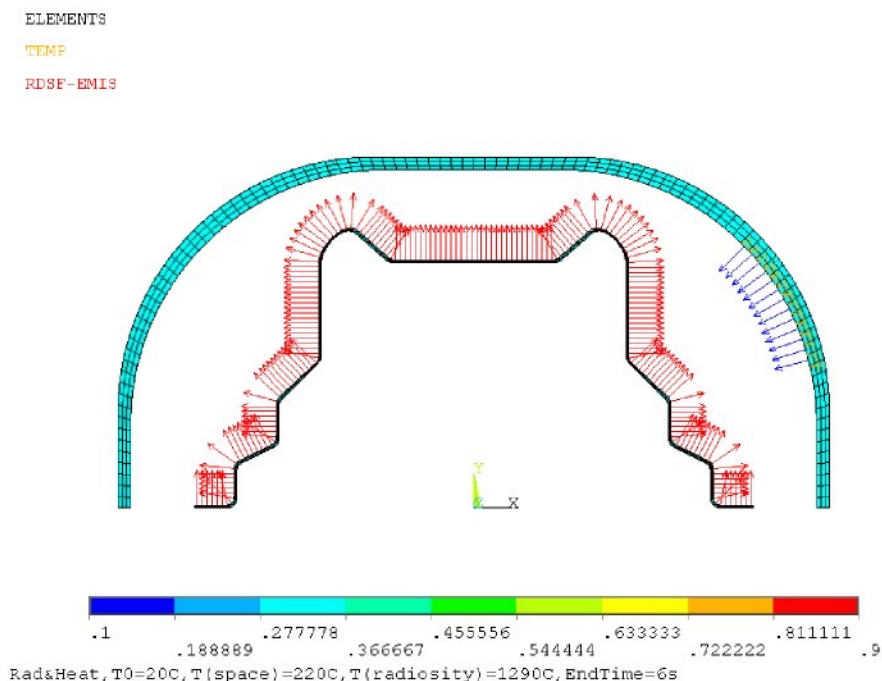
4.4.2 Simulace teplotního pole pro ověření proveditelnosti

Před tím, než firma Magna (Cadence Innovation) přistoupila k sestrojení experimentálního zařízení a prvním praktickým experimentům, bylo nutné provést simulaci, která by potvrdila nebo vyvrátila proveditelnost celého záměru. Za tímto účelem firma LENAM provedla základní simulační pokus, který zkoumal ohřev a chlazení výrobní formy za předpokladu, že k zahřívání bude použito infračerveného záření a chlazení bude provedeno prostřednictvím okolního prostředí. Tento experiment je pak popsán ve výzkumné zprávě [20].



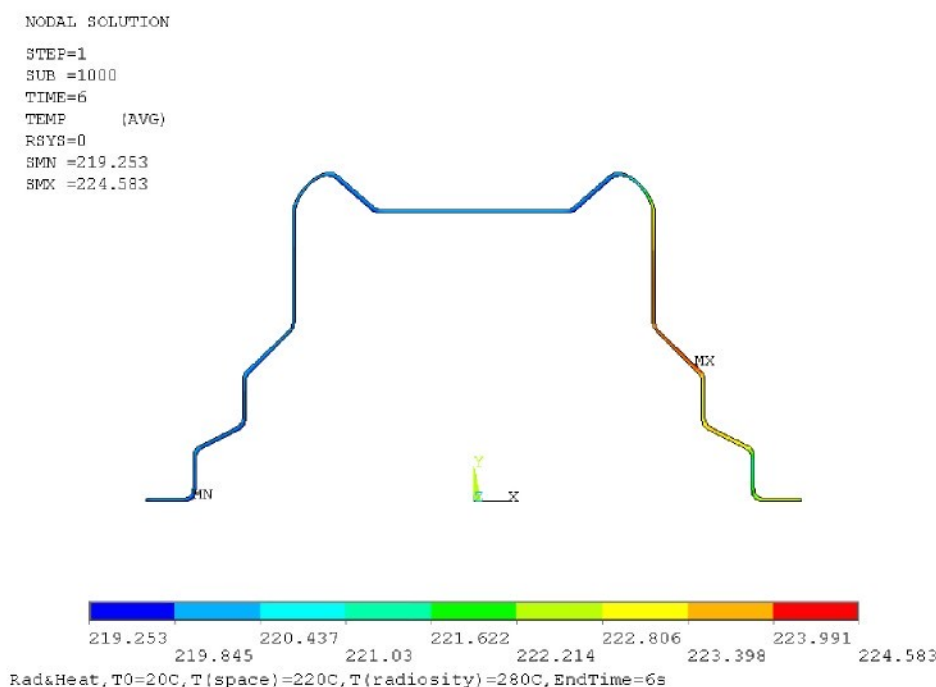
Obr. 4.15: Část reálné formy [20].

Pro počáteční simulaci, která zkoumá proveditelnost ohřevu, není použita žádná konkrétní výrobní forma, jako je na Obr. 4.15, ale je použit pouze zjednodušený tvar, který však obsahuje některé tvary, jenž jsou shodné s tvary používanými na reálných formách. Koncepti použitého simulačního modelu je pak vidět na Obr. 4.16, kde je černě naznačen použitý tvar formy a modře je naznačen infračervený zářič, který je ve tvaru jakési válcové plochy. V případě, že by se tento tvar osvědčil, bylo by možno použít univerzálního systému ohřevu (ozařovacího) pro výrobní formy různých tvarů.



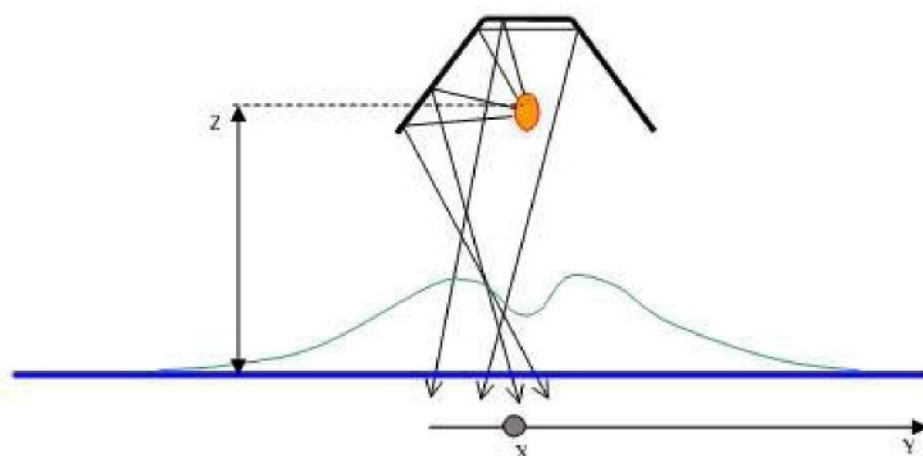
Obr. 4.16: Použitý model ohřevu [20].

Samotné simulace pak ukázaly, že výrobní formu lze na požadovanou teplotu vyhřát ve velmi krátkém čase. Je však důležité si zde uvědomit, že tento model nahrazoval infračervené zářiče spojitou plochou a nepočítal s vlivem rozmístování zářičů v závislosti na tvaru formy. To se po prvních experimentech na reálném systému ukázalo jako kritické a bylo nutno přistoupit k zahrnutí vyzařovacích charakteristik a poloh jednotlivých zářičů do modelu. Tyto vyzařovací charakteristiky byly získány jednak z dokumentace zářičů od výrobce a pak provedením vlastních měření dvou typů použitých zářičů, která jsou popsána ve výzkumné zprávě [17] a výsledky jsou stručně popsány v kapitole 4.3.



Obr. 4.17: Výsledek simulace ohřevu s malou vyzařovací plochou [20].

Z naměřených charakteristik se ukázalo, že plocha ozařovaná infračerveným zářičem je poměrně malá a rozložení dopadající energie na této ploše je velice nerovnoměrné, jak je vidět na Obr. 4.18. Z toho vyplývá, že je velmi důležité správné rozložení zářičů vůči tvaru formy. Toto potvrdily i některé experimenty, které byly provedeny na reálném systému a nasvědčují tomu i další simulace, provedené jednak firmou LENAM, ale i některé simulace provedené na pracovišti TUL. Ty budou ještě popsány dále a budou prezentovány jejich výsledky.



Obr. 4.18: Rozložení vyzařované energie zářiče PHILIPS [16].

4.4.3 Simulace pro ověření regulace

Ve chvíli, kdy bylo experimentální pracoviště připravováno k provozu, tak zároveň s tím a pak i současně s praktickými experimenty začala firma LENAM provádět simulace související s ověřením možnosti regulace a ověřením počtu zářičů nutných k vyhřívání výrobní formy. Firma pak provedla simulační experiment na zjednodušeném modelu, který obsahoval 34 infračervených zářičů a 34 snímačů teploty. Experiment je pak popsán ve výzkumné zprávě [22].

Zářiče pak byly v simulačním modelu umístěny tak, aby pokrývaly část válcové plochy, podobně jako u experimentu popsaného v kapitole 4.4.2. Pouze souvislá plocha byla nahrazena segmenty o dané ploše, které měly za úkol reprezentovat jednotlivé zářiče. Pro model samotné výrobní formy byl použit tvar reálné výrobní formy, která měla být použita na experimentálním pracovišti a později pro sériovou výrobu. Struktura simulačního modelu je pak prezentována na Obr. 4.19. Vzhledem k náročnosti přípravy a relativně vysoké výpočetní náročnosti matematického modelu pak byly simulovány pouze dva regulační algoritmy, a to jednak regulační algoritmus s dvoupolohovým relé s hysterezí ve zpětné vazbě a v druhém případě bylo použito PI regulátoru ve zpětné vazbě. V obou případech pak byla použita žádaná hodnota teploty povrchu formy 230°C . V obou případech bylo také použito pro řízení jednotlivých zářičů čidlo respektive teplota v bodě, který byl geometricky určen jako bod dopadu paprsku, jenž vychází ze středu zářiče kolmo. Na Obr. 4.19 jsou pak místa rozmístěných regulačních čidel naznačena prostřednictvím červených bodů. Parametry simulace, které byly určeny podle parametrů dodavatelů jednotlivých komponent, pak byly následující:

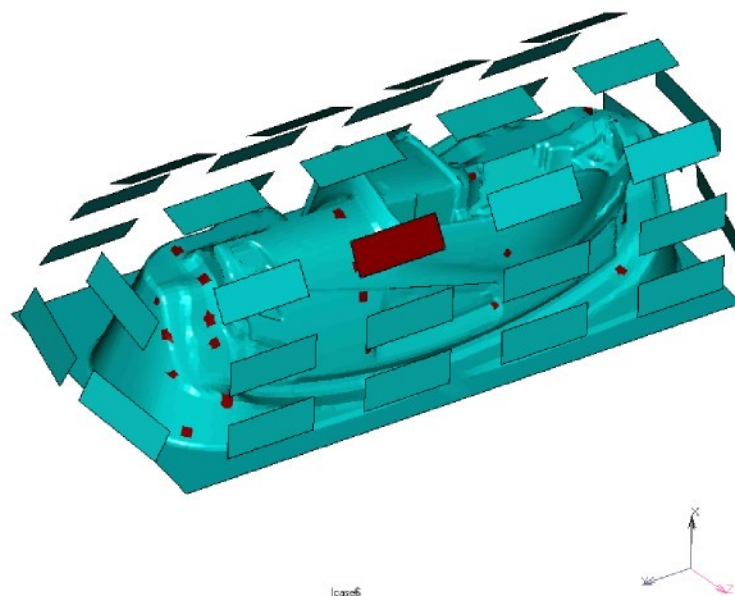
• Výkon použitých zářičů	2000 W
• Vyzařující plocha zářiče	0,03 m ²
• Efektivní teplota lampy	1040 K
• Celkový počet lamp	34
• Hmotnost formy	150 kg
• Měrná tepelná kapacita formy	446 Jkg ⁻¹ K ⁻¹
• Součinitel přestupu tepla	10 W/m ² K
• Teplota okolí	300 K

Předpokládané výsledky samotné simulace pak byly:

• Teplo potřebné k ohřátí z 20°C na 200°C	13,28 MJ
• Teoretická doba ohřevu	239 sekund

Inc: 63
Time: 6.025e+002

MSC



Obr. 4.19: Model použitý pro simulaci ohřevu výrobní formy s konkrétními zářiči [22].

Výsledky dané simulace jsou pak zobrazeny na následujících obrázcích. Na Obr. 4.20 je vidět rozložení teplotního pole v případě, že jsou zapnuty v jeden okamžik všechny zářiče. Tato simulace tedy ukazuje, že:

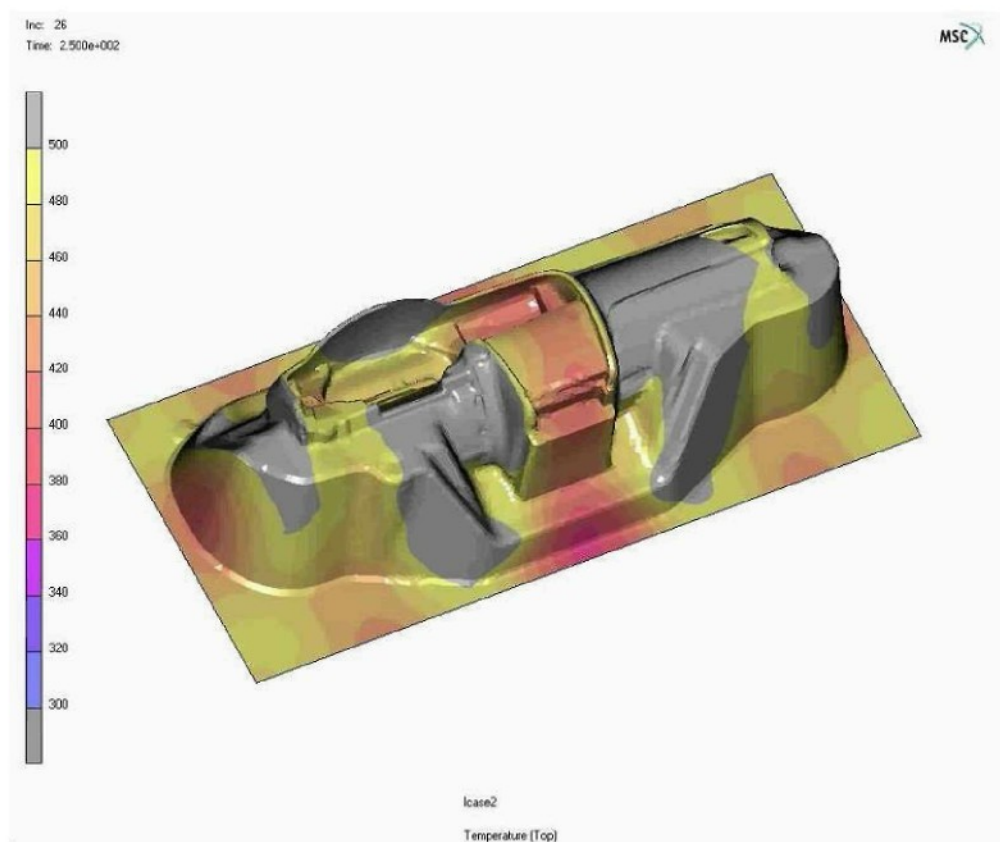
- Nebude možno použít systém ohřevu bez regulace pro každý zářič (tedy alespoň v případě, že by byla použita univerzální záda pro různé tvary vyhřívací formy). Je dána silná závislost teplotního pole na rozložení infračervených lamp vzhledem k tvaru formy.

- Daný výkon zářičů bude dostatečný pro vyhřátí formy na danou teplotu.

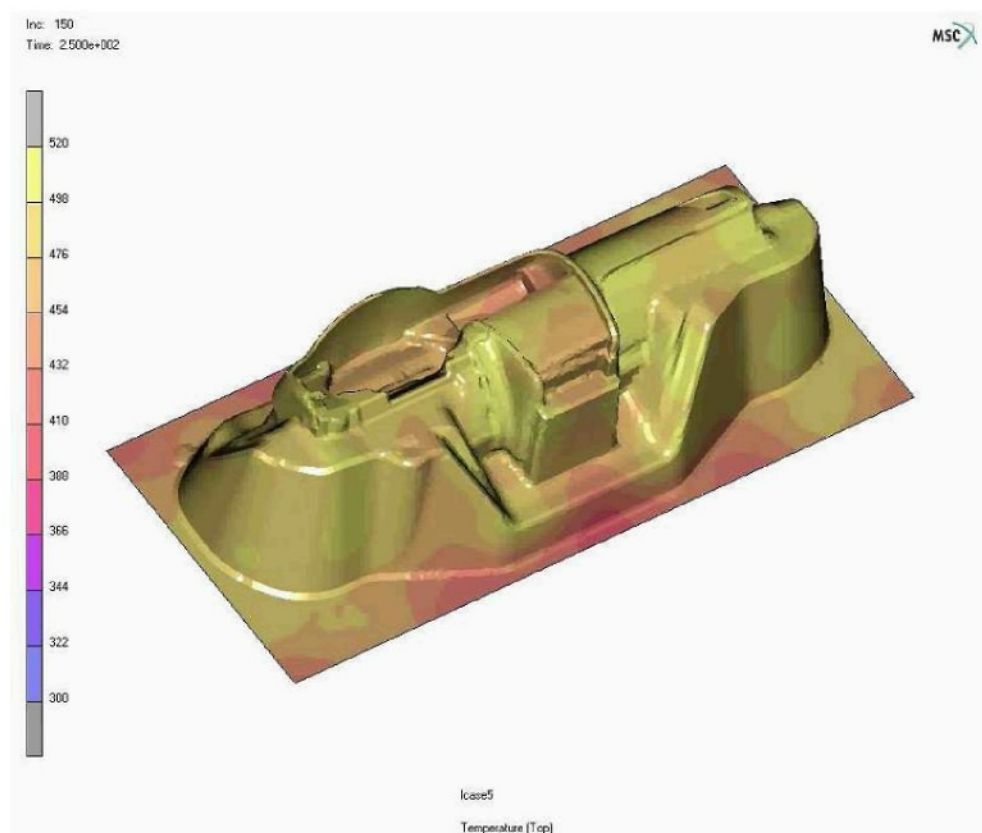
Na Obr. 4.21 je pak vidět rozložení teplotního pole při použití PI regulátorů ve zpětné vazbě pro každý zářič. Na Obr. 4.22, Obr. 4.23 a Obr. 4.24 je vidět teplota povrchu formy na jednotlivých čidlech a to pro případ zapnutí všech zářičů, pak pro použití dvoupolohového relé s hysterezí ve zpětné vazbě a použití PI regulátoru ve zpětné vazbě. Zde je vidět, že při použití PI regulátoru bude zřejmě dle očekávání dosaženo daleko větší homogenity teplotního pole.

Je zde zřetelné, že s použitím regulační smyčky odděleně pro každý zářič bude zřejmě možné dosáhnout relativně vysoké homogenity teplotního pole v místech, ve kterých je teplota měřena. Na druhou stranu je zde patrné, že i při regulaci vznikají na výrobní formě výrazně teplejší a studenější místa. Na 3D modelu formy jsou vidět výrazné červené a žluté skvrny, které ukazují na rozdíly teplot až 80°C v různých místech. Také na Obr. 4.22, kde jsou vidět křivky vývoje teplot povrchu formy, které mají značné rozdíly v rychlosti ohřevu a maximální teplotě na kterou je možno danou část vyhřát. Tyto problematické jevy jsou pak způsobeny nevhodným rozmístěním infračervených zářičů a teplotních čidel vůči výrobní formě. Tedy jinak řečeno, i v situaci, kdy teploty na čidlech budou vzájemně vykazovat malé rozdíly, může docházet při nesprávném rozložení zářičů vůči formě k tomu, že teploty povrchu formy budou v nesnímaných částech vykazovat značné rozdíly teplot a to může způsobovat rozsáhlé vady finálního výrobku. Tato skutečnost se pak potvrdila v průběhu experimentální výroby, kde z těchto důvodů byly vady finálních výrobků zjištěny a bylo nutno vynaložit nemalé úsilí na homogenizaci teplotního pole. Toho bylo dosaženo

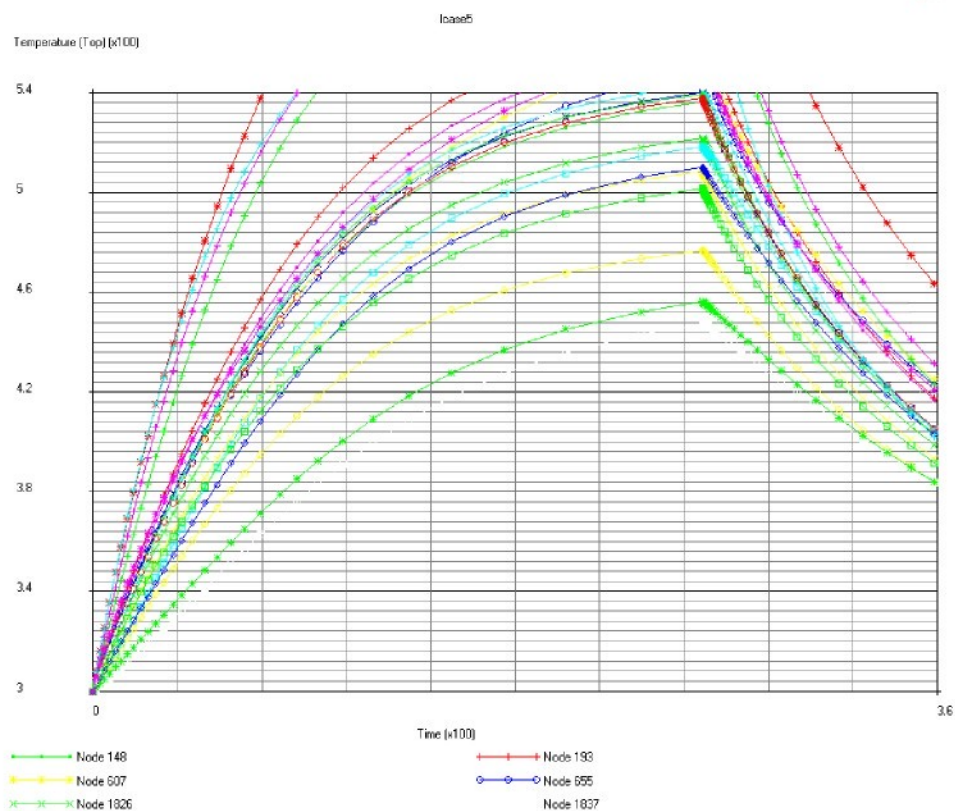
- počítačovým rozmístěním infračervených zářičů na základě geometrie formy a modelovaného teplotního pole, které provedla firma LENAM
- a následnou optimalizací z hlediska řízení, která zajistí dosažení požadovaných teplot v definovaných bodech řízením. Toto je součástí této práce.



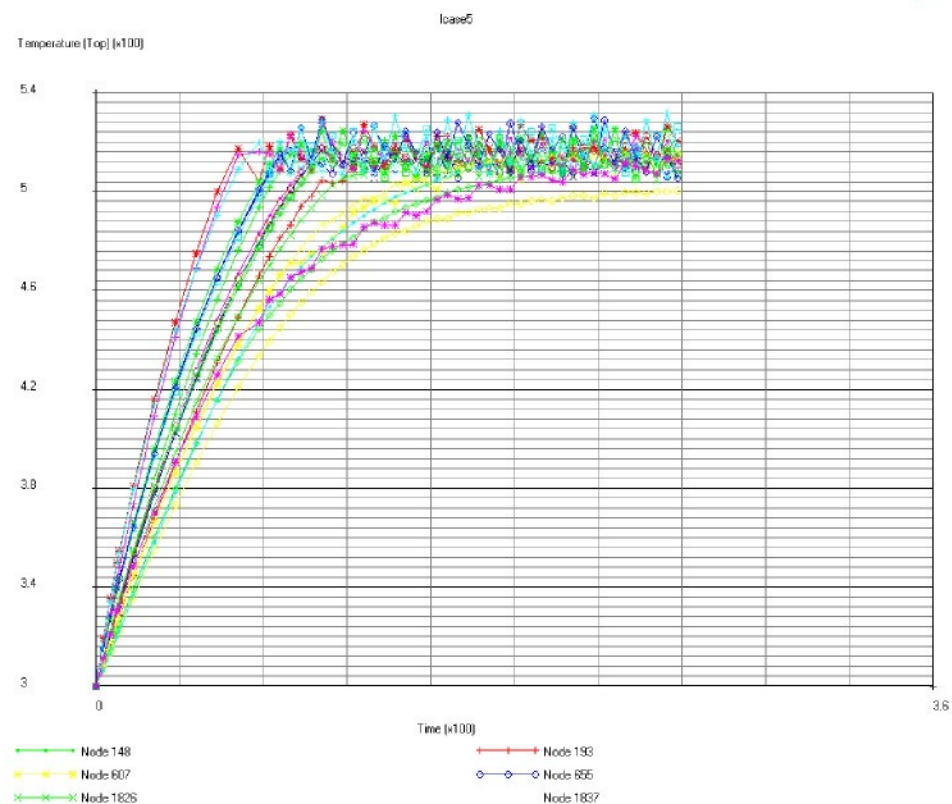
Obr. 4.20: Výsledek simulace po 250 sekundách při zapnutí všech zářičů najednou [22].



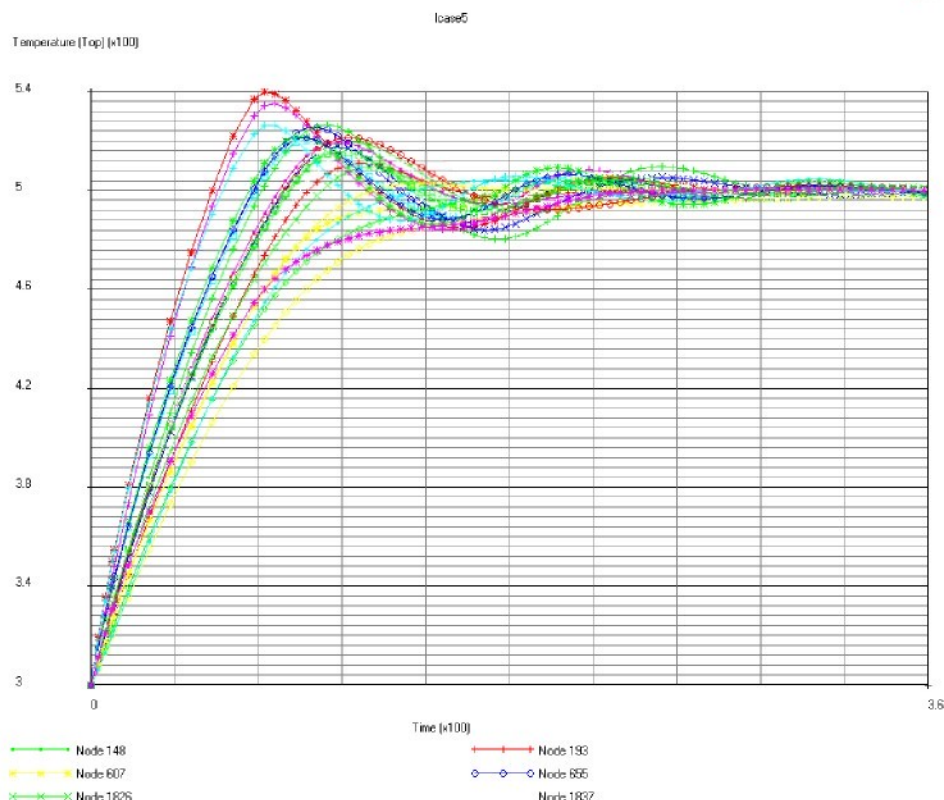
Obr. 4.21: Výsledek simulace po 250 sekundách při použití PI regulátorů [22].



Obr. 4.22: Průběh teploty pro simulaci zapnutí všech zářičů [22].



Obr. 4.23: Průběh teploty výrobní formy pro simulaci s dvoupolohovou regulací [22].



Obr. 4.24: Průběh teploty výrobní formy pro simulaci s použitím PI regulátoru [22].

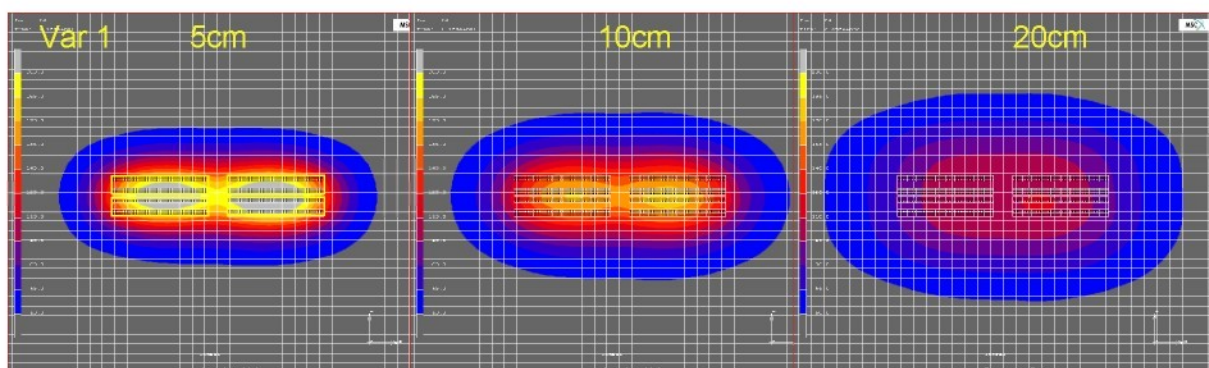
4.4.4 Simulace teplotního pole pro různé struktury rozmístění zářičů

Jak je řečeno výše, naměřením vyzařovacích charakteristik se ukázalo, že dopadající energie záření na plochu je velmi nerovnoměrná. Z tohoto důvodu bylo nutno přikročit k simulacím, které povedou k návrhu metodiky respektive k doporučením ohledně optimálního rozmístování zářičů vůči ozařovanému povrchu formy. Je třeba si uvědomit, že v době kdy vznikala tato doporučení, zatím nebyly prostředky k rozmístování infračervených zářičů za podpory počítačové simulace a následného přesného rozmístování zářičů pomocí robota, jako je tomu dnes. Tato práce byla prováděna ručně a intuitivně, proto bylo nutno vypracovat tuto metodiku.

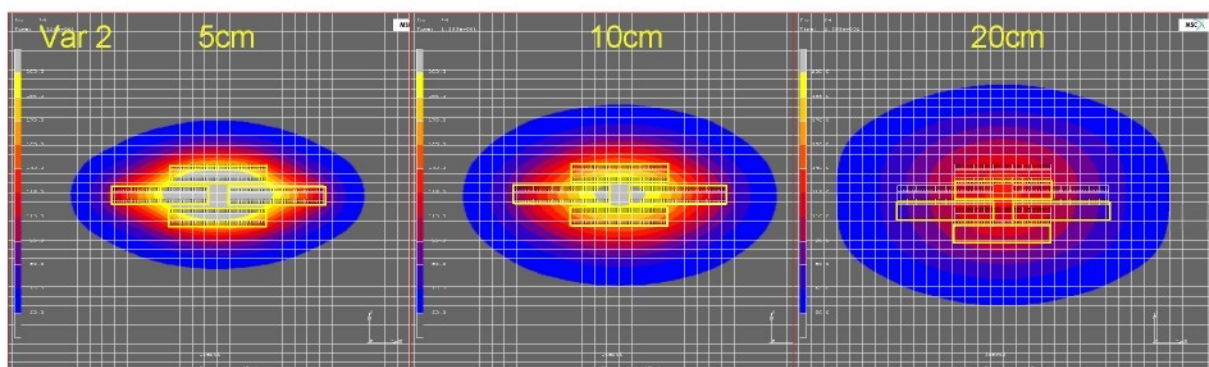
Při návrhu experimentu se vycházelo z předpokladu, že zářiče by měly pokrývat ekvidistanční plochu kolem vyhřívané výrobní formy a měly by být na ni rozmístěny tak, aby zajišťovaly homogenní teplotní pole respektive homogenní intenzitu dopadajícího záření na povrch vyhřívané formy. Z těchto důvodů byla jednak provedena studie firmou LENAM a zároveň s ní byla na pracovišti TUL provedena podobná studie, která vznikla výhradně pro potřeby TUL. Obě studie se zabývaly optimální vzdáleností zářičů od povrchu vyhřívané plochy a optimální strukturou uspořádání zářičů. Studie firmy LENAM je pak popsána ve

výzkumné zprávě [21] a studie provedená na pracovišti TUL je pak popsána v práci [16]. Zde budou prezentovány pouze některé výsledky a závěry z nich vycházející.

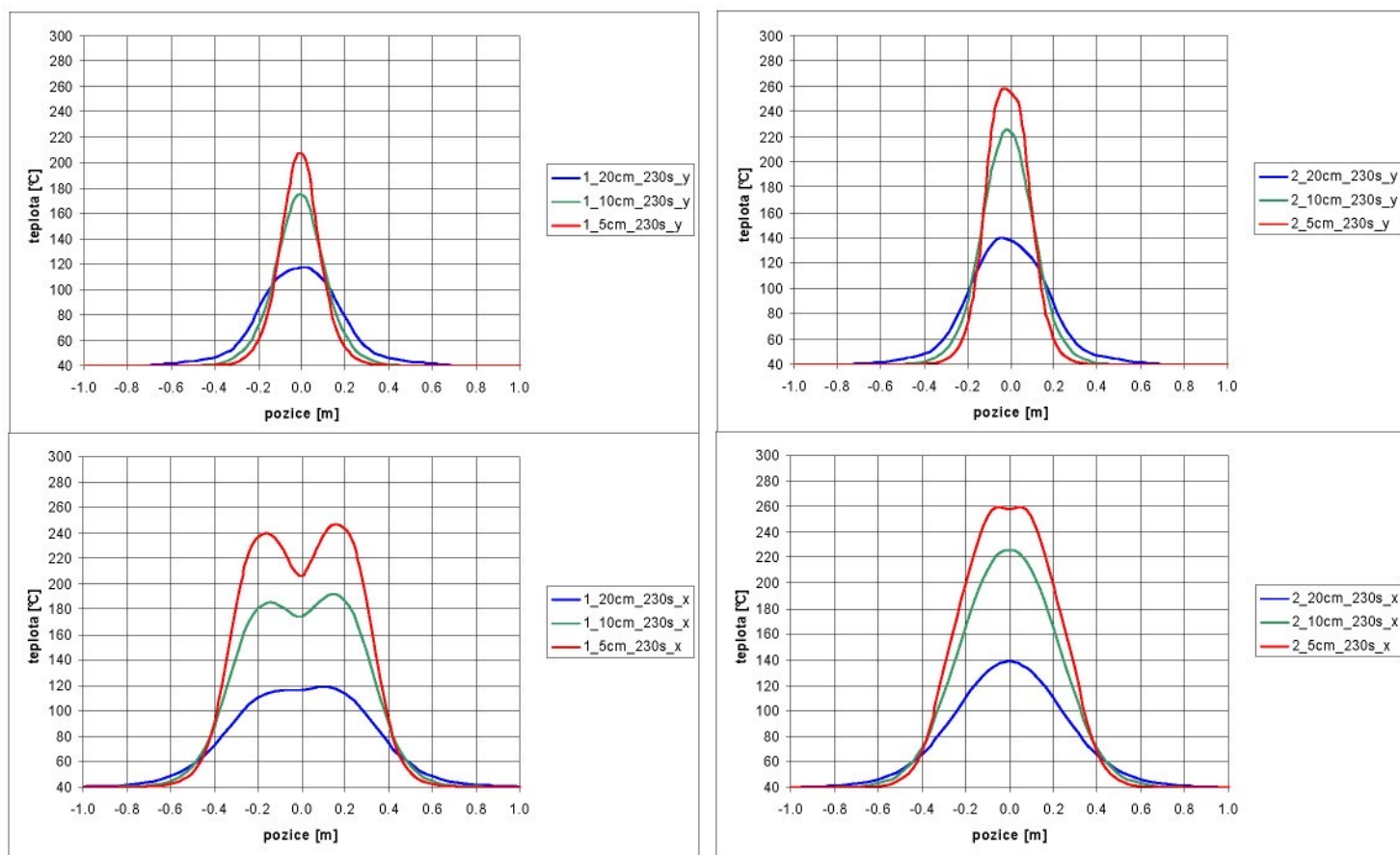
Matematická simulace firmy LENAM byla provedena pro dvě možné struktury rozmístění zářičů. Jednak byla provedena pro maticovou strukturu zářičů, která je naznačena na Obr. 4.25 a potom pro možnost rozložení zářičů v cihlové struktuře, jak je naznačeno na Obr. 4.26. Obě simulace pak byly provedeny pro tři různé vzdálenosti světla od ozařované desky. Pro simulaci byly zvoleny vzdálenosti 5, 10 a 20 centimetrů. Výsledky simulací jsou pak zobrazeny ve formě náhledu teplotních polí, které jsou na Obr. 4.25 a Obr. 4.26. Řezy těchto teplotních polí jsou pak na obrázku Obr. 4.27. Jsou zde podélné a příčné řezy pro maticové (vlevo) a pro cihlové (vpravo) uspořádání infračervených zářičů. Nahoře je pak příčný a dole podélný řez teplotním polem.



Obr. 4.25: Teplota v čase 230 sekund pro maticové uspořádání zářičů ve vzdálenosti 5, 10 a 20 centimetrů od ozařovaného povrchu [21].

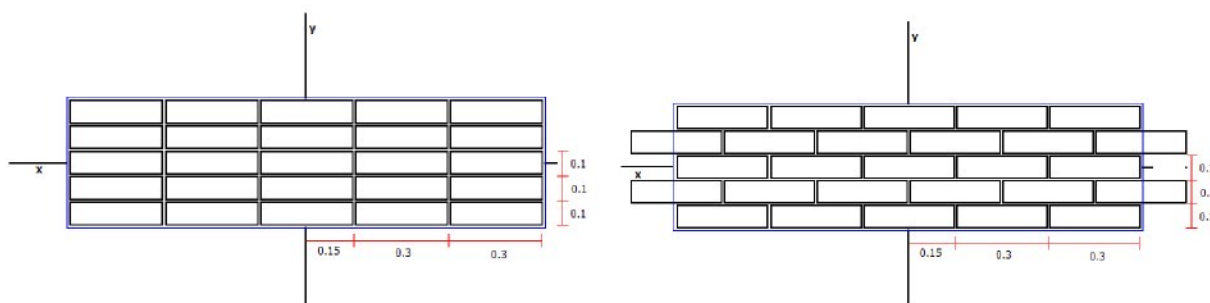


Obr. 4.26: Teplota v čase 230 sekund pro cihlové uspořádání zářičů ve vzdálenosti 5, 10 a 20 centimetrů od ozařovaného povrchu [21].



Obr. 4.27: Výsledek simulace pro maticové (vlevo) a cihlové (vpravo) uspořádání zářičů [21].

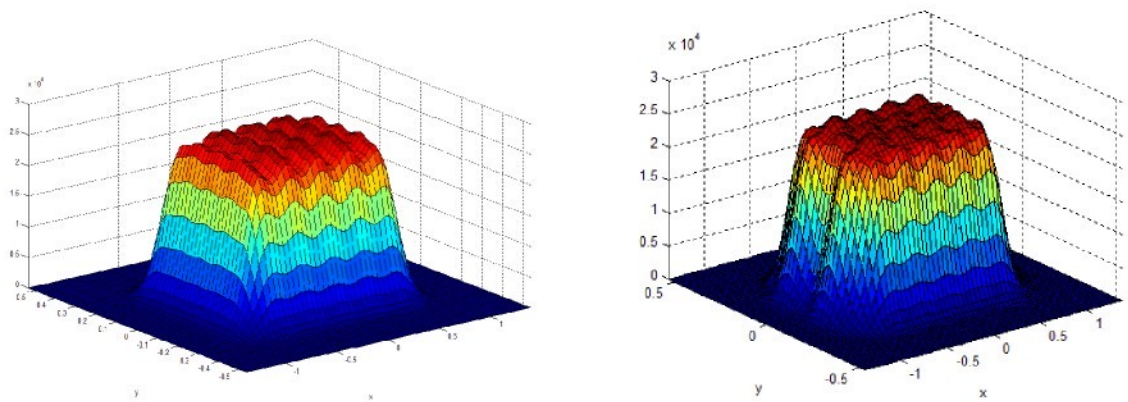
Simulační výpočet matematického modelu za účelem určení optimálního uspořádání zářičů a optimální vzdálenosti od vyhřívaného povrchu byl proveden také na pracovišti TUL. Pro simulaci a následnou analýzu výsledků byly opět zvoleny dvě různé struktury uspořádání zářičů a to jednak uspořádání v maticovém tvaru, a potom uspořádání cihlové. Na rozdíl od simulací firmy LENAM zde byla použita větší skupina zářičů, konkrétně 25 uspořádaných v pěti řadách, která lépe definuje spojitě pokrytí většího povrchu ozařovaného tělesa a měla by tedy lépe odpovídat skutečnosti. Obě simulované struktury, tedy maticová i cihlová, jsou pak znázorněny na Obr. 4.28. Pro tyto dvě struktury pak byla provedena simulace pro infračervené zářiče umístěné ve vzdálenosti 10 a 15 centimetrů od ozařované desky. Výsledky simulací jsou pak prezentovány níže.



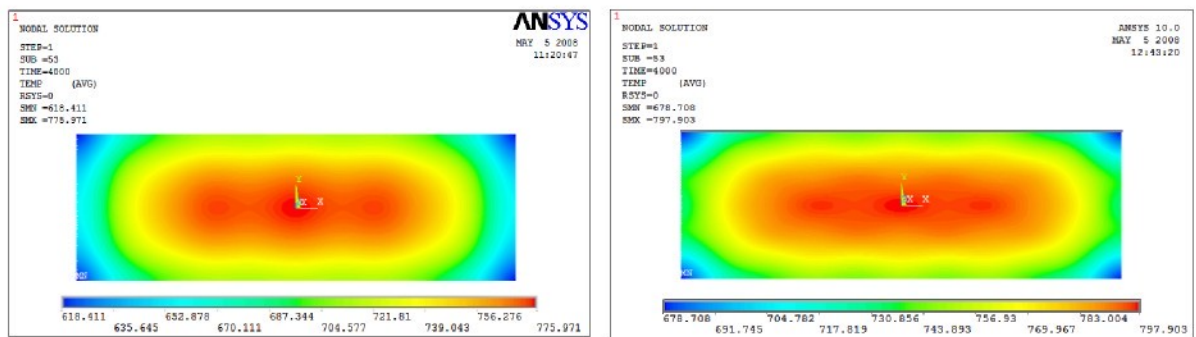
Obr. 4.28: Simulovaná struktura zářičů. Vlevo maticová a vpravo cihlová struktura [16].

Pro oba typy uspořádání zářičů je zde provedeno porovnání výsledků. Na Obr. 4.29 je vidět graficky prezentovaná intenzita záření dopadajícího na ozařovaný povrch. Jsou zde vidět zřetelná maxima a minima intenzity záření, která odpovídají polohám geometrických středů infračervených lamp. Na Obr. 4.30 a Obr. 4.31 jsou porovnávána výsledná teplotní pole po čase 4000 sekund pro cihlovou a maticovou strukturu zářičů. Obr. 4.30 zobrazuje teplotní pole pro vzdálenost zářičů 10 centimetrů a Obr. 4.31 pro vzdálenost 15 centimetrů od ozařovaného objektu. Na Obr. 4.32, Obr. 4.33, Obr. 4.34 a Obr. 4.35 jsou pak zobrazeny příčné a podélné řezy zmíněným teplotním polem. Řezy teplotním polem byly voleny tak, aby popisovaly pole právě v délce jednoho zářiče, takže řezy v dalších vzdálenostech od počátku souřadnicového systému by se měly opakovat v prakticky stejné podobě.

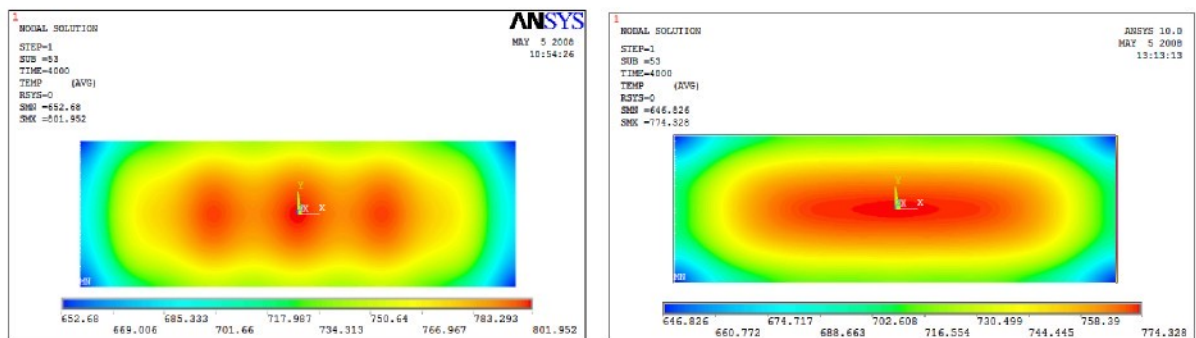
Jak je z uvedených výsledků patrné, při umístění infračervených zářičů příliš blízko k ozařovanému povrchu dochází u obou uspořádání zářičů, tedy u maticového i cihlového, k výraznému nárůstu teploty přímo pod lampou. V místech na povrchu formy mezi jednotlivými zářiči pak dochází k výraznému poklesu teploty. To se pak může na finálním výrobku projevit třeba jako nedostatečně slinutý práškový materiál v některých kritických částech. Na druhou stranu příliš velká vzdálenost od ozařované plochy (viz. vzdálenost 20 centimetrů od ozařované plochy) se může u cihlové i maticové struktury projevit příliš pomalým ohřevem ozařovaného povrchu, což je v rozporu s požadavkem na maximální rychlost výroby. Jak je pak vidět na simulaci pro vzdálenost 15 centimetrů od povrchu ozařované plochy, tak poněkud menší rychlost ohřevu v této vzdálenosti je kompenzována kvalitou teplotního pole. Jak je tedy vidět na Obr. 4.34 a Obr. 4.35, pro volbu cihlové struktury zářičů ve vzdálenosti 15 centimetrů dojde k výraznému potlačení vlivu vyzařovací charakteristiky infračerveného zářiče na teplotní pole. Je zde vidět výrazné potlačení teplotních minim a maxim na teplotním poli.



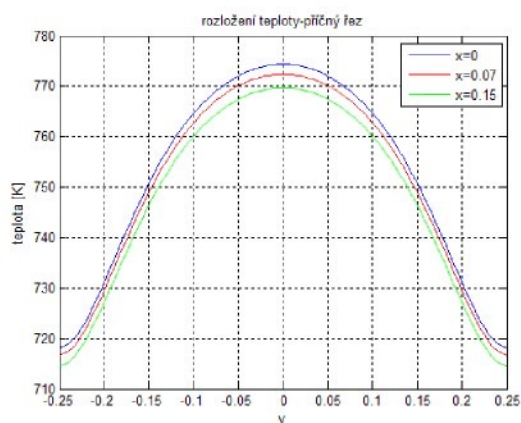
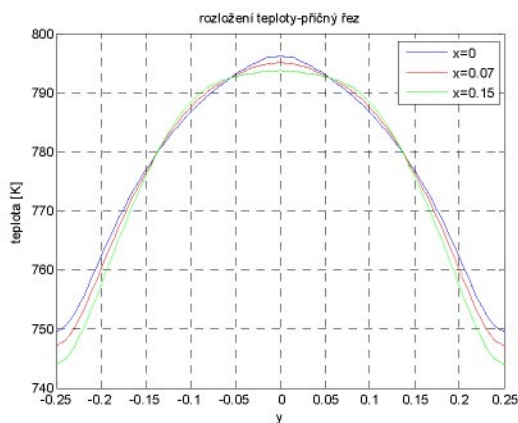
Obr. 4.29: Intenzita dopadajícího záření pro maticové (vlevo) a cihlové uspořádání zářičů (vpravo) [16].



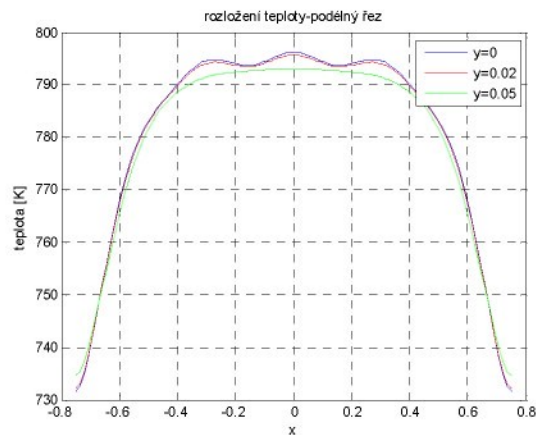
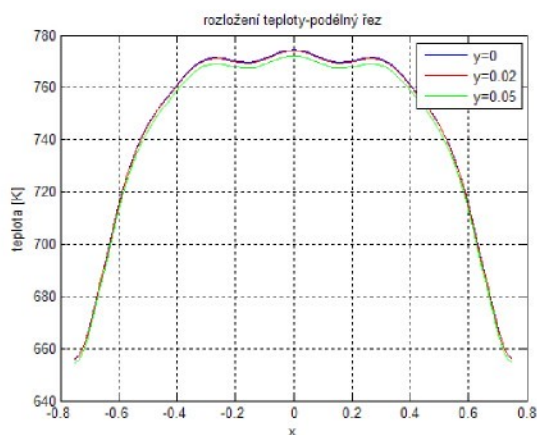
Obr. 4.30: Teplota v čase 4000 sekund pro cihlové (vlevo) a maticové uspořádání zářičů. Vzdálenost zářičů od desky je 10 centimetrů [16].



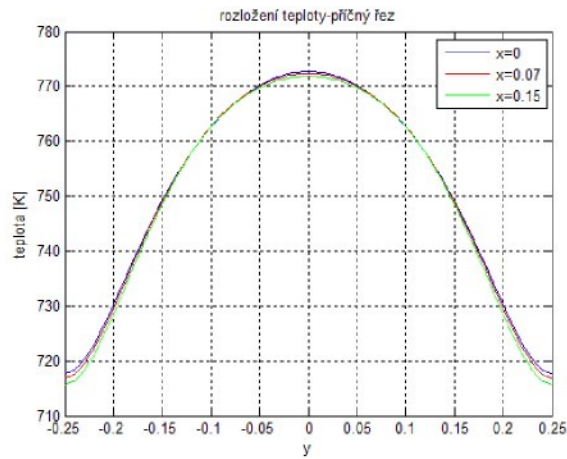
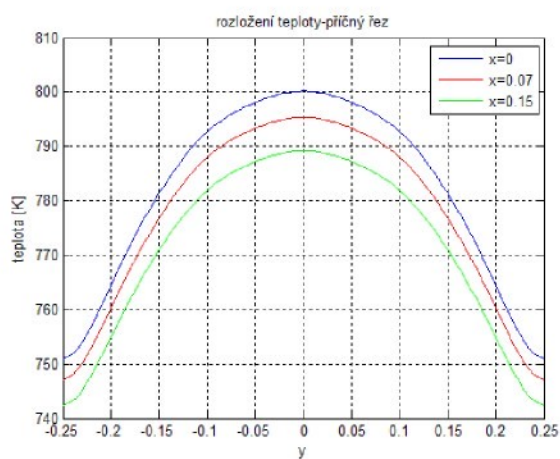
Obr. 4.31: Teplota v čase 4000 sekund pro cihlové (vlevo) a maticové uspořádání zářičů. Vzdálenost zářičů od desky je 15 centimetrů [16].



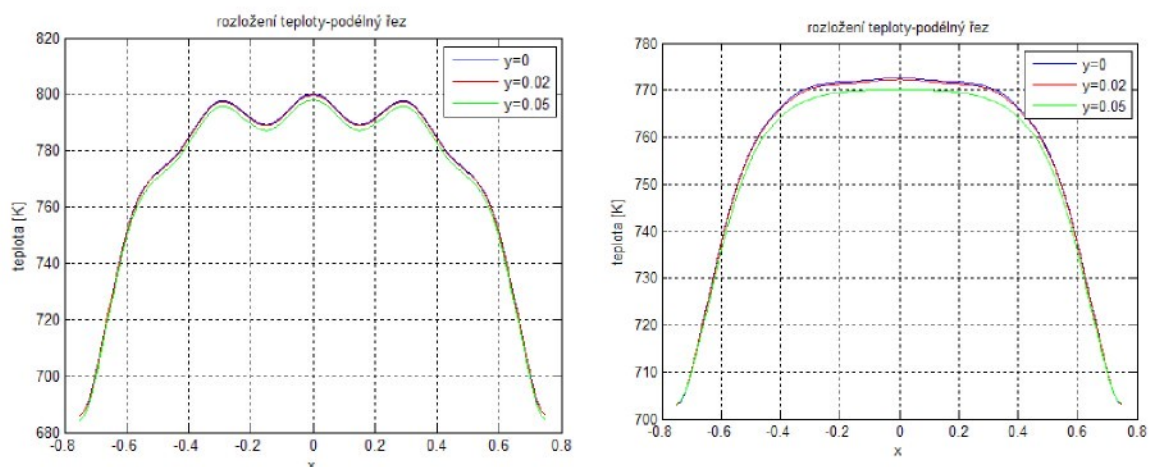
Obr. 4.32: Příčný řez teplotním polem pro maticovou (vlevo) a cihlovou strukturu. Zářiče jsou vzdáleny 10 centimetrů od povrchu ozařované desky [16].



Obr. 4.33: Podélný řez teplotním polem pro maticovou (vlevo) a cihlovou strukturu. Zářiče jsou vzdáleny 10 centimetrů od povrchu ozařované desky [16].



Obr. 4.34: Příčný řez teplotním polem pro maticovou (vlevo) a cihlovou strukturu. Zářiče jsou vzdáleny 15 centimetrů od povrchu ozařované desky [16].



Obr. 4.35: Podélný řez teplotním polem pro maticovou (vlevo) a cihlovou strukturu. Zářiče jsou vzdáleny 10 centimetrů od povrchu ozařované desky [16].

Na základě výše popsaných simulací a jejich výsledků pak vzniklo několik doporučení pro intuitivní rozmísťování zářičů pro systém ohřevu, a tato doporučení se pak dále uplatnila i pro počítačově podporované rozmísťování zářičů. V první řadě to byl požadavek na ekvidistantní vzdálenost od plochy výrobní formy. Ta byla určena 12 až 15 centimetrů. Pak zde byl požadavek na preferovanou strukturu takto rozdělených zářičů do cihlové struktury. V neposlední řadě pak bylo požadováno také pokrytí zářiči v požadované hustotě, aby nevznikaly odchylky teploty způsobené nedostatečným nebo naopak nadměrným překrýváním vyzařovaných toků.

Jak je tedy vidět z provedených simulací, a to se také dále potvrdilo experimenty na reálném vyhřívacím zařízení, je kvalita respektive homogenita teplotního pole vysoce závislá na uspořádání infračervených zářičů vůči výrobní formě. Z toho tedy vyplývá skutečnost, že pro každý tvar výrobní formy je nutno navrhnout systém ohřevu se specifickým rozmístěním zářičů, tedy pro každý typ výrobní formy navrhnout vlastní „záda“ s takovým rozložením zářičů, které bude pokud možno zajišťovat rovnoměrné ozáření formy. Takového rozložení infračervených zářičů a teplotních čidel je však velmi obtížné dosáhnout ručním intuitivním umístěním. Jednak je takovýto proces optimalizace velice časově náročný a zabírá zbytečně výrobní čas stroje, který je možno použít k výrobě, a pak je takto provedený proces neopakovatelný. To je pak v průmyslu veliký problém v případě, že je nutno rychle zavést nový sortiment výrobků, vyrábět paralelně na více strojích nebo provést případnou opravu. Proto je nutno takovýto proces přesně definovat. Za tímto účelem firma LENAM vyvinula metodiku pro rozmísťování čidel a infračervených zářičů pomocí počítačového modelu. Tato metoda optimalizace poloh zářičů, kterou používá firma LENAM, vychází z geometrie formy

a je postavena na principu zajištění rovnoměrného přísunu tepelné energie, která je v našem případě dána intenzitou světelného toku pro celou plochu vyhřívané výrobní formy. Testem rovnoměrnosti je rozložení teplot na modelu formy. Je důležité si uvědomit, že výstupem je „pouze“ prvotní rozložení zářičů, na které musí nutně navázat další strategie, která zajistí konečnou kvalitu teplotního pole. Touto navazující strategií se pak zabývá tato práce, a konkrétně jde o volbu struktury regulačního obvodu a syntézu regulačního algoritmu. Metodika, vyvinutá firmou LENAM pro rozmisťování zářičů vůči výrobní formě, pracuje výhradně s počítačovým modelem a optimalizace poloh čidel a zářičů vůči formě nevyžaduje fyzický přístup ke stroji. Výstupem této počítačovým modelem podporované metody jsou pak data pro robota - respektive souřadnice robota, který pak dokáže zářiče rozmístit opakovaně do stejných pozic.

Teplotní snímač v podobě termočlánku pak byl umístěn do bodu, který je na výrobní formě určen normálou k rovině zářiče, jenž prochází právě geometrickým středem zářiče a v bodě kde tato normála protíná povrch výrobní formy je pak umístěn teplotní senzor ve formě dvoudrátového respektive jednodrátového termočlánku.

4.5 Dosažitelnost ustálených stavů

Pro ověření možnosti dosažení homogenního pole je třeba si hned od počátku určit podmínky, za kterých je homogenita pole respektive teplota pole snímána v měřených bodech dosažitelná. Tato podmínka by měla určit dosažitelnost homogenního pole respektive pole požadovaných parametrů ještě před přistoupením k prvním pokusům o regulaci teplotního pole na reálném systému.

V našem případě, na kterém bude následující podmínka aplikována, bude podmínka dosažitelnosti ustálených stavů respektive ustálených teplot v nekonečném čase vycházet z hardwarového omezení akčních členů. Tedy v našem případě bude velice jednoduchá a bude definována následovně.

Vycházíme tedy z akčních členů, které jsou řízeny ve dvou stavech a to, že daný zářič je buď zapnut, nebo vypnut a také není v reálném systému ohřevu **dána žádná možnost aktivního chlazení**. K ochlazování výrobní formy tedy nelze použít jiných prostředků než vzduchu v okolí výrobní formy, a ten je pro jakékoliv řízené chlazení nepoužitelný. Tedy pro model, který je popsán v dalším textu a je použit pro návrh regulačního algoritmu a ověření dosažitelnosti dané kvality teplotního pole lze používat akční veličinu $u_i(t)$ pouze v rozmezí intervalu $\langle 0; 1 \rangle$. Podmínka dosažitelnosti dané kvality teplotního pole je tedy následující:

Jestliže je dána čtvercová matice zesílení $\mathbf{G}$, jejíž prvky g_{ij} představují zesílení, kterým působí j -tý zapnutý zářič ($u_j=1$) na i -té čidlo teploty (y_i), pak je nutná podmínka dosažitelnosti daného ustáleného vektoru snímaných teplot $\mathbf{u}(\infty)$ pro popis ustálených stavů

$$\mathbf{u}(\infty) = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{y}(\infty) \quad (4.21)$$

takováto

$$0 \leq u_i(\infty) \leq 1, i = 0, 1 \dots n. \quad (4.22)$$

V tomto konkrétním případě, který je popsán v této práci, bude mít nedodržení těchto podmínek dosažitelnosti za následek pouze nouzové odstavení linky z důvodů přehřátí některých čidel (nouzové odstavení nastane po překročení bezpečné teploty na některém z čidel), nebo nerovnoměrné rozložení teplotního pole respektive odchylku od požadovaného rozložení teplotního pole, což může mít obojí za následek „pouze“ zmetkový výrobek, nikoli však poškození výrobní formy. Rovnicí (4.22) byla zformulována nutná podmínka dosažení požadovaných teplot v definovaných bodech v ustáleném stavu. Tímto byl splněn bod č.4 dílčích cílů.

5 Identifikace a tvorba modelu

5.1 Volba typu modelu

Kapitoly 5.1, 5.2 a 5.3 obsahují popis činností související s dílčím cílem č.5. Systém ohřevu je tvořen infračervenými zářiči jako akčními členy a načerněnou výrobní formou, která je galvanicky vytvořena z niklu a teplota její rubové strany je snímána jako regulovaná veličina. Pro první nástin jeho chování při regulaci, stejně jako pro určení správného spárování dvojic, které jsou tvořeny termočlánkem, který snímá teplotu v dané oblasti, a infračervenou lampou, která danou část výrobní formy nejvíce teplotně ovlivňuje, bylo třeba vytvořit matematický model. Tento model sloužil k zodpovězení respektive ověření řešení několika problémů, a to:

- Zjištění chování dynamiky regulovaného systému.
- Ověření podmínek řiditelnosti a dosažitelnosti ustálených stavů.
- Návrhu regulačního algoritmu a jeho ověření před nasazením na reálném systému ohřevu.

Model bylo možno vytvořit dvěma způsoby. Jedna z variant je vytvořit matematicko-fyzikální model, který je založen na fyzikálním popisu reálné situace a jeho struktura je uvedena v kapitole 4.2. Tato metoda tvorby modelu nebyla použita vzhledem k vysokým požadavkům na tvorbu modelu a jeho výpočet. Dále by bylo nutno přesně určit polohy teplotních čidel a infračervených zářičů, které v dané době nebylo jak měřit, a zároveň byly polohy čidel i zářičů průběžně měněny v rámci vývoje výrobní linky. Navíc jsme neměli potřebu tak přesný model používat, i když daleko lépe vystihuje průběh teplot na povrchu výrobní formy. Pro naši potřebu postačoval zjednodušený parametrický model vyjádřený pomocí obrazových přenosů. Tento zjednodušený model pak tedy nezahrnuje všechny detaily šíření tepla v materiálu a přenosu tepelné energie z infračervených zářičů na černěný povrch vyhřívané výrobní formy, ale pro návrh a odzkoušení regulačního algoritmu se ukázal jako dostačující.

5.2 Struktura zjednodušeného modelu

Námi zvolený model pak popisuje vliv jednotlivých zářičů na všechna čidla a je reprezentován maticí obrazových přenosů $G(s)$. Matice $G(s)$ má rozměr $(m \times n)$, kde m je počet teplotních čidel použitelných pro regulaci a n je počet použitých infračervených zářičů.

Prvek matice $G_{ij}(s)$ pak tedy určuje odezvu i -té výstupní veličiny, která je definována jako teplota měřená i -tým termočlánkem, na vstup, který je dán tokem infračerveného záření j -tého infračerveného zářiče. Výstup modelu je pak dán rovnicí (5.1), kde je

$U(s)$ vektor transformovaných vstupních signálů o rozměru $n \times 1$,

$Y(s)$ vektor transformovaných výstupních teplot o rozměru $m \times 1$,

$G(s)$ matice obrazových přenosů použitého modelu o rozměru $m \times n$.

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) \quad (5.1)$$

Pro takovýto model je pak ustálený i -tý vstupní signál modelu $U_i(s)$ vzhledem k možnostem reálného systému, kde lze zářič pouze zapnout nebo vypnout, definován následovně

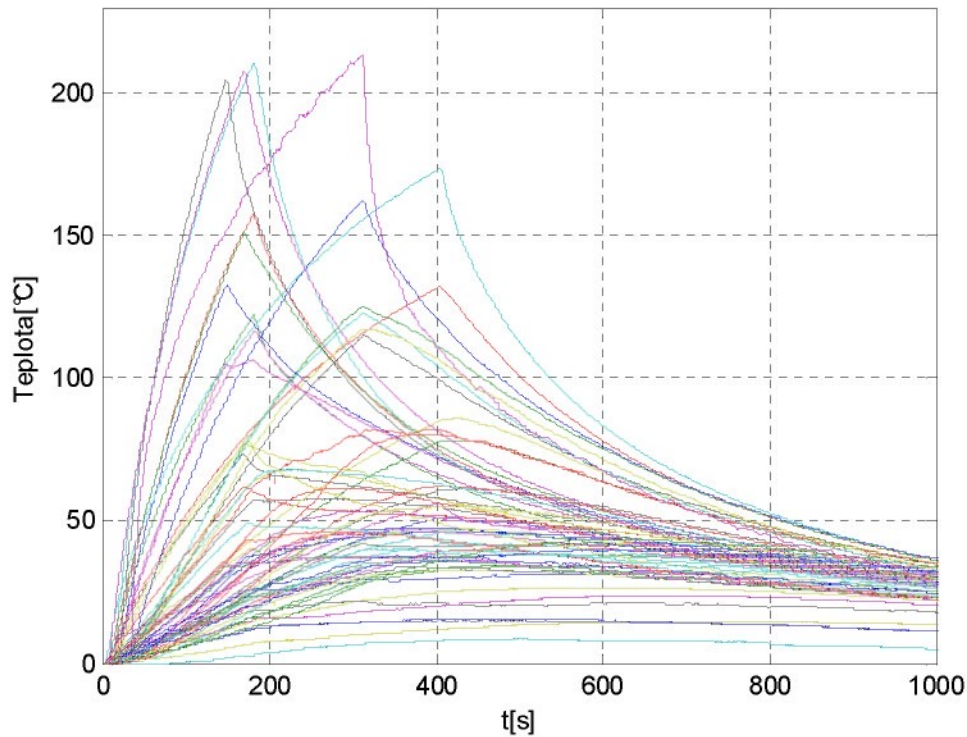
$$u_i(t) \in \{0, 1\}; i = 1, 2, \dots, m. \quad (5.2)$$

5.3 Identifikace

Pro vlastní popis tedy bylo použito modelu, který aproximuje teplotní dynamiku systému ohřevu prostřednictvím matematického lineárního časově invariantního modelu s neznámými parametry, jehož struktura je popsána v předcházející kapitole. Určení těchto neznámých parametrů je právě úkolem identifikace, která byla provedena na reálném systému ohřevu výrobní linky.

Pro identifikaci na použité výrobní formě, která má 77 nebo dokonce až 180 použitých zářičů, by bylo nutno v ideálním případě provést stejný počet identifikačních měření, tedy pro každý rozsvícený zářič jedno měření. Vzhledem k tomu, že jedno měření trvá od zapnutí zářiče po vychladnutí výrobní formy na relativně ustálenou teplotu zhruba 10 až 20 minut, by byla doba potřebná k celkové identifikaci velice dlouhá, což byl problém při nutnosti rychlého náběhu na další experimenty a zejména k omezenému množství volného času na zařízení. Je nutno brát v potaz, že zároveň s vývojem regulačního algoritmu probíhal také další vývoj samotné mechanické části zařízení. Proto byla identifikace zkrácena na 18 měřicích cyklů. V každém cyklu bylo zvoleno několik infračervených lamp, které vzájemně neovlivňují stejná čidla, respektive účinek jednotlivých lamp na stejné čidlo je pouze minimální. Takže lze říci, že jedna daná lampa působí pouze na omezenou množinu čidel a ostatní lampy identifikované ve stejném cyklu výrazně působí na jiná čidla. Takto navržená identifikační měření pak umožní naměřit potřebný počet identifikovaných dat v průběhu jediné směny. Data byla při identifikaci ukládána do souborů, ve kterých byla uložena data ze všech čidel společně s řídicími signály pro všechny lampy. Přřazení jednotlivých lamp k příslušným čidlům pak bylo zajištěno zapnutím, respektive vypnutím infračervených zářičů v různou dobu, což bylo

dobře patrné i na měřených teplotách, respektive na okamžiku zvyšování a poklesu teploty identifikovaných čidel. Zobrazená identifikační data jsou pak na následujícím obrázku.



Obr. 5.1: Data pro identifikaci posunutá do počátku.

Takto získaná data jsou pak identifikována. Pro jednotlivé obrazové přenosy zvoleného modelu $G(s)$ je pak použita struktura přenosu (5.3), která je druhého řádu s dvěma reálnými kořeny charakteristického polynomu. Struktura byla zvolena tímto způsobem, jelikož nebyl důvod předpokládat kmitavou dynamiku s komplexními kořeny.

$$G_{jk}(s) = \frac{K_{jk}}{(T_1^{jk}s + 1)(T_2^{jk}s + 1)}, \quad (5.3)$$

kde:

- K_{jk} je hledané statické zesílení obrazového přenosu $G_{jk}(s)$,
- T_1^{jk}, T_2^{jk} jsou hledané časové konstanty obrazového přenosu $G_{jk}(s)$ a
- j, k se mění v rozsahu $j, k = 1, 2, \dots, 77$.

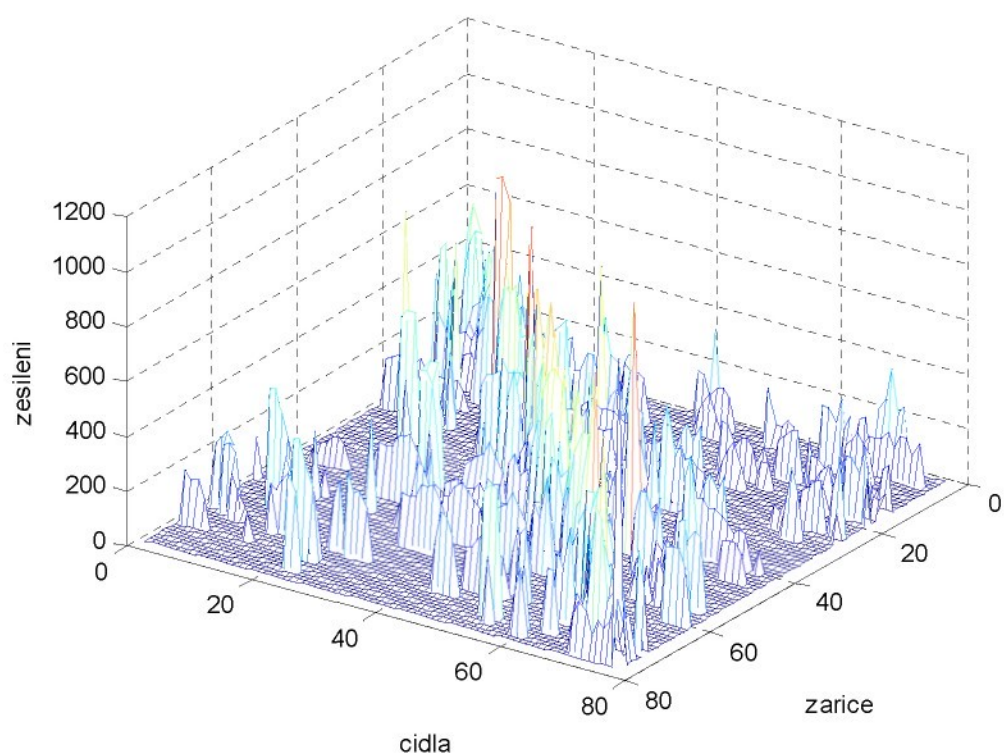
Matice konkrétních přenosů je pak získána parametrickou identifikací naměřených dat. Základní náhled na charakter soustavy si lze udělat například z matice statických zesílení. Na následujících obrázcích je pak matice zesílení zobrazena v grafické formě. Na Obr. 5.2 a Obr. 5.3 je vidět matice zesílení předtím než byla započata optimalizace rozložení teplotních čidel a poloh teplotních infračervených zářičů vůči výrobní formě a čidlům. Na obrázcích Obr. 5.4 a Obr. 5.5 jsou pak matice zesílení v grafické reprezentaci po částečné optimalizaci. Tady je

vidět, že po částečné optimalizaci rozložení čidel a zářičů došlo k **výraznému potlačení křížových vazeb, které vznikají osvětlením čidla infračervenou lampou, která není čidlem řízena**. Na obrázku Obr. 5.6 je pak vidět verifikace nalezeného modelu, který je tvořen maticí nalezených přenosů s danou strukturou. V obou případech, tedy jak pro neoptimalizovanou, tak pro částečně optimalizovanou polohu zářičů a čidel vůči výrobní formě je na obrázcích vidět, že na diagonále matice zesílení se zpravidla nacházejí nejsilnější přenosy, které jsou brány za přímé vazby mezi čidlem a infračerveným zářičem. Je však také vidět, že na prvcích mimo diagonálu se nachází množství přenosů se zesílením, které mohou vést k problémům z hlediska řízení. Toto lze odstranit buď další optimalizací nastavení zářičů a čidel nebo **úpravou přiřazení jednotlivých lamp a zářičů** a tento postup je popsán níže.

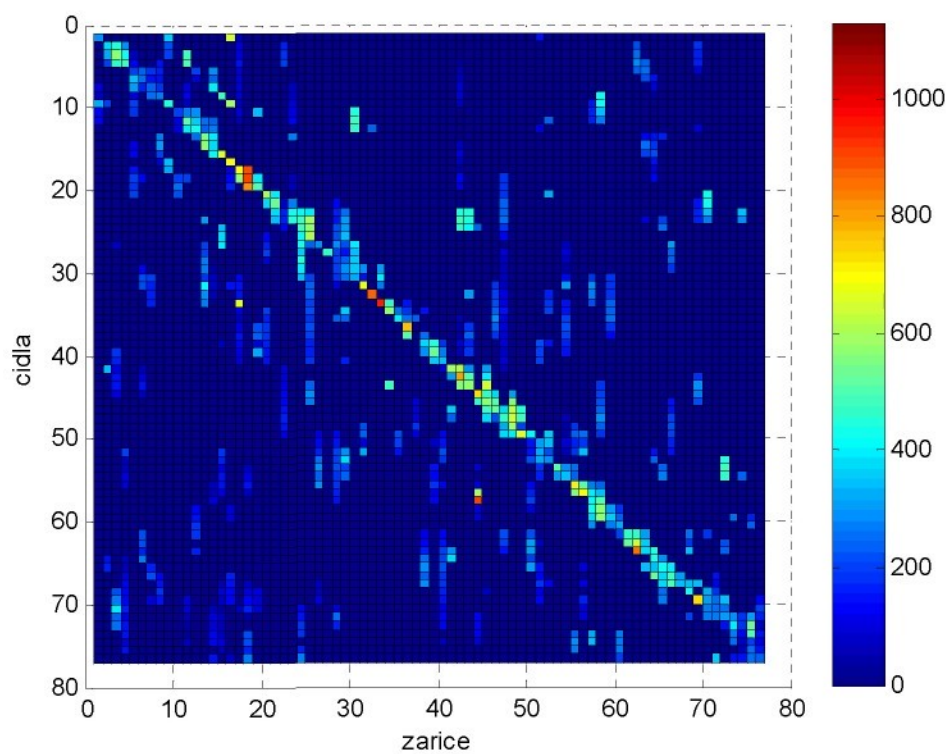
Pro parametrickou identifikaci pak bylo použito dvou metod pro získání neznámých parametrů zvolného modelu. Nejprve, v době kdy bylo třeba získat pouze několik přenosů, byl použit optimalizační algoritmus pro identifikaci parametrů obrazových přenosů, který využívá postupnou minimalizaci kvadratického kritéria v časové oblasti

$$J_2 = \int_0^r (y(t) - y_M(t))^2 dt, \quad (5.4)$$

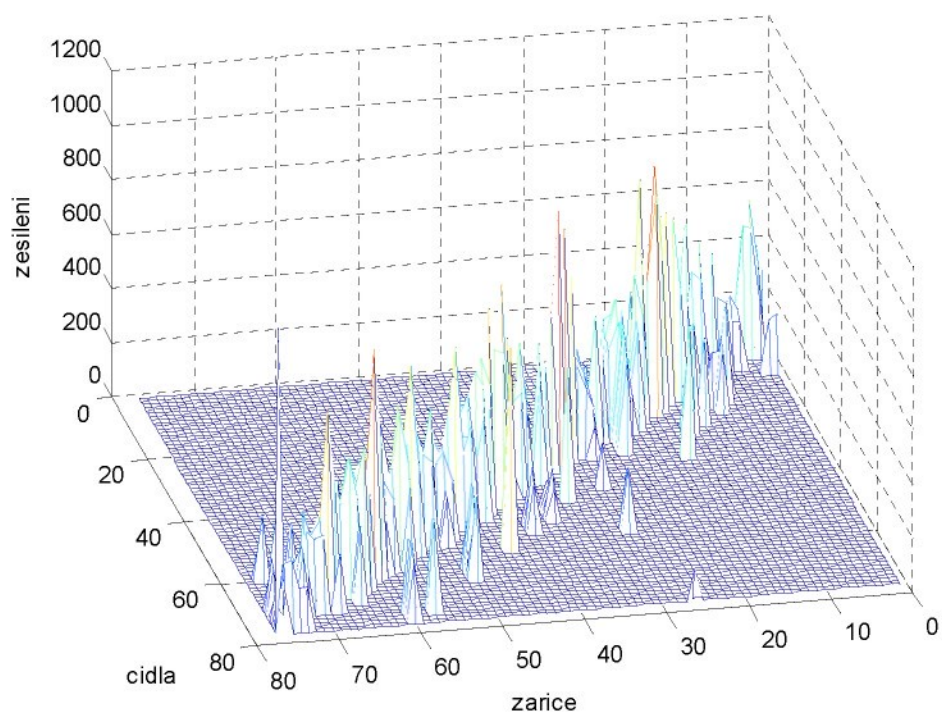
kde $y(t)$ je naměřený průběh identifikovaného signálu na reálném systému a $y_M(t)$ je průběh simulovaného modelu, pro který jsou hledány neznámé parametry. Tento způsob se ukázal jako dostatečně rychlý pro nalezení parametrů pro jednotlivé systémy, ale ve chvíli, kdy bylo potřeba identifikovat celý MIMO systém, ukázal se tento způsob jako časově velmi náročný a z hlediska přípravy výroby těžko akceptovatelný. Proto bylo použito diskrétní parametrické identifikace modelu se strukturou ARX, která získává parametry diskrétního přenosu pomocí metody nejmenších čtverců. Takto získané diskrétní přenosy jsou pak převedeny z diskrétní oblasti do spojitě časové oblasti, kde jsou reprezentovány prostřednictvím obrazových přenosů. Takto zvolený způsob identifikace pak oproti identifikaci ve spojitě oblasti uspoří zhruba 90% času.



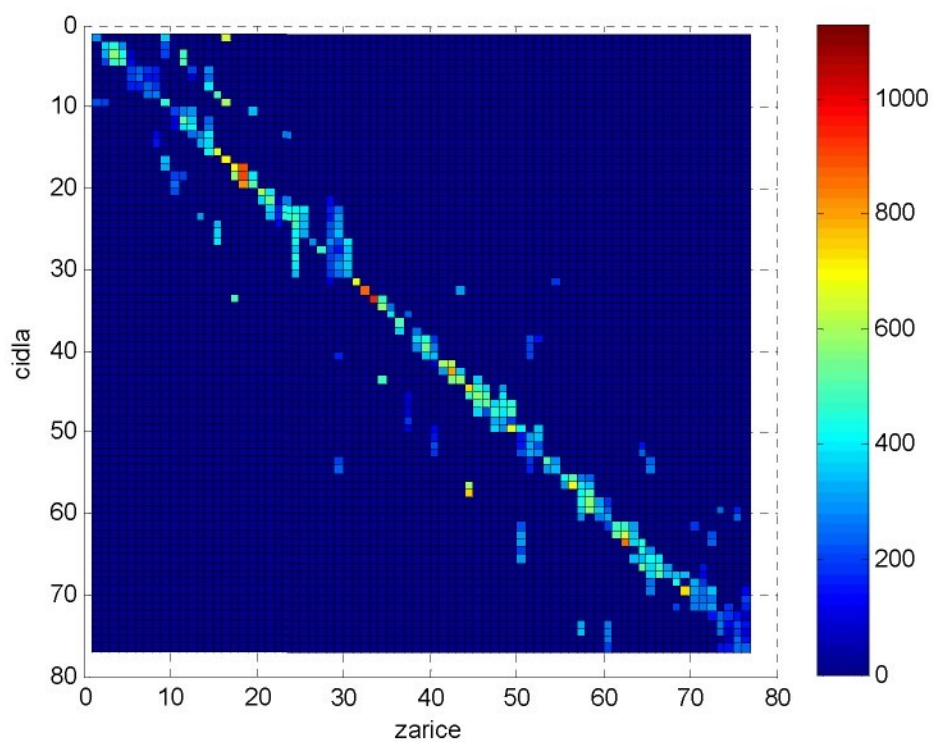
Obr. 5.2: Grafická reprezentace matice zesilení před optimalizací poloh zářičů a čidel.



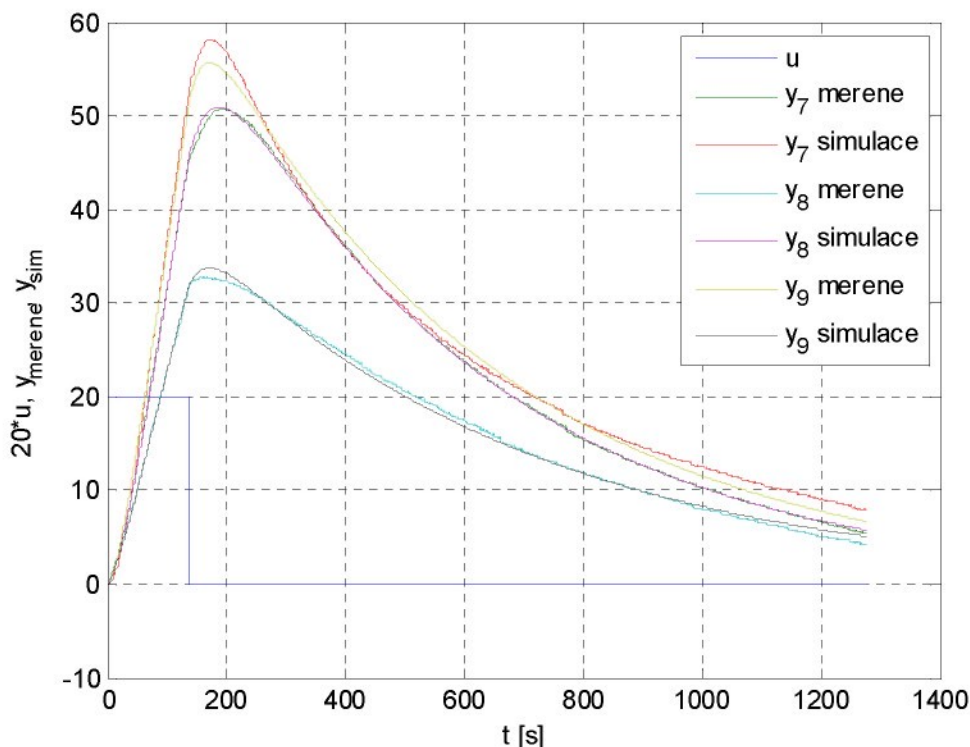
Obr. 5.3: Grafická reprezentace matice zesilení před optimalizací poloh zářičů a čidel.



Obr. 5.4: Grafická reprezentace matice zesilení po částečné optimalizaci poloh zářičů a čidel.



Obr. 5.5: Grafická reprezentace matice zesilení po částečné optimalizaci poloh zářičů a čidel.



Obr. 5.6: Porovnání dat z modelu a dat naměřených.

5.4 Přiřazení zářičů do regulační smyčky

Součástí následných optimalizačních kroků je správné přiřazení infračervených zářičů a termočlánekových snímačů teploty do jednotlivých regulačních smyček a je těžištěm dílčího cíle č.6. U takto rozsáhlého průmyslového MIMO systému, kde je navíc k dispozici pouze velice zjednodušený model, pak ale nastává otázka, jak tento krok správně vyřešit. Pro tento účel bylo použito srovnání hned několik metod pro spárování vstupních a výstupních veličin, tedy zářiče a k němu odpovídajícího řídicího čidla. Byly aplikovány metody přiřazení:

1. Na základě maximálního statického zesílení
2. Podle matice RGA (**R**elative **G**ain **A**rray)
3. Podle nejrychlejšího čidla

5.4.1 Přiřazení čidel a zářičům podle maximálního statického zesílení

V první řadě bylo použito metody, ve které je pro každý teplotní snímač vybrán infračervený zářič tak, aby k němu přiřazené teplotní čidlo mělo nejrychlejší odezvu respektive odezvu s největším zesílením. Tímto způsobem přiřazení čidel a infračervených zářičů pak dostaneme strukturu řídicího obvodu takovou, že po přečíslování čidel jsou nejsilnější přenosy, respektive přenosy s nejvyšším statickým zesílením, na diagonále

přenosové matice. Takto přeuspořádaná matice byla již zobrazena na Obr. 5.2 až Obr. 5.5. Takto zvolené dvojice čidel a zářičů pak částečně zaručují možnost dosáhnout žádaných hodnot teplot na celém povrchu výrobní formy. Problém nastává pouze v případech, kde diagonála není dostatečně silná a dochází k ovlivňování některých čidel i ostatními zářiči, jak je popsáno v textu výše. To pak vede k porušení homogenity teplotního pole na rubové straně výrobní formy.

Toto lze pak dále řešit například další optimalizací rozložení infračervených zářičů vůči vyhřívané formě. Z tohoto hlediska je vidět, že ani systém na Obr. 5.4 a Obr. 5.5 není ještě zcela optimální. Dále by bylo možné toto řešit pomocí chlazení daných míst, to je ale z konstrukčního hlediska velice obtížné a tedy nepoužitelné. Nastalé problémy, které mají za následek porušení požadované homogenity teplotního pole vzhledem k neoptimálnímu uspořádání, pak lze řešit prostřednictvím přiřazení více zářičů jednomu řídicímu čidlu. Tato metoda přiřazení prvků regulační smyčky je pak diskutována v dalším textu na konci této kapitoly.

5.4.2 Přiřazení čidel k zářičům podle RGA

Jako druhý přístup byl zvolen přístup prostřednictvím výpočtu matice RGA (Relative Gain Array). Funkce RGA je pak dána jako

$$RGA(\mathbf{G}) = \Lambda(\mathbf{G}) \triangleq \mathbf{G} \times (\mathbf{G}^{-1})^T, \quad (5.5)$$

kde $\mathbf{G}$ je nesingulární komplexní čtvercová matice a $\times$ je matematická operace násobení matic po prvcích. Funkce RGA nám pak umožní tedy spíše doporučit, v případě že matice $\mathbf{G}$ je matice statických zesílení zjednodušeného modelu, spárovat dvojice čidlo a infračervený zářič. Podle pravidel v [5] pak můžeme provést párování vstupů a výstupů. Ovšem to může být pro takto rozsáhlý systém poměrně komplikované a nepřehledné. Proto můžeme využít iterativní vlastnost RGA funkce, která zjednodušuje párování rozsáhlých MIMO systému, tedy

$$\Lambda^\infty(\mathbf{G}) \triangleq \lim_{k \rightarrow \infty} \Lambda^k(\mathbf{G}), \quad (5.6)$$

a zároveň platí

$$\Lambda^2(\mathbf{G}) = \Lambda(\Lambda(\mathbf{G})). \quad (5.7)$$

Pro provedení párování pak tedy postačuje iterovat RGA v několika krocích, kdy se na pozicích prvků vhodných k párování vstupů a výstupů objeví prvek blížíící se jedničce

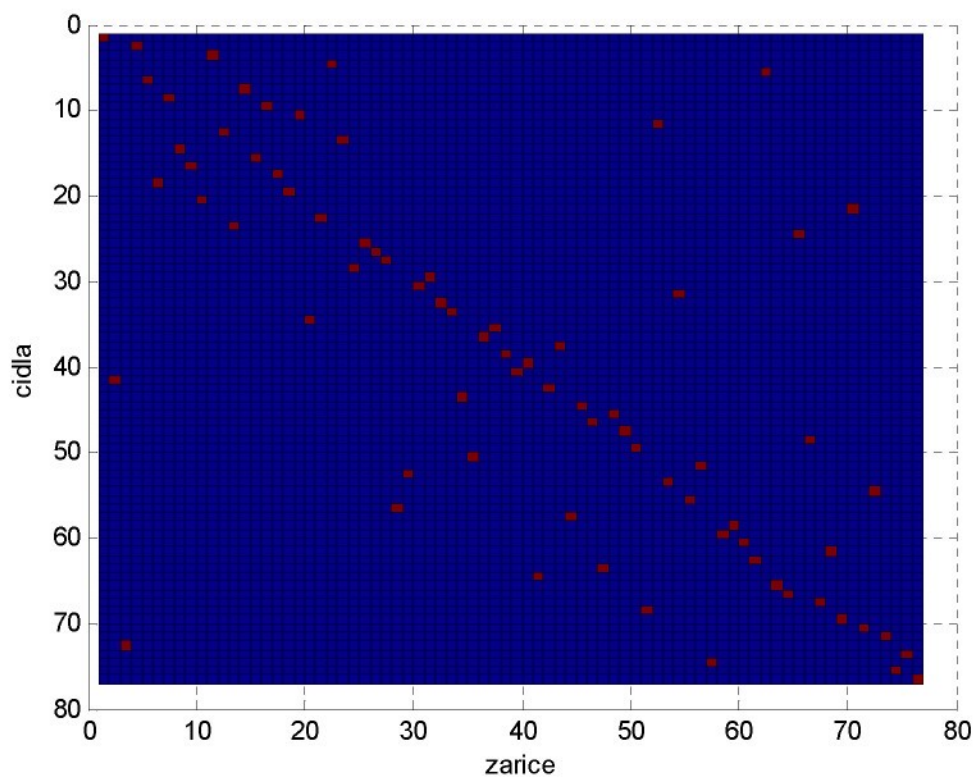
$$g_{ij}(\Lambda^\infty(\mathbf{G})) \rightarrow 1 \quad (5.8)$$

a na ostatních pozicích se prvky blíží k nule

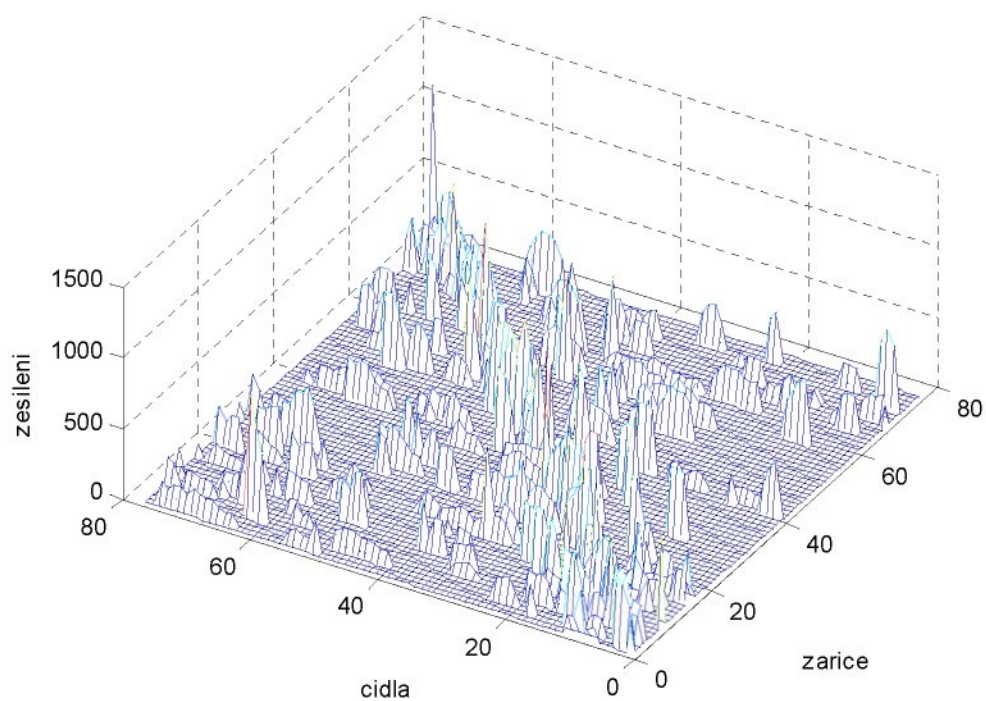
$$g_{ij}(\Lambda^\infty(\mathbf{G})) \rightarrow 0. \quad (5.9)$$

Pro výpočet matic RGA a jejich iterovaný výpočet je použit model získaný identifikací, který byl přeuspořádán podle toho, aby byly na diagonále přenosy s nejsilnějším statickým zesílením identifikovaného modelu, jak bylo popsáno v kapitole 5.3. Matice zesílení, která vstupuje do opakovaného výpočtu RGA je pak na Obr. 5.3 respektive Obr. 5.5. Iterovaným výpočtem RGA (iterace proběhla 10 krát) pak byla vypočítána matice, která je zobrazena na Obr. 5.7 respektive Obr. 5.10 a podle které je možno provést přiřazení. Přiřazení lze provést tak, že je-li na prvku Λ^n_{ij} prvek rovný jedné, pak lze přiřadit j-tý zářič k i-tému čidlu. Je zde vidět, že v průběhu optimalizace polohy zářičů a čidel vůči povrchu výrobní formy se zvětšuje vhodnost přiřazení podle nejsilnějšího zesílení, tedy nejsilnější vazby mezi zářičem a čidlem. Je to vidět například na matici Λ^n , která postupně získává diagonální charakter. Můžeme tedy pak říci, že metoda přiřazením pomocí matice RGA a podle nejsilnějšího zesílení budou po optimalizaci poloh zářičů a čidel na výrobní formě rovnocenné.

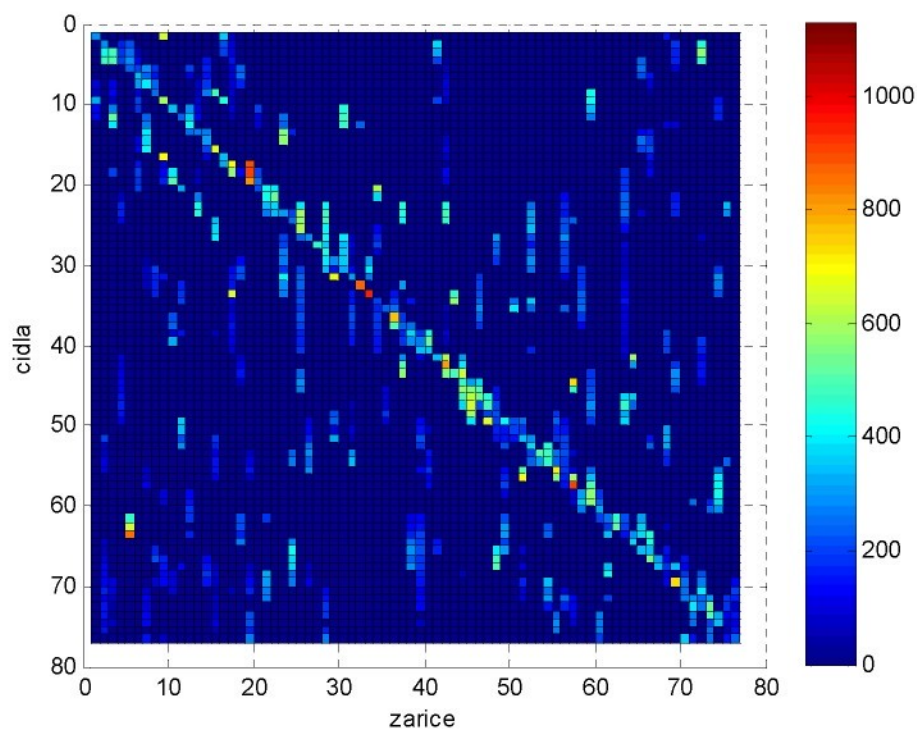
Na Obr. 5.8, Obr. 5.9, Obr. 5.11 a Obr. 5.12 je pak matice zesílení přeuspořádána tak, aby byla její Λ^n diagonální, aby bylo možno systém řídit stejným diagonálním regulátorem. Tady je pak vidět, že tato rozložení nejsou stejná a každý přístup přiřazení dvojic zářič-čidlo do regulační smyčky má jiný výsledek. Tento rozdíl se však postupnou optimalizací polohy zářičů a čidel na výrobní formě stále zmenšuje.



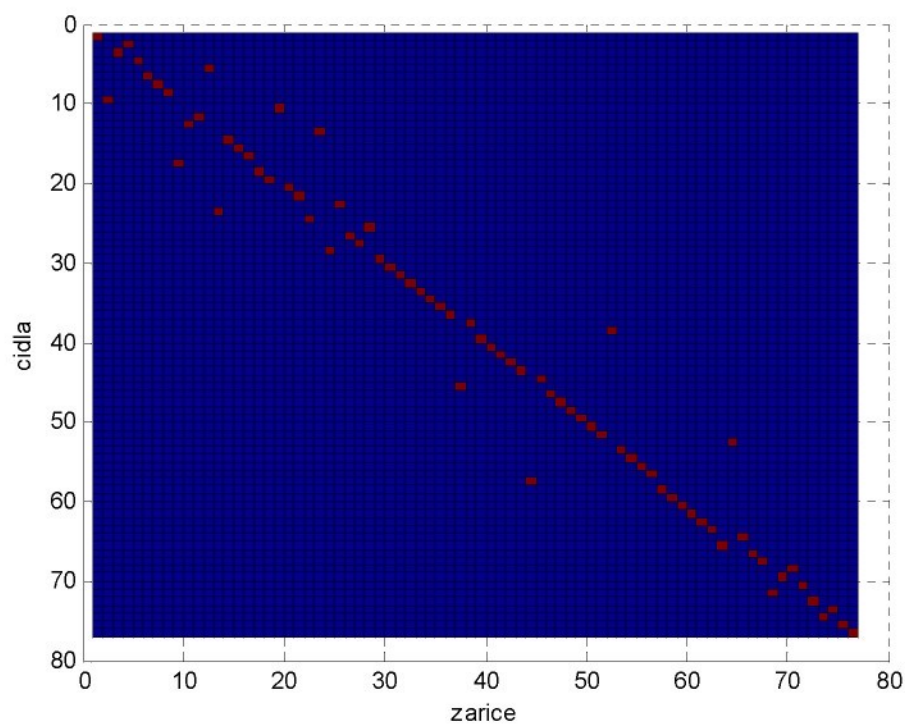
Obr. 5.7: Matice RGA pro neoptimální nastavení čidel a infračervených zářičů.



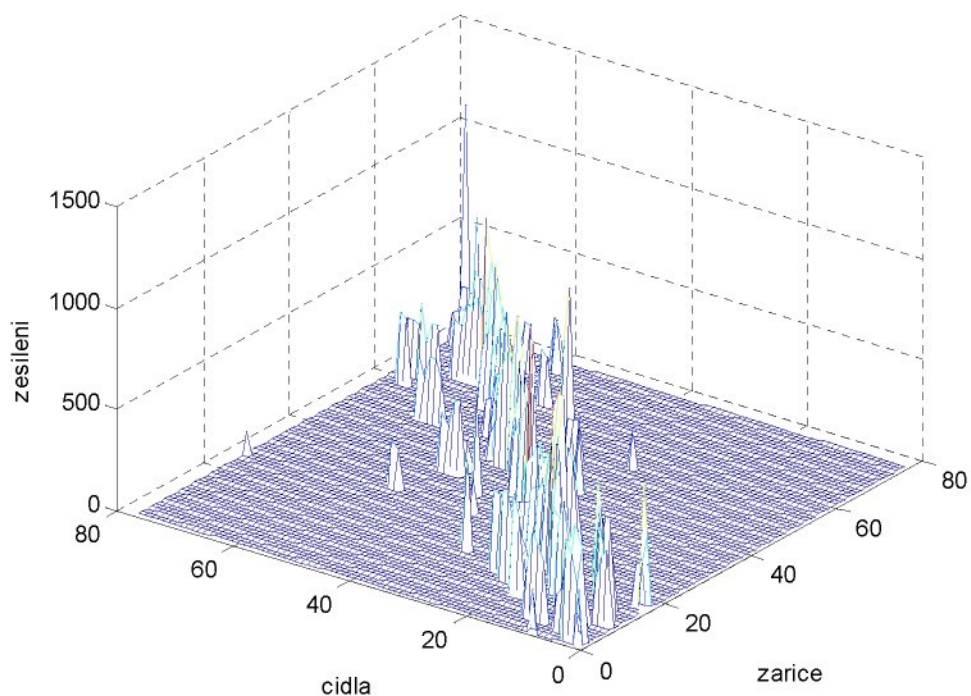
**Obr. 5.8: Grafická reprezentace matice zesílení pro neoptimální rozložení čidel a zářičů.
Prvky matice jsou přeuspořádány podle RGA.**



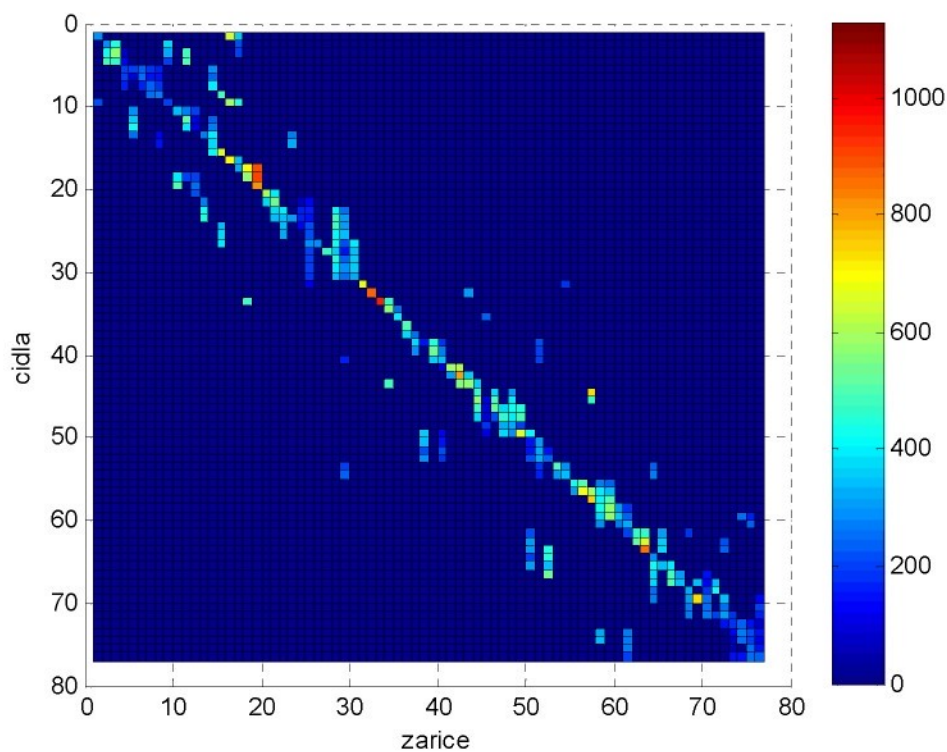
Obr. 5.9: Grafická reprezentace matice zesílení pro neoptimální rozložení čidel a zářičů.
Prvky matice jsou přeuspořádány podle RGA.



Obr. 5.10: Matice RGA pro částečně optimalizované nastavení čidel a infračervených zářičů.



Obr. 5.11: Grafická reprezentace matice zesilení pro optimalizované rozložení čidel a zářičů. Prvky matice jsou přeuspořádány podle RGA.

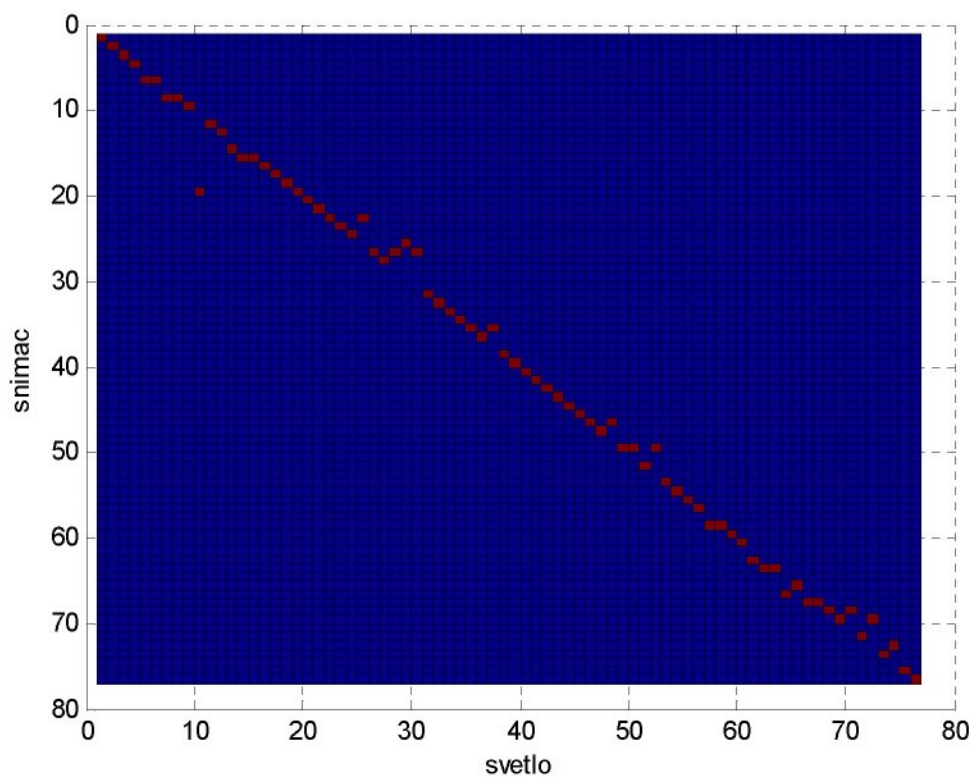


Obr. 5.12: Grafická reprezentace matice zesilení pro částečně optimalizované rozložení čidel a zářičů. Prvky matice jsou přeuspořádány podle RGA.

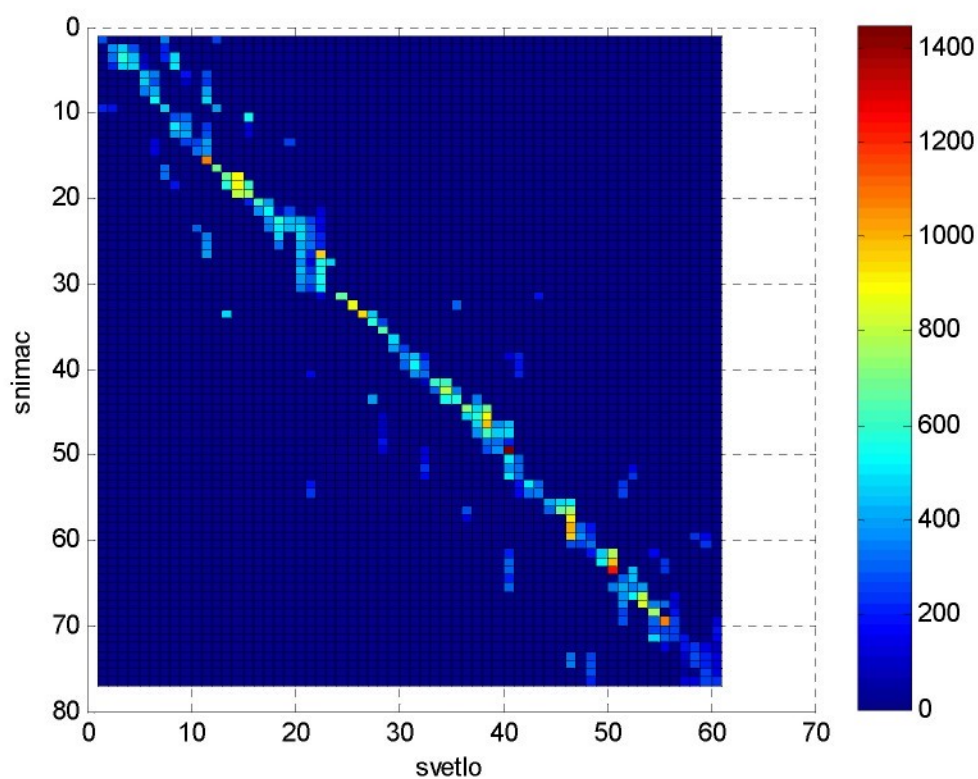
5.4.3 Přiřazení čidel a zářičů podle maximálního statického zesílení II

Jako třetí přístup byla použita metoda, která upravuje přiřazení čidla k danému světlu podle maximálního statického zesílení (popsána na začátku této kapitoly). Tato metoda potom umožňuje, přiřadit jednomu čidlu více zářičů a dosáhnout tak potlačení zejména přehřátých míst, ovšem je nutno říci že k tomuto potlačení dochází za cenu možného zhoršení kvality homogenity pole. Ovšem je to metoda univerzální a funguje i pro neoptimální rozložení zářičů. S postupnou optimalizací rozložení infračervených zářičů a teplotních čidel vůči výrobní formě dochází postupně také ke zlepšení homogenity a „řiditelnosti“ teplotního pole.

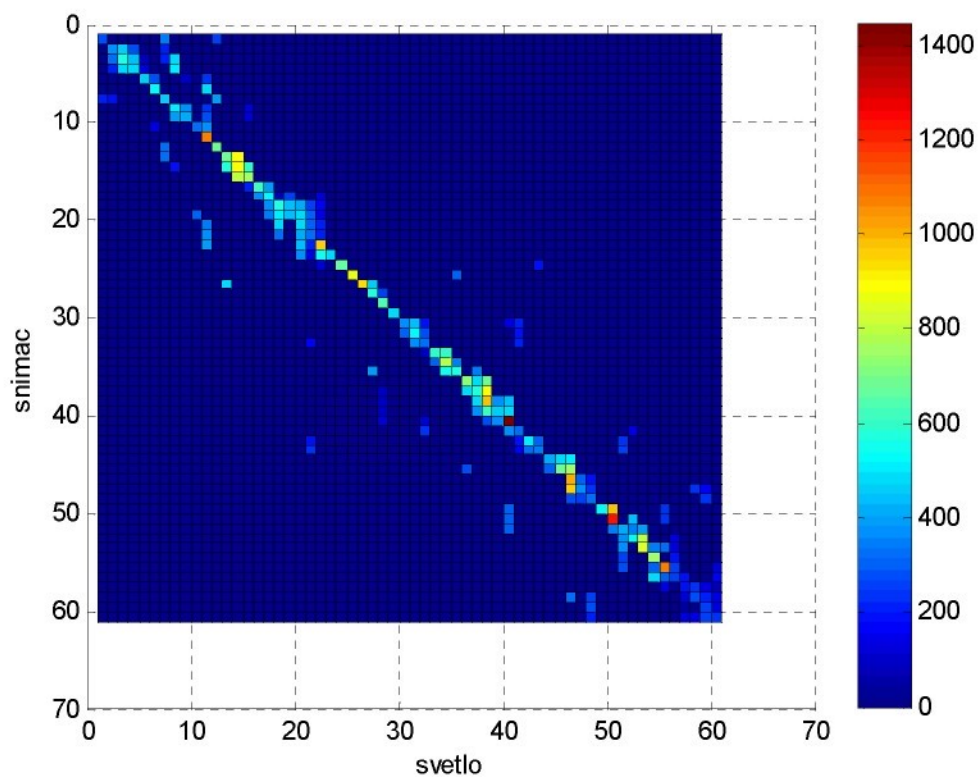
Tato metoda vychází s jednoduchého principu, který má snahu každému zářiči přiřadit pro řízení čidlo, které daný infračervený zářič nejvíce ovlivňuje. Postup je tedy takový, že při rozsvícení jednoho daného zářiče je hledáno takové teplotní čidlo, které se zahřeje nejvíce. Tato dvojice je pak použita pro regulaci. V případě, že je nalezeno více zářičů, které mají nejsilnější vliv na dané čidlo, pak jsou všechny tyto zářiče řízeny podle tohoto čidla. Výsledkem takového postupu je pak takzvaná matice přiřazení, která je zobrazena na Obr. 5.13. Ta definuje jedničkou (v grafickém zobrazení červeným bodem), dané dvojice zářič-čidlo. Tímto postupem pak dostaneme matici přenosů takovou, jenž má nižší počet sloupců respektive infračervených zářičů. Některé za zářičů jsou pak tedy „znásobeny“ a jejich přenosy na jednotlivá čidla se pak sčítají (dojde k sečtení daných sloupců). Takováto matice je pak graficky prezentována podle matice statických zesílení na Obr. 5.14. Tato matice nám pak prezentuje vliv infračervených zářičů na všechna použitá čidla. Na Obr. 5.15 je pak tato matice ještě redukována o řádky odpovídající čidlům, která nejsou přiřazena do žádné regulační smyčky. Matice je uspořádána tak, aby bylo možno systém řídit diagonální maticí regulátorů. Je tedy vidět, že pro takto sestavené regulační smyčky se jejich počet snížil na šedesát jedna, tedy šestnáct zářičů bylo sdruženo s jinými zářiči do jedné regulační smyčky. Pro zajímavost byla ještě pro takto zredukovanou matici přenosu spočítána matice přiřazení pomocí opakovaného výpočtu RGA, která je pak na Obr. 5.16.



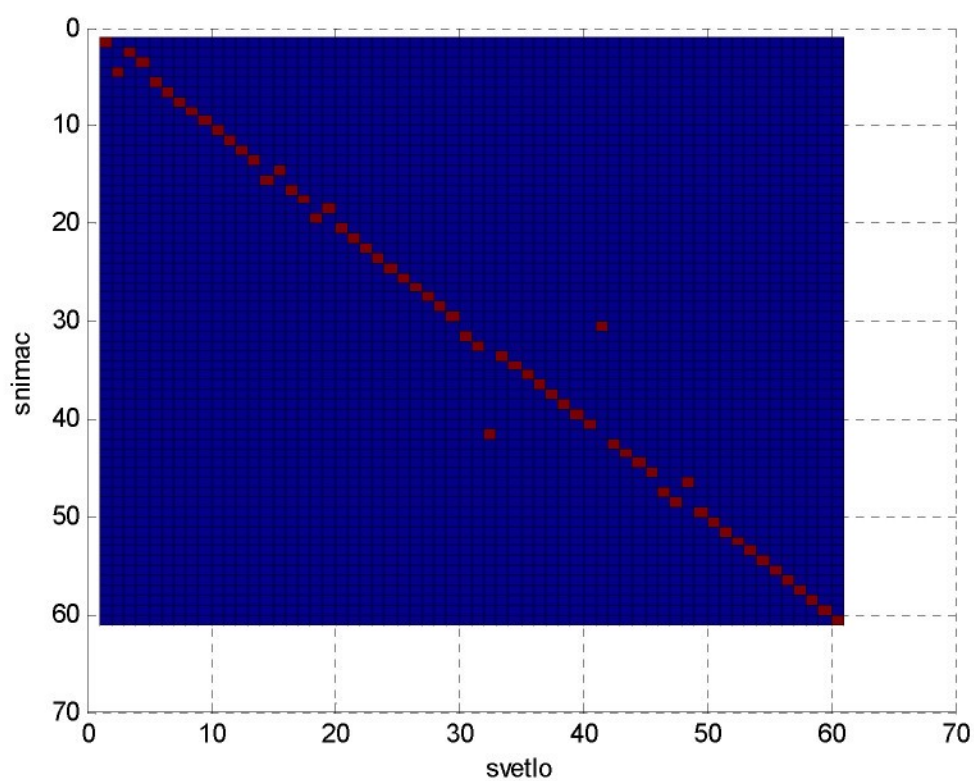
Obr. 5.13: Matice přiřazení podle statického zesílení.



Obr. 5.14: Matice statických zesílení pro přiřazení podle statického zesílení (všechna čidla).



Obr. 5.15: Matice statických zesílení pro přiřazení podle statického zesílení (matice zredukováno o neřízená čidla).



Obr. 5.16: Matice RGA pro přiřazení podle statického zesílení.

Pro praktické aplikace je třeba mít na zřeteli, že tyto metody pracují se zesílením, které je pouze odhadnuto z identifikačního měření, při kterém nebylo dosaženo ustálených stavů. Nejistota v odhadech zesílení zde představuje jisté nebezpečí, že dané třídění bude zatíženo jistou chybou, která je způsobena nepřesným popisem dynamiky ve zjednodušeném modelu, který je pro tuto problematiku používán. Proto by bylo dobré nepracovat pouze se samotným zesílením, ale používat spíše odhady říditelných „směrů“. Ty můžeme získat pomocí singulárního rozkladu matice. Mějme tedy matici $\mathbf{G}$, jenž je maticí zesílení námi zvoleného a identifikovaného modelu. Pro tuto matici pak můžeme provést následující singulární rozklad

$$\mathbf{G} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^H, \quad (5.10)$$

kde $\mathbf{G}$ je matice zesílení modelu soustavy,

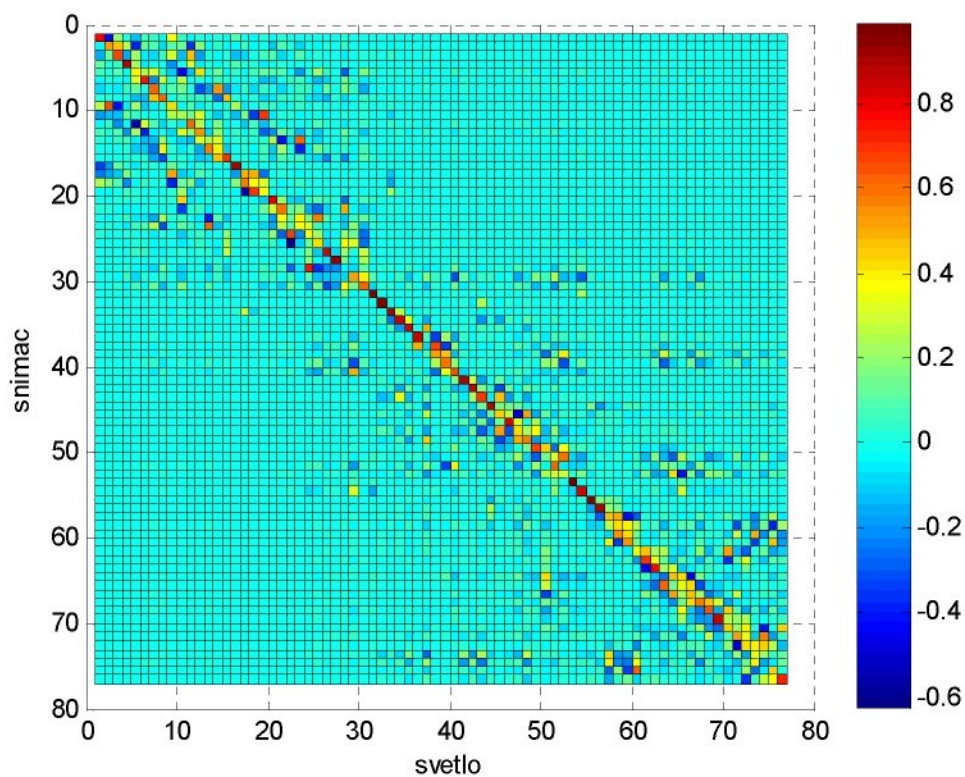
$\mathbf{U}$ je unitární matice výstupních směrů,

$\mathbf{V}$ je unitární matice vstupních směrů a

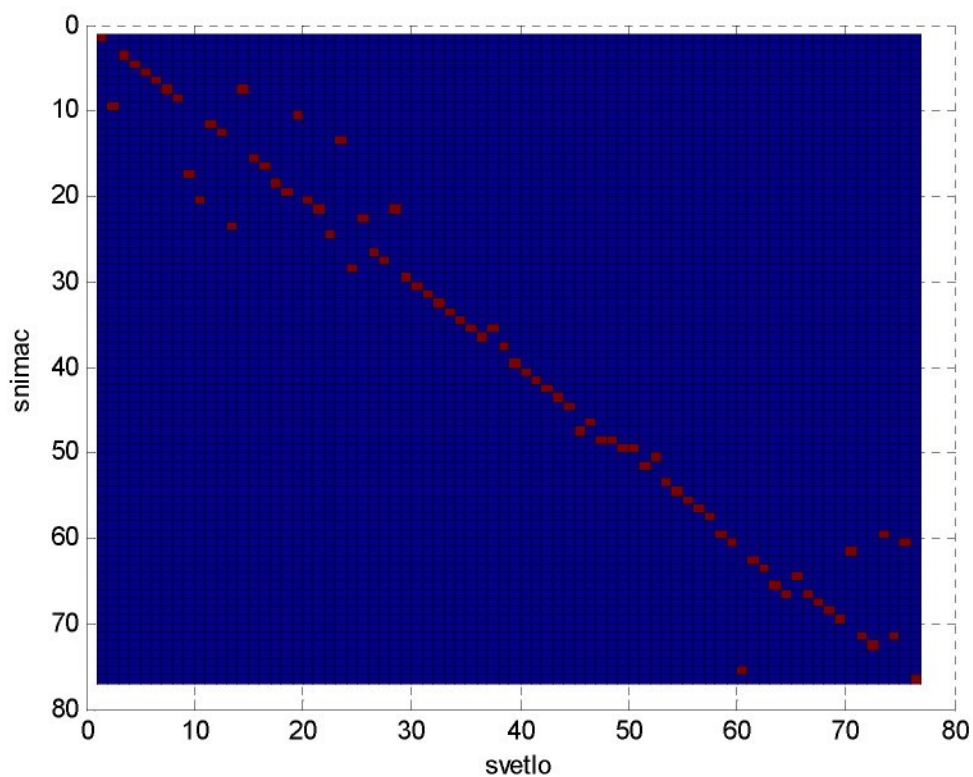
$\mathbf{S}$ je matice se singulárními čísly na hlavní diagonále. Nyní můžeme provést vyloučení zesílení v jednotlivých vstupních a výstupních směrech. Mějme tedy matici

$$\mathbf{G}_{UV} = \mathbf{U}\mathbf{V}^H, \quad (5.11)$$

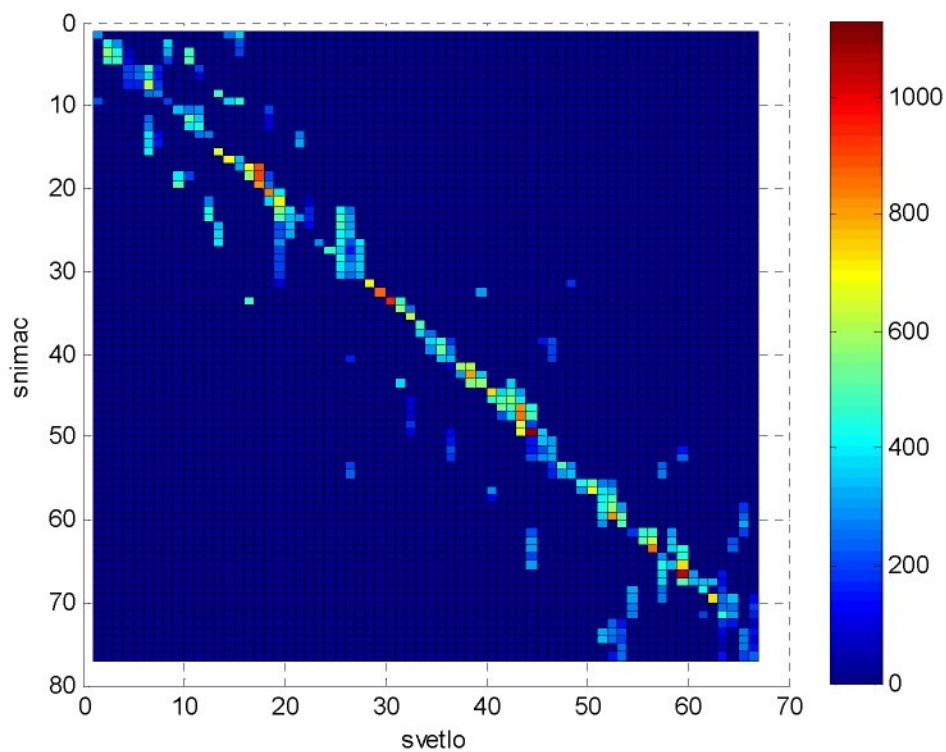
kteřá vznikne roznásobením matic levých a pravých vektorů respektive vstupních a výstupních směrů. Tato matice pak odpovídá matici statických zesílení, která je oproštěna od zesílení v daných směrech a je dána pouze těmito směry. Tato matice je pak graficky prezentována na Obr. 5.17. Na takto upravenou matici pak aplikujeme stejný postup jako v předchozím případě, tedy budeme prohledávat jednotlivé sloupce matice $\mathbf{G}_{UV}$ a podle nejsilnějšího zesílení pak určíme přiřazení daného infračerveného zářiče s teplotním čidlem do regulační smyčky. Daná matice přiřazení je pak vidět na Obr. 5.18. Je zde opět vidět, že v některých případech je více zářičů přiřazeno k řízení od stejného čidla. Touto metodou se tedy dostaneme ke snížení počtu regulačních smyček na počet šedesát sedm. Statické zesílení takto zredukovaného systému je pak vidět na Obr. 5.19 a na Obr. 5.20. Pro úplnost byl ještě proveden iterovaný výpočet RGA matice, která je pak zobrazena na Obr. 5.21.



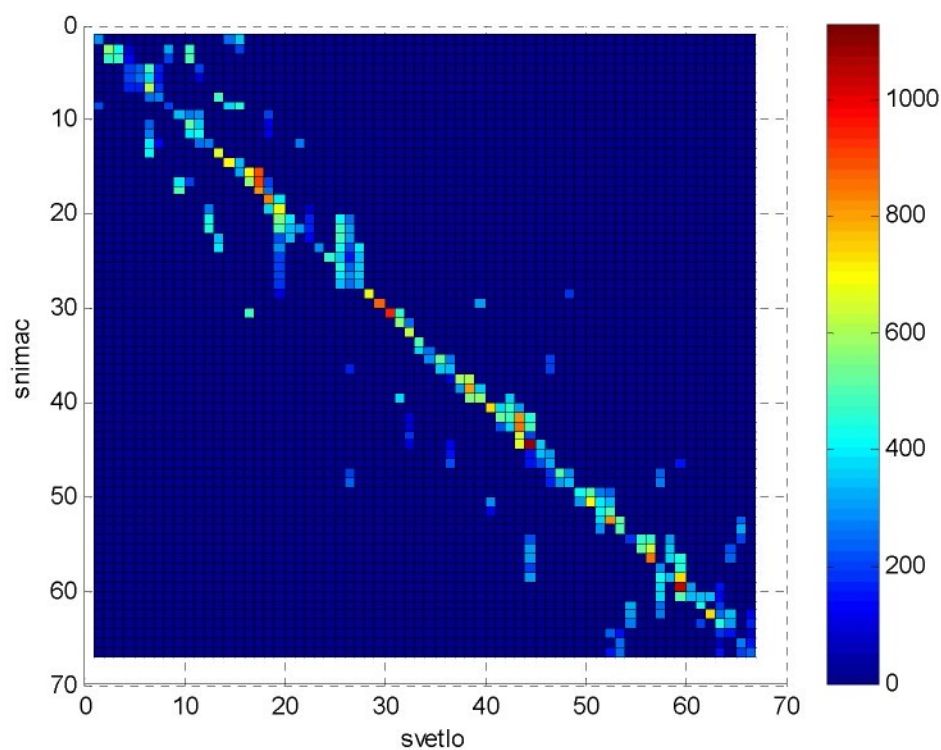
Obr. 5.17: Grafická prezentace matice G_{UV} .



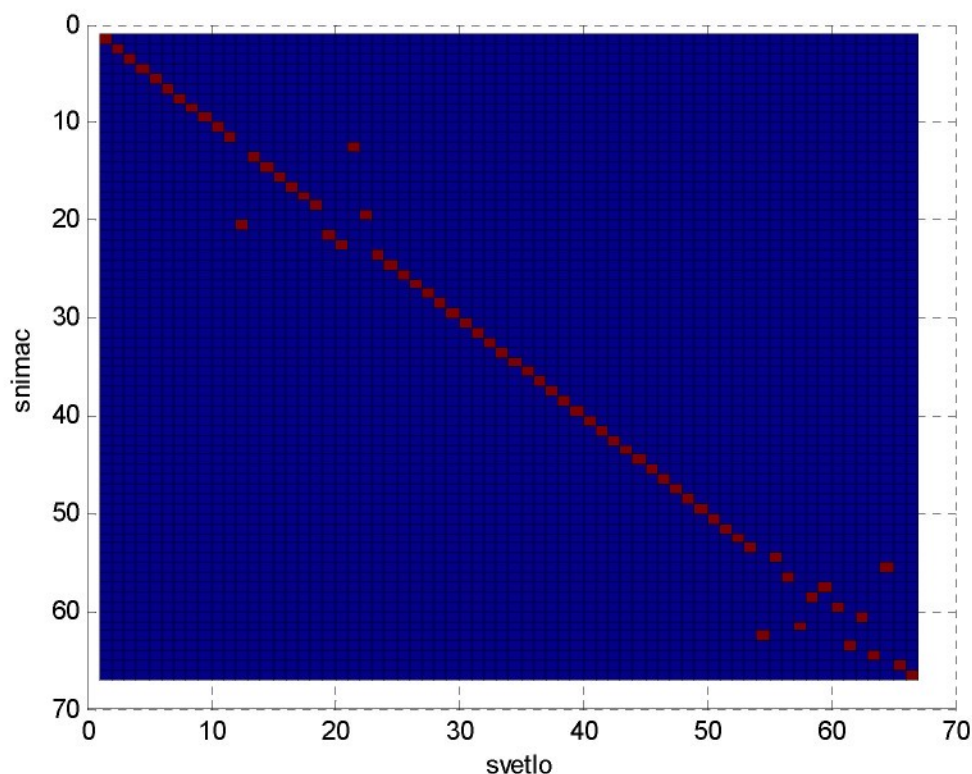
Obr. 5.18: Matice přiřazení sestavená podle SVD rozkladu.



Obr. 5.19: Matice statických zesílení pro přiřazení podle SVD rozkladu (pro všechna čidla).



Obr. 5.20: Matice statických zesílení pro přiřazení podle SVD rozkladu (Matice zredukováno o neřízená čidla).



Obr. 5.21: Matice RGA pro přiřazení podle SVD rozkladu.

5.4.4 Přiřazení čidel k zářičům podle nejrychlejšího čidla

Na reálném případě přímo v provozu bylo nejprve prováděno přiřazení zářičů vůči čidlům pomocí prvního respektive třetího způsobu. Ten se ukázal jako vhodný právě proto, že v podstatě není potřeba provádět žádnou zdlouhavou identifikaci. Po odzkoušení se ze začátku optimalizace ukázala jako nejrychlejší a bylo možno tento způsob „zhruba“ provést bez potřeby kompletní identifikace. Problémem ovšem bylo, že docházelo k lokálním přehřevům a teplotní pole nedosahovalo dostatečné kvality. Protože bylo nutno toto přiřazení ještě v průběhu výroby zkušebních kusů doladit, bylo přistoupeno k pokusům o přiřazení pomocí SVD rozkladu matice přenosů. Toto se ukázalo jako velice nadějně, ovšem v postupu optimalizace rozložení zářičů a čidel vůči výrobní formě se přiřazení regulačních smyček podle samotného zesílení, respektive podle rychlosti náběhu teploty na daném čidle, ukázalo jako dostatečné. Důvodem k tomu byla skutečnost, že při dostatečné optimalizaci rozložení čidel a infračervených zářičů vůči výrobní formě, která je prováděna spoluprací dodavatele s firmou LENAM, je dosahováno prakticky totožných výsledků.

Zde je nutno krátce poznamenat, že firmou LENAM je dodáváno prvotní nastavení infračervených zářičů a čidel vůči výrobní formě. Následně je ještě nezbytně nutno provést volbu struktury regulačního obvodu a volbu regulačního algoritmu. Tímto problémem se pak zabývá tato kapitola a kapitola 6.

Nakonec ovšem bylo přistoupeno ještě k další úpravě metodiky, což bylo umožněno právě zlepšováním prvotního nastavení zářičů. Tyto úpravy pak vznikly z důvodů rychlejšího zavádění nového sortimentu do výroby, kdy bylo danému zářiči přiřazeno nejrychleji se ohřívající čidlo. Tato metoda je jakousi obměnou metod, které jsou zde popsány a ukázala se jako nejrychlejší vzhledem k tomu, že není třeba čekat na ustálení teploty nebo provádět zdlouhavou identifikaci měření.

V současné době ovšem dochází k dalšímu vývoji stroje v rámci projektu MPO. Zde by měla být vytvořena metoda, která provede přiřazení automaticky bez lidského zásahu a to včetně nastavení parametrů regulátorů a optimalizace finálního výrobku.

5.5 Ověření podmínky říditelnosti a dosažitelnosti

V této kapitole budou krátce ověřeny podmínky dosažitelnosti a říditelnosti identifikovaného systému. Pro ověření byly použity pouze dva poslední přístupy k párování regulačních smyček a to ty, které redukuje jejich počet. Tento výběr byl proveden hlavně proto, protože tyto dvě metody jsou použity pro párování na reálném výrobním zařízení. Budeme se zde zabývat pouze dvěma podmínkami, a to zaprvé dosažitelností ustálených stavů. Tato podmínka byla definována v kapitole 4.5 a zabývá se ustálenou hodnotou akční veličiny vzhledem k ustálenému stavu vektoru výstupních veličin, respektive výstupních teplot výrobní formy, která je daným modelem reprezentována. Dále se pak budeme zabývat koeficientem podmíněnosti soustavy, který nám může napovědět něco o „říditelnosti“ modelovaného systému.

Nejdříve se tedy budeme zabývat koeficientem podmíněnosti soustavy. Samotný koeficient podmíněnosti je definován podílem největšího a nejmenšího singulárního čísla matice $\mathbf{A}$. Je tedy dán vztahem

$$\gamma = \frac{\overline{\sigma}(\mathbf{A})}{\underline{\sigma}(\mathbf{A})}. \quad (5.12)$$

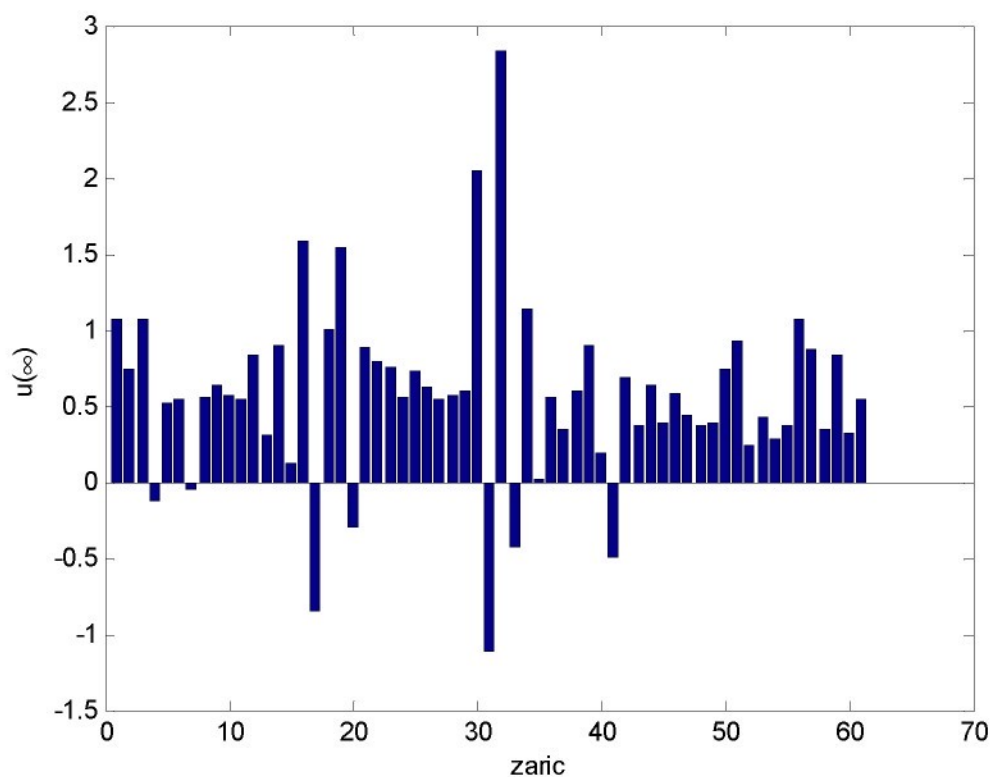
Potom v případě, když koeficient podmíněnosti vyjde veliký, dají se obecně předpokládat fundamentální problémy s regulací. Hodnota tohoto koeficient zejména vypovídá o problémech, které mohou nastat ve spojitosti s neurčitostmi, které mohou na soustavu působit. Tento koeficient předpovídá hlavně velkou citlivost systému na tyto neurčitosti. Ovšem pokud

je vysoká hodnota γ způsobena velikostí maximálního singulárního čísla a ne malou hodnotou minimálního singulárního čísla, nemusí nutně tento problém nastat. V našem případě pak koeficient podmíněnosti vychází poměrně veliký, a to jak pro případ řízení podle největšího zesílení, tak pro případ volby regulačních smyček podle SVD rozkladu. Koeficient podmíněnosti pak vychází v řádech tisíců, tedy $\gamma \approx 10^3$. Je nutno si ovšem uvědomit, že největší singulární číslo vychází v řádu desetitisíců, takže tato skutečnost nemusí nutně znamenat nějaký kritický problém.

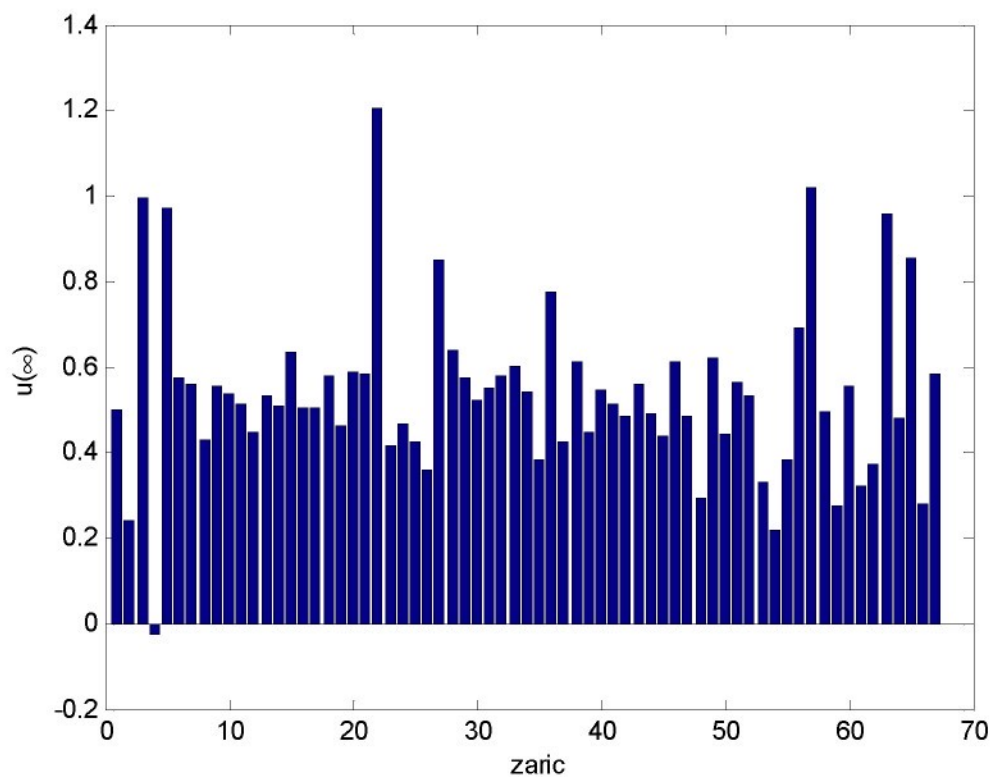
Dále je zde ověřena podmínka dosažitelnosti ustálených stavů, která je definována v kapitole 4.5 a je popsána vztahy (4.21) a (4.22). Podle těchto vztahů pak lze spočítat akční zásah, který bude nutno generovat pro udržení požadované teploty, která bude v daném případě předpokládána na hladině 200°C. Tato teplota je předpokládána pro zpracování práškového materiálu. Hodnoty akčního zásahu vypočtené podle vztahu (4.21) jsou zobrazeny na Obr. 5.22, pro způsob přiřazení podle největšího zesílení a na Obr. 5.23, pro způsob přiřazení podle SVD rozkladu matice přenosů. Jak je vidět na těchto obrázcích, hodnota akční veličiny pro první případ značně převyšuje maximální hodnotu akční veličiny, která je rovna jedné a má také požadavek na pokles akční veličiny pod nulovou hranici, což je z konstrukčního hlediska nemožné. V druhém případě už jsou hodnoty akční veličiny přijatelnější, tedy z daných hranic přesahují relativně málo. Pro takto nastavené akční veličiny je pak předpokládané hodnoty výstupní veličiny respektive teploty možno vidět na Obr. 5.24 pouze pro čidla, která jsou zapojena do regulační smyčky a pak na Obr. 5.25 pro všechna čidla výrobní formy. Tyto hodnoty jsou vypočítány pro hodnoty akční veličiny, které byly vypočítány a omezeny v rozsahu (4.22).

Jak je vidět na Obr. 5.24, tak vzhledem k tomu, že nebylo možno dosáhnout všech vypočítaných hodnot vektoru akčních veličin, je teplotní pole poněkud nevyrovnané, a dochází na něm k výkyvům teploty. Jak je pak vidět na Obr. 5.25, nežádoucí výchylky teplot jsou pak na celé ploše výrobní formy. Je nutno ale pamatovat na to, že model je pouze přibližný a byl pro daný účel značně zjednodušen a je tedy nutno dané výsledky dále verifikovat na reálném vyhřívacím zařízení, kde se teprve ukáže konečná kvalita teplotního pole. Kvalita teplotního pole, které je výsledkem takového přiřazení teplotních čidel a infračervených zářičů do regulačního cyklu, je pak diskutována v kapitole 7. Lze ovšem říci, že obě tyto metody jsou použitelné na reálném regulačním systému, a byly zde také ověřeny při reálném řešení tvorby regulačních smyček. Metoda využívající SVD rozklad matice statického zesílení přenosů je použitelná i s nižším stupněm optimalizace rozložení teplotních

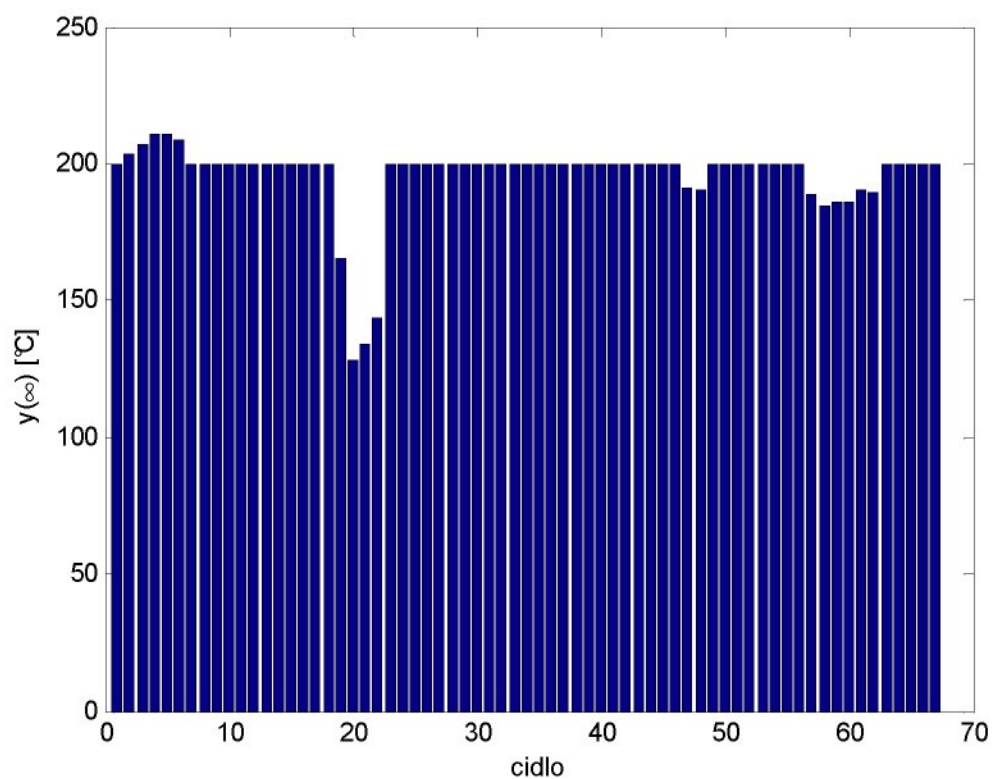
čidel a infračervených zářičů. Metoda, která využívá přímo matici statických zesílení, respektive rychlosti ohřevu jednotlivých čidel, je však použitelná ihned při ručním nastavení regulačních smyček. Vyžaduje však kvalitní uspořádání zářičů a čidel vůči výrobní formě.



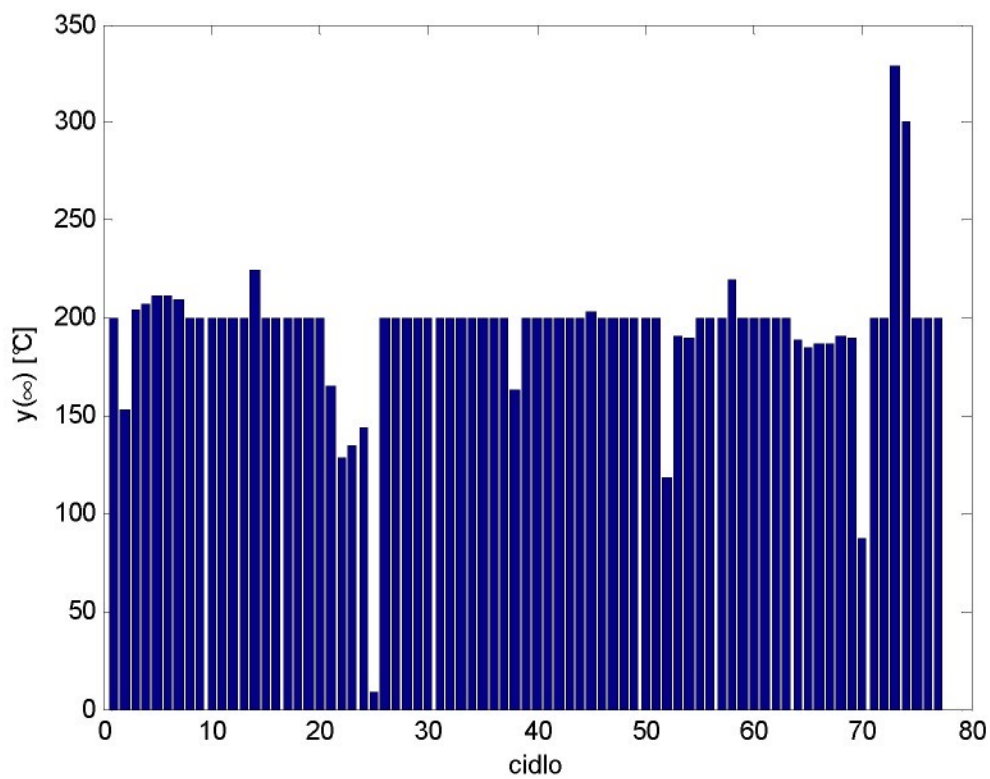
Obr. 5.22: Akční zásah pro zářiče přiřazené podle zesílení.



Obr. 5.23: Akční zásah pro zářiče přiřazené podle SVD rozkladu.



Obr. 5.24: Teploty pro vypočtený akční zásah na zredukovaném systému.



Obr. 5.25: Teploty pro vypočtený akční zásah na nezredukovaném systému.

6 Výběr a návrh řídicího algoritmu

Naplnění předcházejících dílčích cílů umožnilo provedení dílčího cíle číslo 7 „Návrh a výběr regulačního algoritmu, vzhledem k možnostem zařízení a požadavkům zadavatele“, který je popsán v této kapitole.

Jak již bylo řečeno v kapitole 3, z použité konstrukce výrobní linky, pro kterou je řídicí systém vyvíjen, a zvolené technologie výroby syntetických PVC kůží, vyplývají některá omezení na členy a prvky řídicího systému a na technologickou část výrobního procesu.

1. Z hlediska akční veličiny je to zejména omezení na akční veličině, která musí nabývat vždy kladných hodnot v intervalu $<0,1>$. To je dáno zejména nemožností chlazení povrchu výrobní formy.
2. Spínacích prvky stroje pro jednotlivé zářiče umožňují pouze omezené možnosti spínání respektive modulování hodnot akční veličiny.
3. Výpočetní a realizační náročnost implementace řídicího systému.
4. Omezení na výstupní veličině, tedy teplotě jednotlivých regulovaných částí formy respektive teploty jednotlivých čidel snímajících teplotní rozložení na rubové straně formy. Je třeba zajistit, aby nedocházelo k výrazným překmitům teploty, což vyvolává pomalé ustalování teplot na požadovaných hodnotách. Velká lokální přehřátí mohou způsobit nevratnou změnu lícové strany formy (oxidace formy). Poškození dezénu líce formy má za následek výrazné snížení kvality finálního výrobku. V této souvislosti se též může vytvořit lokální přehřátí části lícové strany výrobní formy, které má za následek „spálení vyráběné kůže“, což se může projevat nejen změnou lesku, ale i výskytem zažloutlých míst na povrchu PVC kůže.

Použitý řídicí algoritmus pak byl vybrán z několika alternativ, které jsou rozebrány v následující části práce. Byla zde použita syntéza jak decentralizovaného systému řízení s PID regulátory, tak i syntéza centralizovaných systémů řízení, která je zastoupena stavovou regulací, syntézou regulátoru pomocí lineárních maticových nerovností a syntéza regulátoru H_{∞} .

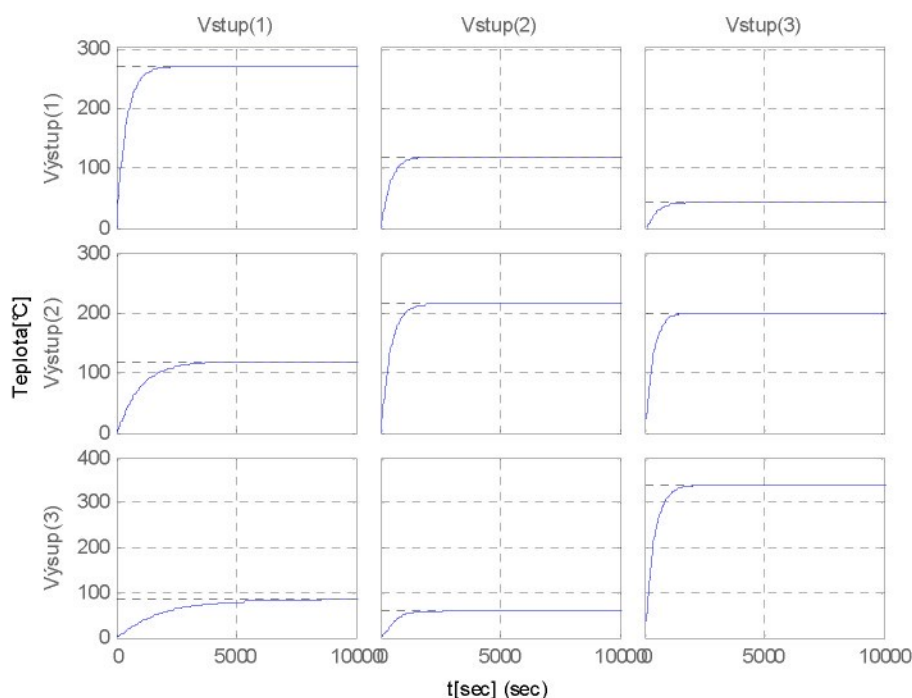
6.1 Zjednodušený model

Vzhledem k tomu, že MIMO systém reprezentující systém ohřevu má velký počet vstupních a výstupních veličin (přenosová matice $G(s)$ je rozměru 77×77 , 96×96 a v budoucnu je nutno počítat s rozměry 192×192), byl pro návrh a první vyhodnocení

jednotlivých typů regulací (regulátoru) použit zjednodušený systém popsáný maticí obrazových přenosů $\mathbf{G}_s(s)$ o rozměrech 3×3 . Tento zjednodušený MIMO systém byl získán vyextrahováním části původní matice $\mathbf{G}(s)$. Byla vybrána taková část, která popisuje systém s dostatečně silnou diagonální částí, má ale i relativně silné křížové vazby mezi teplotními čidly a zářiči mimo diagonálu. Zvolený model je pak ve tvaru popsaném následující rovnicí

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{G}_s(s) \cdot \mathbf{u}(s), \quad (6.1)$$

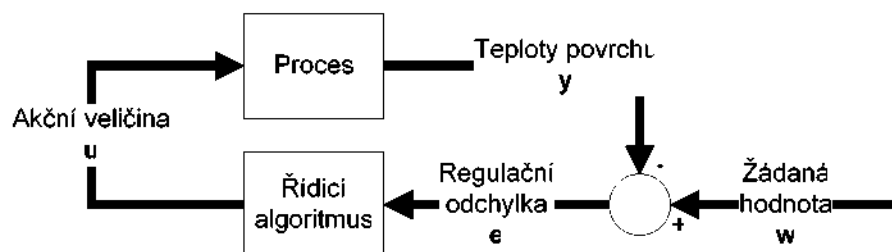
kde $\mathbf{u}(s)$ je obrazový vektor vstupní veličiny, $\mathbf{G}_s(s)$ je matice obrazových přenosů zjednodušeného modelu a $\mathbf{y}(s)$ je vektor laplaceových obrazů výstupní teploty povrchu rubu formy. Na Obr. 6.1 je pak zobrazena přechodová charakteristika zjednodušeného modelu.



Obr. 6.1: Přechodové charakteristiky zjednodušeného modelu.

Samotný regulační obvod je pak popsán soustavou rovnic (6.2), kde $\mathbf{R}(s)$ je matice obrazových přenosů regulátoru, který je získán postupem, jenž je popsán v následující části této kapitoly. Regulační odchylka vstupující do regulátoru je pak popsána vektorem laplaceových obrazů $\mathbf{e}(s)$, který je dán rozdílem obrazového vektoru žádaných hodnot $\mathbf{w}(s)$ a obrazu výstupního vektoru teplot rubové strany výrobní formy $\mathbf{y}(s)$.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(s) &= \mathbf{R}(s) \cdot \mathbf{e}(s) \\ \mathbf{e}(s) &= \mathbf{w}(s) - \mathbf{y}(s) \end{aligned} \quad (6.2)$$



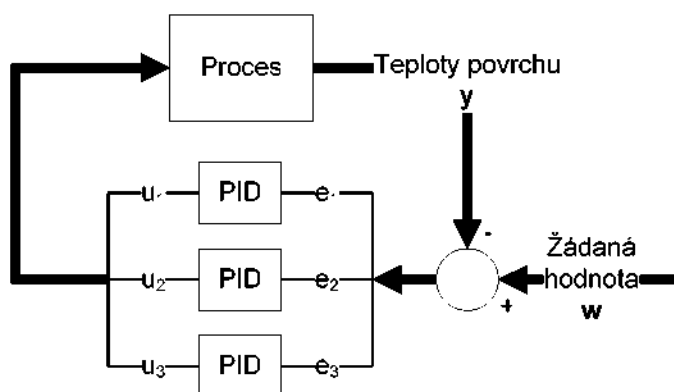
Obr. 6.2: Regulační obvod.

6.2 PID regulátor

Jako jeden ze základních přístupů regulace teplotního pole výrobní formy byl zvolen standardní PID regulátor. Ten byl pro stávající problém řízení rozsáhlého MIMO systému použit pro oddělené, respektive decentralizované řízení každé regulační smyčky. V návrhu pro zjednodušený systém $G_S(s)$, jehož matice přenosů má dostatečně diagonální charakter to znamená, že jednotlivé řádky matice jsou seřazeny tak, aby v každém řádku byl subsystém $G_{ij}(s)$ s nejsilnějším statickým zesílením na diagonále. Pro matici regulátorů $R(s)$ pak platí, že je diagonální a její prvky $R_{ii}(s)$ jsou pak dány rovnicí

$$R_{ii}(s) = r_{0i} + \frac{r_{1i}}{s} + r_{2i} \cdot s, \quad (6.3)$$

kde r_0 , r_1 , r_2 jsou parametry PID regulátoru. Regulační obvod je pak znázorněn na následujícím obrázku.



Obr. 6.3: Regulační obvod pro zapojení s PID regulátorem.

Pro návrh parametrů regulátoru pak bylo použito metody minimalizace kvadratického kritéria

$$J = \int (e^2(t) + Ku^2(t)) dt, \quad (6.4)$$

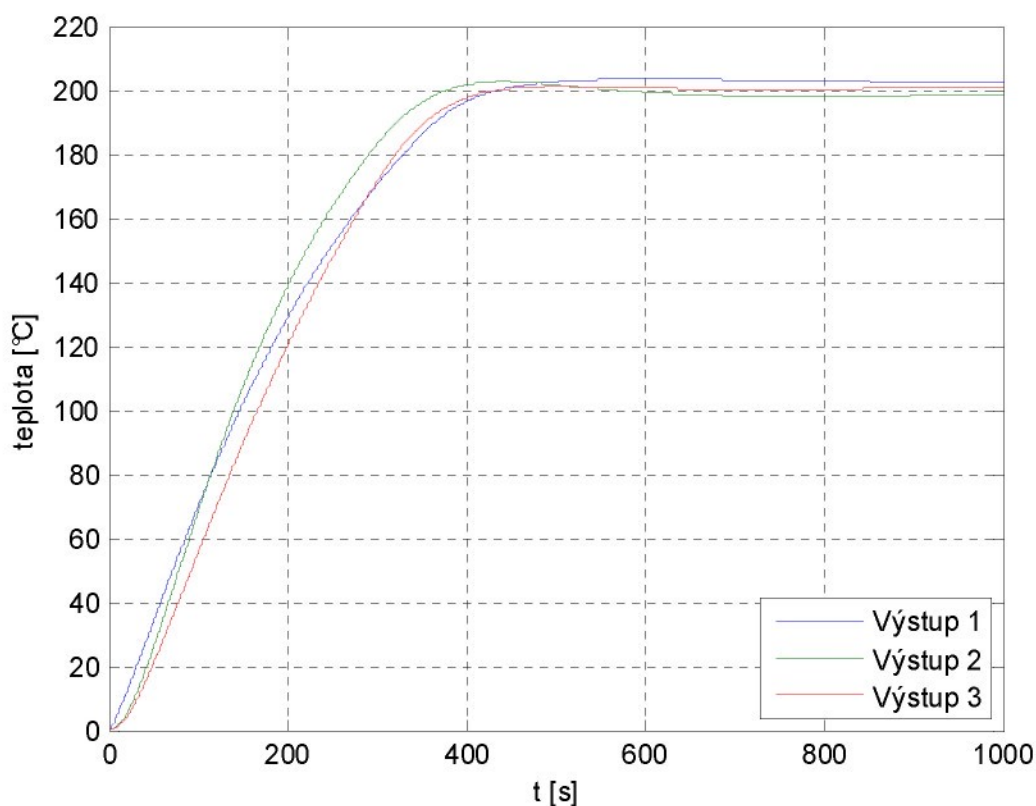
Kde $e(t)$ je regulační odchylka, $u(t)$ je akční veličina na výstupu regulátoru a K je pak váhová konstanta akční veličiny, která redukuje vysoké hodnoty na akční veličině. Optimalizace parametrů regulátoru je pak provedena pro dva různé přístupy.

Pro první případ je návrh proveden pro každou regulační smyčku zvlášť. Optimalizační kritéria (6.4) pak byly získány tři sady hodnot (jedna pro každou regulační smyčku) parametrů PID regulátoru. Získané parametry jsou pak uvedeny v tabulce

Tab. 6.1. Průběh teploty na čidlech je pak uveden na následujícím obrázku.

	i=1	i=2	i=3
r_{0i}	$217 \cdot 10^{-4}$	$500 \cdot 10^{-5}$	$138 \cdot 10^{-4}$
r_{1i}	$230 \cdot 10^{-7}$	$840 \cdot 10^{-8}$	$160 \cdot 10^{-7}$
r_{2i}	$500 \cdot 10^{-6}$	$310 \cdot 10^{-7}$	$600 \cdot 10^{-6}$

Tab. 6.1: Parametry regulátorů pro rozdílné nastavení pro každou smyčku.



Obr. 6.4: Průběh teploty na zjednodušeném modelu formy pro regulátor navržený pro každou regulační smyčku.

Při použití tohoto přístupu pro rozsáhlý MIMO systém, nastává ale nutnost návrhu poměrně velkého množství různých regulátorů, v našem případě to je až 96 různých regulátorů a pro sériovou linku s dvojitou výrobní formou to jsou téměř dvě stovky. To je

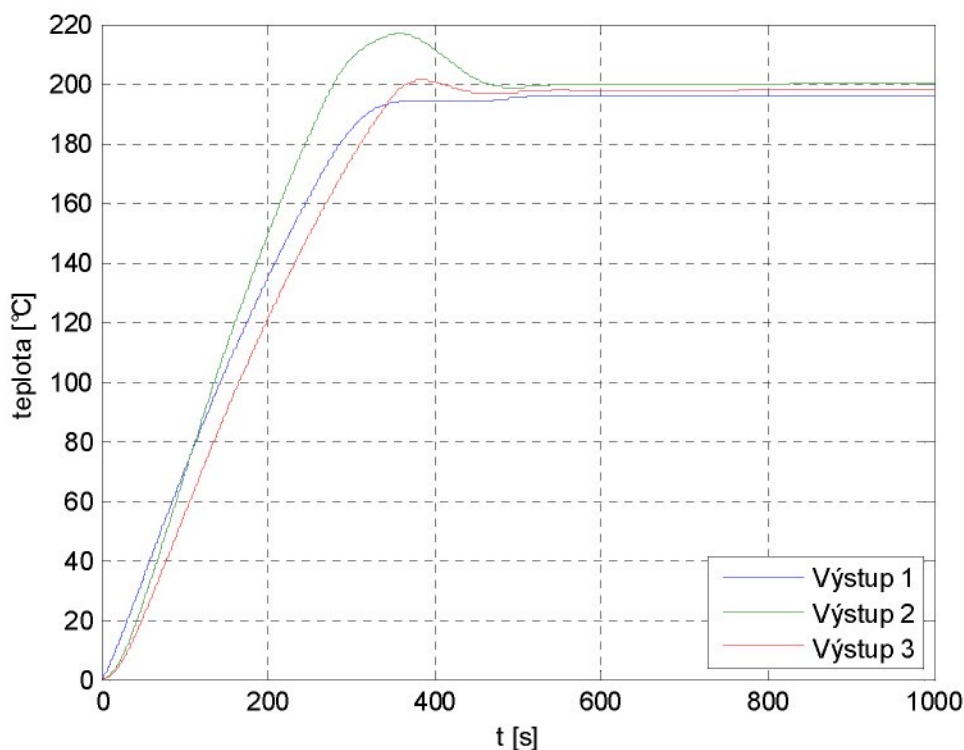
důvod, proč bylo přistoupeno k pokusu použít stejné nastavení regulátoru pro všechny smyčky.

Pro tento přístup je optimalizací kritéria získána pouze jedna sada parametrů pro nastavení PID regulátoru. Pro optimalizaci je pak optimalizováno kritérium (6.5), kde e_i respektive u_i jsou regulační odchylka v i -té regulační smyčce respektive i -tá akční veličina na i -tém vstupu zjednodušeného modelu.

$$J_i = \int \left(e_i^2(t) + K u_i^2(t) \right) dt$$

$$J = \sum_{i=1}^3 J_i \quad (6.5)$$

Průběh výstupních teplot pro jedno nastavení regulátorů je pak zobrazen na následujícím obrázku. Příslušné nastavení parametrů jednotlivých regulátorů je pak uvedeno v tabulce Tab. 6.2.



Obr. 6.5: Průběh teploty na zjednodušeném modelu formy pro stejný regulátor ve všech regulačních smyčkách.

r_{0i}	$138 \cdot 10^{-4}$
r_{1i}	$160 \cdot 10^{-7}$
r_{2i}	$600 \cdot 10^{-6}$

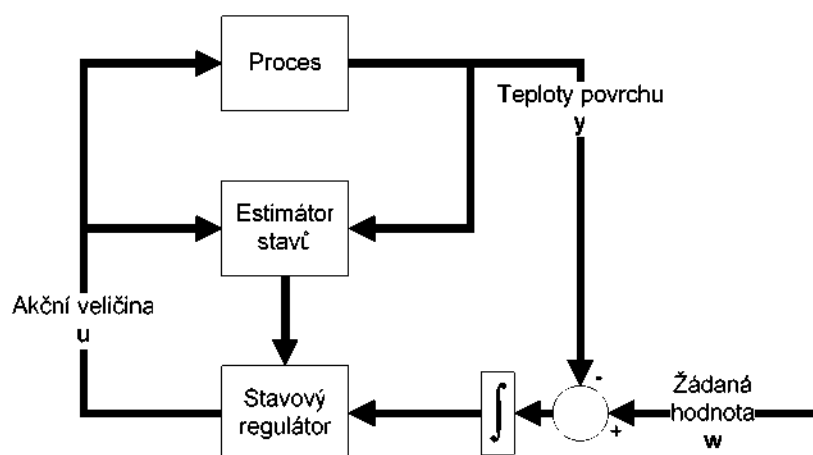
Tab. 6.2: Parametry regulátorů při společném nastavení pro každou smyčku.

Při pohledu na **Obr. 6.4** a **Obr. 6.5** je vidět, že při použití stejného regulátorů pro všechny regulační smyčky, které v reálu ovládají rozsvěcení jednotlivých zářičů, dojde na některých snímaných teplotách k překmitu a na některých zase k přeregulování. Z tohoto pohledu je rozhodně lepší použít pro každou smyčku vlastní nastavení regulátoru. Ovšem je třeba si uvědomit, že toto rozhodnutí nám přináší nutnost návrhu několika desítek různých nastavení PID regulátorů.

6.3 Stavový regulátor

Jako druhá možnost pro regulaci byla ověřena možnost regulace s využitím řízení prostřednictvím stavové regulátoru. Stavový regulátor byl navržen jako centralizovaný řídicí systém pro celou řízenou soustavu. Jsou tedy ovládány všechny tři akční členy pomocí jednoho centralizovaného stavového regulátoru.

Stavový regulátor je pak navrhován pro rozšířený stavový popis, který vznikl standardním rozšířením stavového popisu zjednodušeného modelu $G_s(s)$ o další tři stavy, které jsou dány integrací regulační odchylky. Toto rozšíření nám pak tedy dovolí navrhnout regulátor sloužící k vyrovnaní trvalé odchylky žádané hodnoty. Schematické zapojení regulačního obvodu se stavovým regulátorem je pak znázorněno na **Obr. 6.6**.



Obr. 6.6: Schéma regulačního obvodu se stavovým regulátorem.

Samotný stavový regulátor byl nalezen optimalizací kvadratického kritéria (6.6). V tomto kritériu pak byly matice Q , R a N nastaveny tak, aby bylo dosaženo co

nejrychlejšího přechodu výstupních teplot na žádanou hodnotu, ovšem bez výrazného překmitu, který by mohl výrobní formu poškodit. Zároveň bylo nutno prostřednictvím matice **R** na akční veličině potlačit nabývání nežádoucích hodnot akční veličiny, které jsou v praxi nedosažitelné.

$$J = \int x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u \quad (6.6)$$

Pro tento případ bylo použito rozšířeného stavového popisu, jenž byl rozšířen právě o ty stavy x_R , které reprezentují právě integrály regulační odchylek jednotlivých teplot, tedy

$$\dot{x}_{Ri} = e_i = w_i - y_i. \quad (6.7)$$

Stavový popis pro jednotlivé vazby daného systému, pro který je návrh proveden je pak ve tvaru

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{ij} &= \mathbf{A}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij} + \mathbf{B}_{ij} \cdot \mathbf{u}_j \\ \mathbf{y}_i &= \mathbf{C}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij} + \mathbf{D}_{ij} \cdot \mathbf{u}_j \end{aligned} \quad (6.8)$$

kde $\mathbf{x}_{ij}$ je vektor stavů odpovídající vazbě j-tého vstupu na i-tý výstup,

$\mathbf{u}_j$ je j-tý vstup,

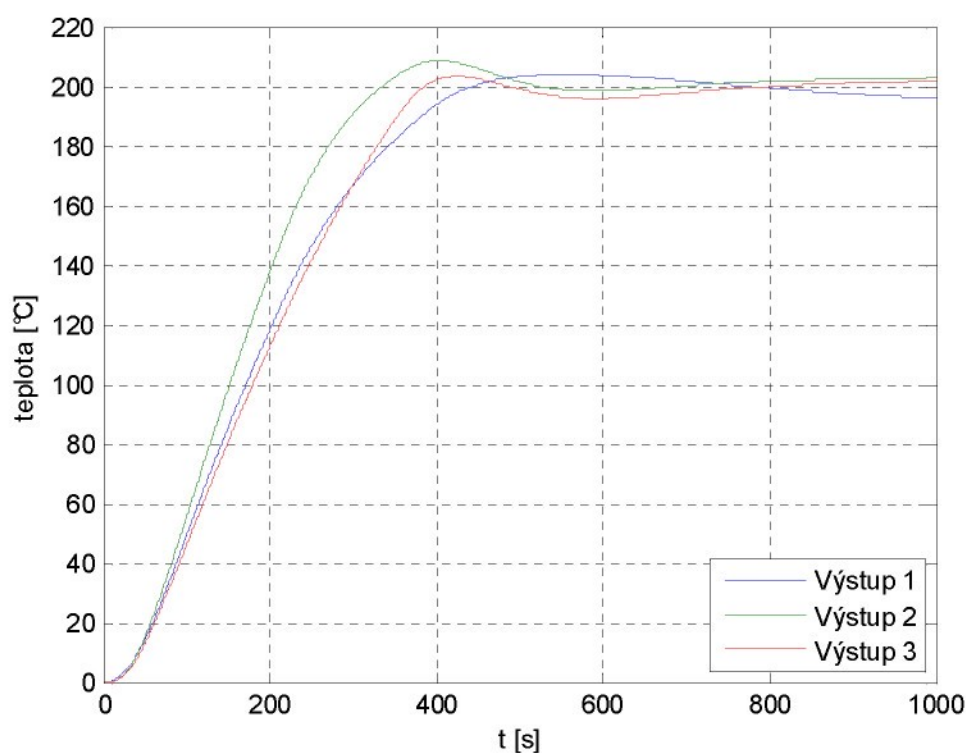
$\mathbf{y}_i$ je i-tý výstup respektive teplota. Rozšíření stavového popisu pro soustavu s n vstupy a m výstupy, které zaručí návrh regulátoru pro nulovou regulační odchylku je pak dáno podle následujícího předpisu.

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{x}}_R = \begin{pmatrix} \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_{12} \\ \vdots \\ \dot{x}_{1n} \\ \dot{x}_{R1} \\ \dot{x}_{21} \\ \vdots \\ \dot{x}_{2n} \\ \dot{x}_{R3} \\ \vdots \\ \dot{x}_{Rm} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{12} & & & & & & & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & & & & & & \vdots \\ 0 & & & 0 & \mathbf{A}_{1n} & & & & & & \vdots \\ -\mathbf{C}_{11} & -\mathbf{C}_{12} & \dots & -\mathbf{C}_{1n} & 0 & & & & & & \vdots \\ 0 & & & & & \mathbf{A}_{21} & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & & \ddots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & & & \mathbf{A}_{1n} & & & \vdots \\ \vdots & & & & & -\mathbf{C}_{21} & \dots & -\mathbf{C}_{2n} & 0 & & \vdots \\ \vdots & & & & & & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -\mathbf{C}_{mn} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ \vdots \\ x_{1n} \\ x_{R1} \\ x_{21} \\ \vdots \\ x_{2n} \\ x_{R3} \\ \vdots \\ x_{Rm} \end{pmatrix} + \dots \\
\dots + \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{11} & & & \\ & \mathbf{B}_{12} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{B}_{1n} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{B}_{11} & & & \\ & \ddots & & \\ & & \mathbf{B}_{2n} & \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ & & \ddots & \mathbf{B}_{1nm} \\ 0 & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & & & \\ & 0 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & & \ddots & \\ & & & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_m \end{pmatrix} \quad (6.9)
\end{aligned}$$

Pro takto daný rozšířený stavový popis byly matice $\mathbf{N}$, $\mathbf{Q}$ a $\mathbf{R}$ nastaveny tak, aby bylo dosaženo co nejlepší respektive nejrychlejší potlačení regulační odchylky e , ovšem s minimálními překmity regulované veličiny respektive teploty a s minimálními nároky na akční veličinu u . Výsledný regulátor, který je výsledkem optimalizace kritéria (6.6) pro rozšířenou soustavu, je pak dán maticí koeficientů $\mathbf{K}_R$. Průběh teplot při regulačním pochodu je pak vidět na Obr. 6.7.

$$\begin{aligned}
\mathbf{K}_{R1} &= \begin{pmatrix} 87 \cdot 10^{-4} & 15 \cdot 10^{-3} & -17 \cdot 10^{-18} & -11 \cdot 10^{-19} & 56 \cdot 10^{-16} & 41 \cdot 10^{-18} & 10 \cdot 10^{-4} \\ -16 \cdot 10^{-15} & -26 \cdot 10^{-15} & 4 \cdot 10^{-4} & 0 & 34 \cdot 10^{-16} & 24 \cdot 10^{-18} & 11 \cdot 10^{-16} \\ -31 \cdot 10^{-15} & -52 \cdot 10^{-15} & -13 \cdot 10^{-18} & -11 \cdot 10^{-19} & -28 \cdot 10^{-4} & 1 \cdot 10^{-4} & 25 \cdot 10^{-16} \end{pmatrix} \\
\mathbf{K}_{R2} &= \begin{pmatrix} 0 & -25 \cdot 10^{-16} & -94 \cdot 10^{-18} & -52 \cdot 10^{-17} & -12 \cdot 10^{-19} & 1 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 29 \cdot 10^{-18} & 23 \cdot 10^{-3} & 9 \cdot 10^{-4} & 15 \cdot 10^{-17} & 53 \cdot 10^{-19} & 15 \cdot 10^{-15} & 16 \cdot 10^{-17} \\ 62 \cdot 10^{-18} & -24 \cdot 10^{-16} & -91 \cdot 10^{-18} & 1 \cdot 10^{-4} & 0 & 26 \cdot 10^{-15} & 28 \cdot 10^{-16} \end{pmatrix} \\
\mathbf{K}_{R3} &= \begin{pmatrix} 26 \cdot 10^{-16} & 18 \cdot 10^{-18} & -56 \cdot 10^{-16} & -21 \cdot 10^{-17} & -1 \cdot 10^{-4} & 15 \cdot 10^{-18} & 17 \cdot 10^{-18} \\ -9 \cdot 10^{-4} & 1 \cdot 10^{-4} & -37 \cdot 10^{-15} & -14 \cdot 10^{-17} & 50 \cdot 10^{-17} & -2 \cdot 10^{-4} & 12 \cdot 10^{-18} \\ 23 \cdot 10^{-16} & 16 \cdot 10^{-18} & -25 \cdot 10^{-3} & 11 \cdot 10^{-4} & 12 \cdot 10^{-17} & 15 \cdot 10^{-17} & -2 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix} \quad (6.10)
\end{aligned}$$

$$\mathbf{K}_R = (\mathbf{K}_{R1} \quad \mathbf{K}_{R2} \quad \mathbf{K}_{R3})$$

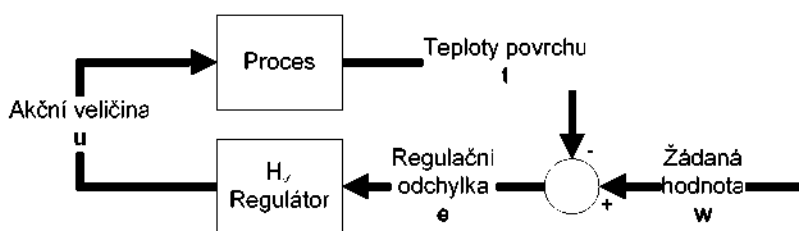


Obr. 6.7: Průběh výstupních teplot zjednodušeného modelu se stavovou regulací.

Jak je vidět, regulované veličiny mají při náběhu mírný překmit asi 5%, to je hodnota někde mezi případy nasazení PID regulace se stejným a různým PID regulátorem pro každou regulační smyčku.

6.4 H_∞ návrh regulátoru

Vzhledem k předpokladu, že se vlastnosti reálného systému mohou časem měnit, ověřoval se způsob, jak zajistit robustnost vůči těmto změnám. Variabilita dynamických vlastností systému může být způsobena například změnami černění rubové strany výrobní formy, která absorbuje infračervené záření, dále pak může docházet ke snižování intenzity dopadajícího záření, což může být způsobeno třeba napečením rozsypaného PVC prášku na lampu nebo reflektor. Proto je nezbytné, aby algoritmus zajišťoval dostatečnou robustnost regulačního pochodu. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k návrhu a ověření regulátoru navrženého metodou H_∞ alespoň na zjednodušené soustavě. Regulátor je pak navržen jako centralizovaný řídicí systém.



Obr. 6.8: regulační schéma s H_∞ regulátorrem.

Regulátorem R je pak matice obrazových přenosů R_{ij} , která minimalizuje normu H_∞ pro matici smíšené citlivostní funkce N . Regulátor R je pak hledán podle předpisu (6.12). Tedy hledáme takový stabilizující regulátor R , který minimalizuje H_∞ normu smíšené citlivostní funkce N , kde $S(s)$ je citlivostní funkce a $T(s)$ je doplňková citlivostní funkce. Prostřednictvím tvarování váhových funkcí ve frekvenční charakteristice je potom možno ovlivňovat jednotlivé vlastnosti regulačního obvodu. Váhovou funkcí W_p je možno ovlivnit kvalitu řízení respektive chování regulační odchylky e , váhovou funkcí W_u lze ovlivnit chování akčních veličin u a váhovou funkcí W_T lze charakterizovat neurčitost systému, kterou zpočátku neuvažujeme. Jednotlivé váhové filtry byly nastaveny následovně, aby splňovaly požadavky na sledování žádané hodnoty na nízkých frekvencích a pak také, aby bylo maximálně potlačeno překmitnutí regulované veličiny při skoku žádané hodnoty a v neposlední řadě bylo nutno dát důraz na limitaci akční veličiny. Vzhledem k tomu, že na každý z výstupů byly kladeny stejné nároky, byl použit stejný váhový filtr na celý MIMO systém. Návrh řídicího obvodu byl tedy proveden pro nominální řídicí systém podle parametrů (6.11).

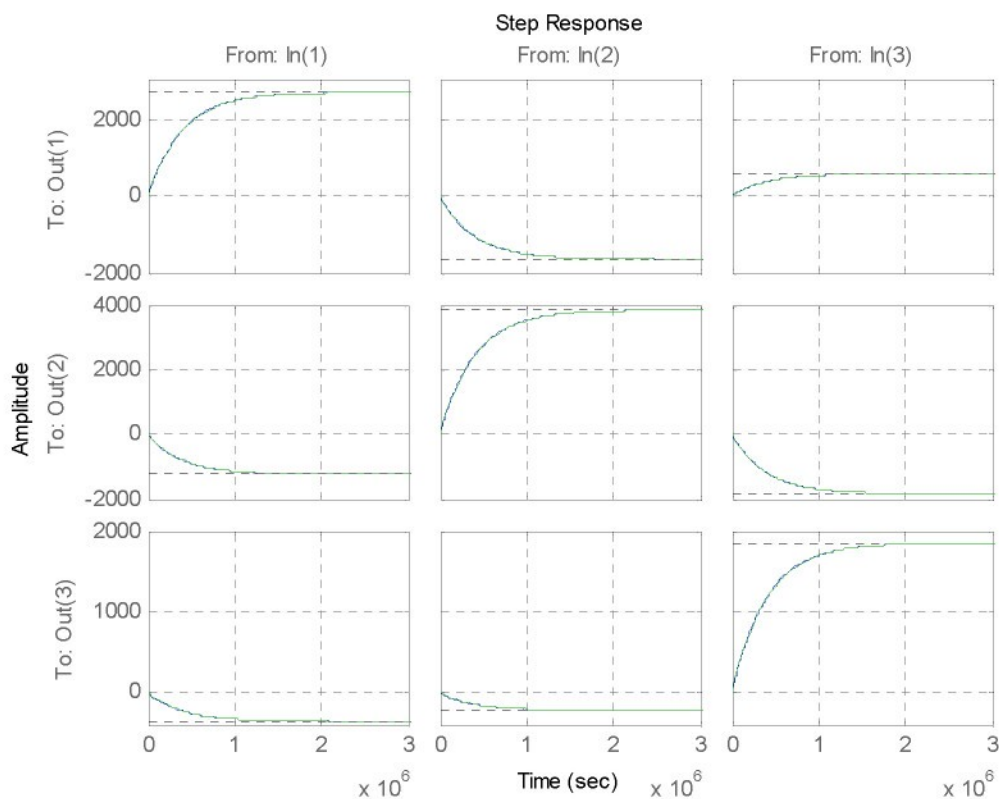
$$\begin{aligned} \mathbf{W}_P &= \frac{\frac{s}{1,6} + 0,25}{s + 10^{-5} \cdot 0,25} \\ \mathbf{W}_T &= 0 \\ \mathbf{W}_U &= 7,6 \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= \frac{1}{1 + \mathbf{R}(s)\mathbf{G}_s(s)} \\ \mathbf{T} &= \frac{\mathbf{R}(s)\mathbf{G}_s(s)}{1 + \mathbf{R}(s)\mathbf{G}_s(s)} \end{aligned} \quad (6.12)$$

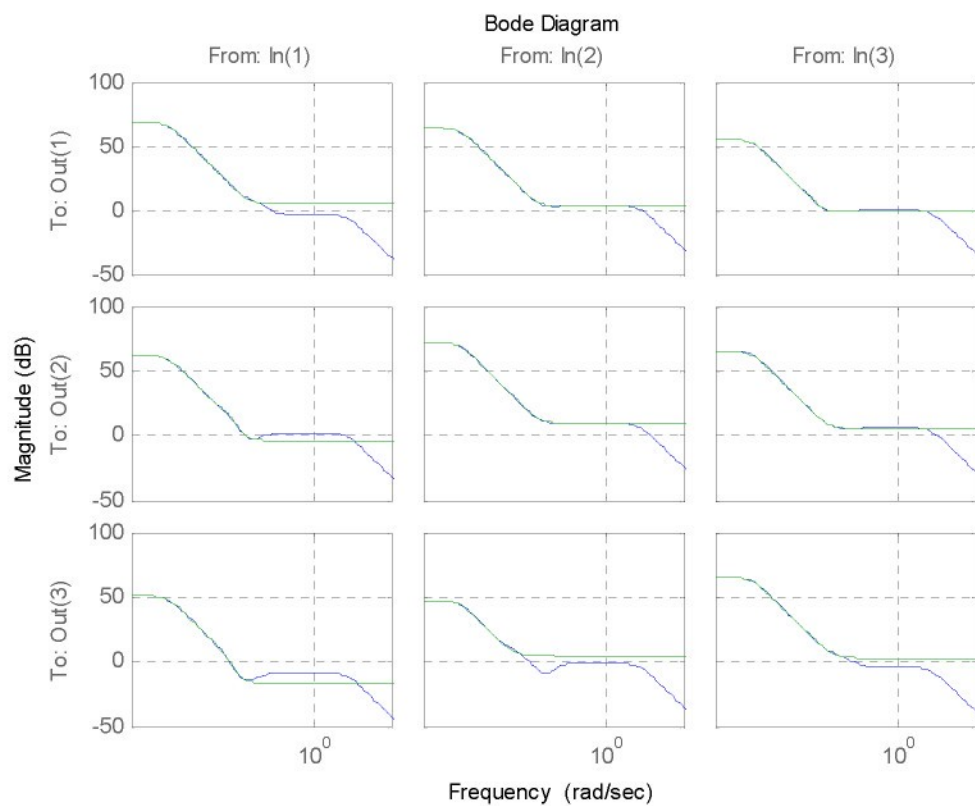
$$\min_{\mathbf{R}} \|\mathbf{N}(\mathbf{R})\|_{\infty}; \mathbf{N}(\mathbf{R}) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_p \mathbf{S} \\ \mathbf{W}_t \mathbf{T} \\ \mathbf{W}_u \mathbf{R} \mathbf{S} \end{bmatrix}$$

Syntézou H_{∞} regulátoru $\mathbf{R}$, získáme matici stabilizujícího regulátoru $\mathbf{R}$, která je plnou maticí „obecných“ obrazových přenosů. Tento regulátor pak minimalizuje H_{∞} normu smíšené citlivostní funkce $\mathbf{N}$, tak jak je uvedeno v (6.12). Jednotlivé prvky matice $\mathbf{R}$ jsou po syntéze poměrně vysokých řádů, které se pohybují mezi dvacátým prvním a dvacátým pátým řádem. Z tohoto důvodu je pak potřeba ještě provést redukci řádu regulátoru. Jeden z obrazových přenosů regulátoru (po redukci řádu) je pak pro představu uveden v (6.13). Celá matice regulátoru je pak uvedena v příloze A. Dynamika regulačního obvodu s vypočtenými regulátory je vyjádřena pomocí přechodových funkcí na Obr. 6.9 a jako amplitudová frekvenční charakteristika, která je na Obr. 6.10. Zelenou barvou je zde uveden regulátor po redukci řádů a modře původní regulátor navržený pomocí H_{∞} syntézy podle smíšené citlivostní funkce.

$$R_{22} = \frac{3,09s^5 + 2,94 \cdot 10^{-2} \cdot s^4 + 1,05 \cdot 10^{-4} \cdot s^3 + 1,72 \cdot 10^{-7} \cdot s^2 + 1,26 \cdot 10^{-10} \cdot s + 3,22 \cdot 10^{-14}}{s^5 + 6,55 \cdot 10^{-3} \cdot s^4 + 1,43 \cdot 10^{-5} \cdot s^3 + 1,19 \cdot 10^{-8} \cdot s^2 + 3,39 \cdot 10^{-12} \cdot s + 8,39 \cdot 10^{-18}} \quad (6.13)$$

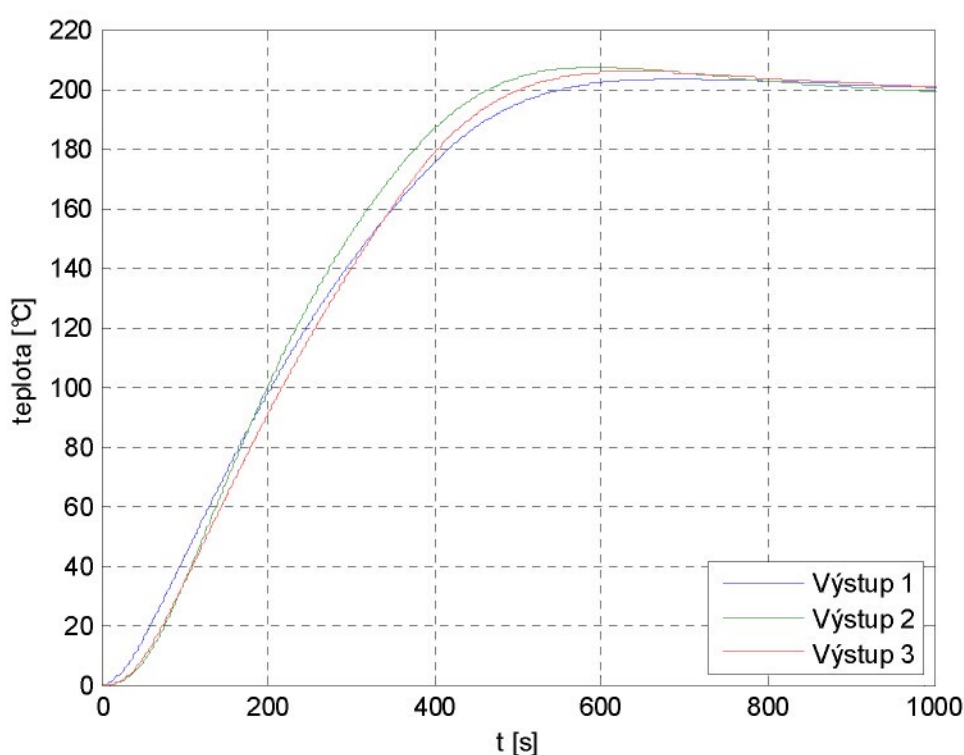


Obr. 6.9: Přechodové charakteristiky regulátorů získaného metodou H_∞ .



Obr. 6.10: Frekvenční amplitudové charakteristiky regulátorů získaného metodou H_∞ .

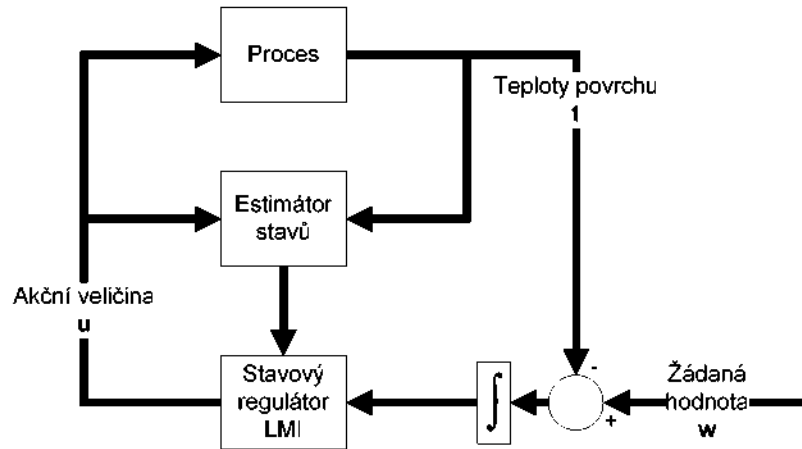
Průběhy výstupních veličin regulované soustavy, řízené prostřednictvím regulátoru získaného H_∞ metodou, jsou pak zobrazeny na Obr. 6.11. Na průbězích výstupních veličin regulačního obvodu je vidět, že překmit na teplotách je poměrně nízký, ale problém by na reálném systému mohl být v relativně pomalém náběhu teplotního pole na žádanou hodnotu. Jak je vidět na struktuře regulátoru (viz. Příloha A), tak návrh a výsledná struktura regulačního obvodu je velmi složitá a pro zadaný cíl nepřináší výrazně lepší výsledky než metody ostatní (například při použití PID regulátoru). To je důvod, proč je tato metoda pro daný problém prakticky nepoužitelná a nebyla tedy dále rozpracována.



Obr. 6.11: Průběh teplot zjednodušeného modelu pro H_∞ regulátor.

6.5 LMI návrh regulátoru

Posledním typem návrhu, který byl použit pro zjednodušený model systému ohřevu pro výrobu syntetických kůží, je návrh decentralizovaného stavového regulátoru, který byl navržen řešením lineárních maticových nerovnic (LMI). Tato metoda byla publikována ve sborníku konference ICCS 2007 [11].



Obr. 6.12: Schéma regulačního obvodu pro LMI návrh regulátoru.

Při návrhu je pak navržen stavový regulátor, který je optimalizován pro zjednodušený model $G_s(s)$, jenž je převeden do stavového tvaru a popis systému se pak předpokládá ve tvaru

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{q}}_i(t) &= \mathbf{A}_i \mathbf{q}_i(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i(t) + \sum_{h=1}^N (\mathbf{G}_{ih} + \Delta \mathbf{G}_{ih}(t)) \mathbf{q}_h(t), i = 1, 2, \dots, N \\ \mathbf{y}_i(t) &= \mathbf{C}_i \mathbf{q}_i(t), i = 1, 2, \dots, N\end{aligned}\quad (6.14)$$

kde $\mathbf{A}_i$ je přenosová matice přímé vazby od i -tého vstupu na i -tý výstup (je dáno prvky $g_{si}(s)$ matice $G_s(s)$), matice $\mathbf{B}_i$ je vstupní matice pro tento přenos a výstupní matice těchto subsystémů je matice $\mathbf{C}_i$. Vektor $\mathbf{q}_i(t)$ je pak stavovým vektorem daného subsystému. Maticí $\mathbf{G}_i$ je pak vyjádřena neurčitost respektive porucha, která je pak obrazem vlivu ostatních vstupů na daný výstup.

Pro LMI proměnné $\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$, $\mu_h^2 \mathbf{I}$, je pak nutno řešit soustavu dvou maticových nerovností

$$\begin{aligned}\mathbf{X} &= \mathbf{X}^T > 0 \\ \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{G} & \mathbf{X}\mathbf{H}_1^T & \dots & \mathbf{X}\mathbf{H}_N^T \\ \mathbf{G}^T & -\mathbf{I} & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{H}_1\mathbf{X} & 0 & -\mu_1^2\mathbf{I} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_N\mathbf{X} & 0 & 0 & \dots & -\mu_N^2\mathbf{I} \end{bmatrix} &< 0,\end{aligned}\quad (6.15)$$

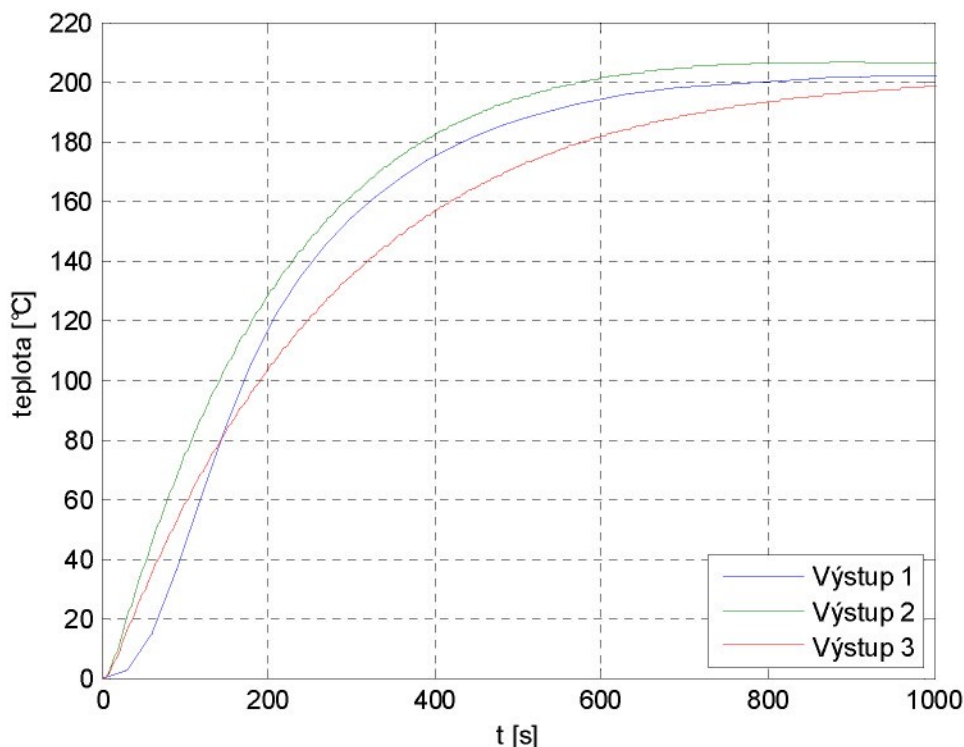
kde

$$\mathbf{R} = \mathbf{X}\mathbf{A}^T + \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{Y}^T\mathbf{B}^T + \mathbf{B}\mathbf{Y}.\quad (6.16)$$

Samotný stavový regulátor je pak dán vztahem

$$\mathbf{K} = \mathbf{Y}\mathbf{X}^{-1}.\quad (6.17)$$

Průběhy výstupních teplot zjednodušeného modelu jsou pak zobrazeny na následujícím obrázku.



Obr. 6.13: Výstupní teploty zjednodušeného modelu řízeného LMI regulátorem.

Jak je vidět na Obr. 6.13, náběh výstupních teplot je poměrně pomalý, což by bylo postačující, pokud by na reálném zařízení nebyla brána v potaz rychlost dosažení žádané hodnoty. Pak by byla předpokládaná velká robustnost tohoto řídicího systému výhodou.

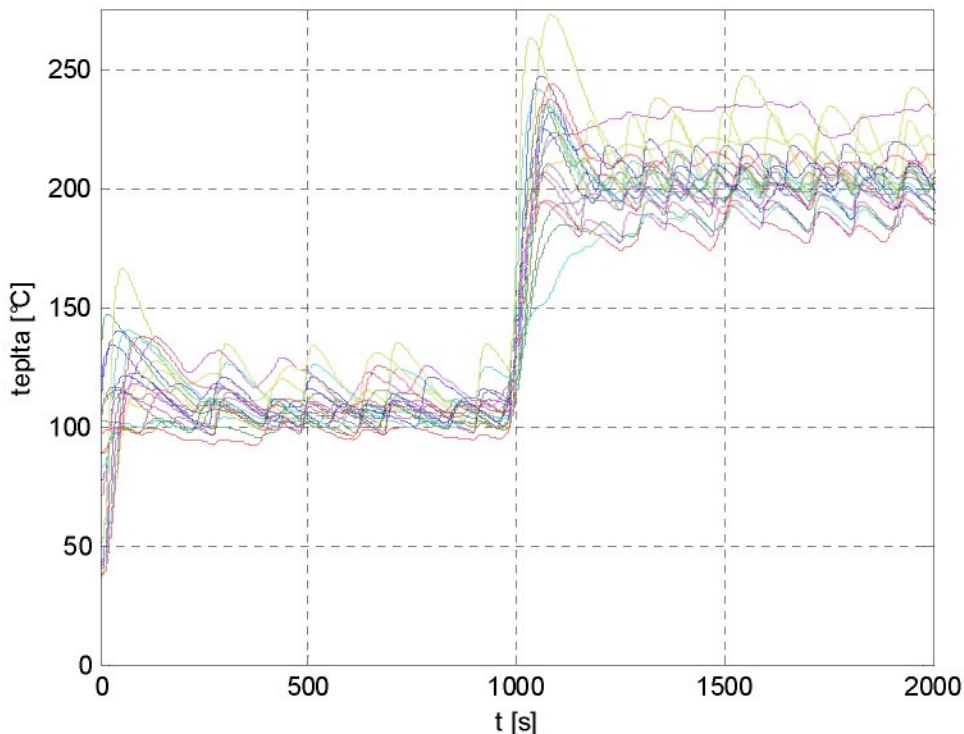
6.6 Výběr optimálního regulátoru a jeho implementace

Pro výběr toho správného regulačního algoritmu je v tomto případě nutno přihlédnout hned k několika hlediskům. V první řadě je třeba brát v potaz požadavky zákazníka. Ty byly definovány globálním cílem, jak je uveden v kapitole 3.1. Tyto se ovšem v průběhu vývoje postupně měnily, závěrečné úsilí pro dosažení globálního cíle bylo vyvinuto až v poslední fázi vývoje, kdy probíhala závěrečná příprava na sériovou výrobu. V předchozích fázích ale byly zpravidla formulovány cíle, které ověřovaly různé technologické postupy a principy, které umožňovaly získávat poznatky pro řešení globálních cílů - tedy plnit a ověřovat jednotlivé dílčí cíle.

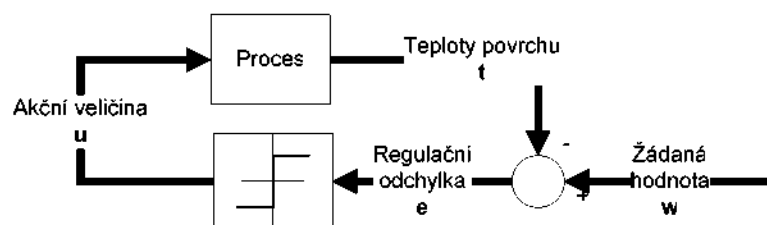
V prvních krocích byl hlavní požadavek odběratele zaměřen hlavně na co nejrychlejší zodpovězení otázky, jestli je vůbec možné výrobní formu vyhřát na požadovanou teplotu pomocí použitých infračervených zářičů. Ve druhé předvýrobní fázi bylo nutno zoptimalizovat homogenitu teplotního pole výrobní formy. Ve třetí zkušební fázi výroby bylo nutno rozložení teplot přizpůsobit kvalitě výrobku, takže na některých místech bylo třeba

přizpůsobit teplotní pole změnou ustálené teploty v dané oblasti. V poslední fázi, ve které probíhala příprava na sériovou výrobu, byl kladen důraz kromě teplotního pole také na rychlost dosažení požadovaných teplot.

Jak již bylo řečeno, tak v prvních krocích bylo nutno dokázat, zda je možno výrobní nástroj vyhřát na potřebnou teplotu, která je potřeba ke slinování práškového PVC. Tato teplota dosahuje zhruba hodnoty 230 °C. Vzhledem k prvnímu experimentu na zkušebním zařízení nebylo nutno dosahovat žádaných teplot s nijak vysokou přesností, a proto byla teplota regulována vzhledem ke konstrukci zařízení, které umožňuje pouze spínat a vypínat zářiče. Toto spínání pak zajišťuje polovodičové relé se spínáním v nule. Proto bylo použito obyčejné dvoupolohové regulace s použitím spínacího relé bez hystereze ve zpětné vazbě. Průběhy teplot zkušební výrobní formy, které dokazují možnost ohřevu výrobní formy na cca 200°C, jsou pak zobrazeny na Obr. 6.14. Je vidě, že kvalita regulačního pochodu vzhledem k ustáleným hodnotám není velká, jelikož dochází ke kmitání kolem žádané hodnoty a překmitům, to je zapříčiněno hlavně použitím snímačů teploty PT100, které způsobují nezanedbatelné zkreslení dynamiky, ale jako důkaz dosažitelnosti dané teplotní hladiny je dostačující. Zapojení regulačního obvodu je pak naznačeno na Obr. 6.15.



Obr. 6.14: Průběhy teplot povrchu rubové strany formy pro dvoupolohovou regulaci bez hystereze.



Obr. 6.15: Regulační obvod pro regulaci s dvoupolohovým relé bez hystereze.

Pro další fázi, kterou bylo dosažení homogenního ustáleného teplotního pole v nějakém rozumném konečném čase, již byla čidla PT100 nahrazena termočládky, a bylo tedy možno daleko lépe měřit teplotu rubové strany výrobní formy. V tuto chvíli bylo nutno přikročit k výběru vhodného řídicího algoritmu, vzhledem k požadavkům odběratele. Ty byly kladeny hlavně na relativní jednoduchost návrhu a přizpůsobení parametrů dalším typům výrobních forem tohoto stroje a hardwarovou výbavu výrobní linky. Dále bylo nutno brát v úvahu dosažení nulové ustálené hodnoty regulační odchylky a také minimálního překmitu teplot pole. To by mohlo vézt až k poškození výrobní formy, které by se opticky projevilo na finálním výrobku.

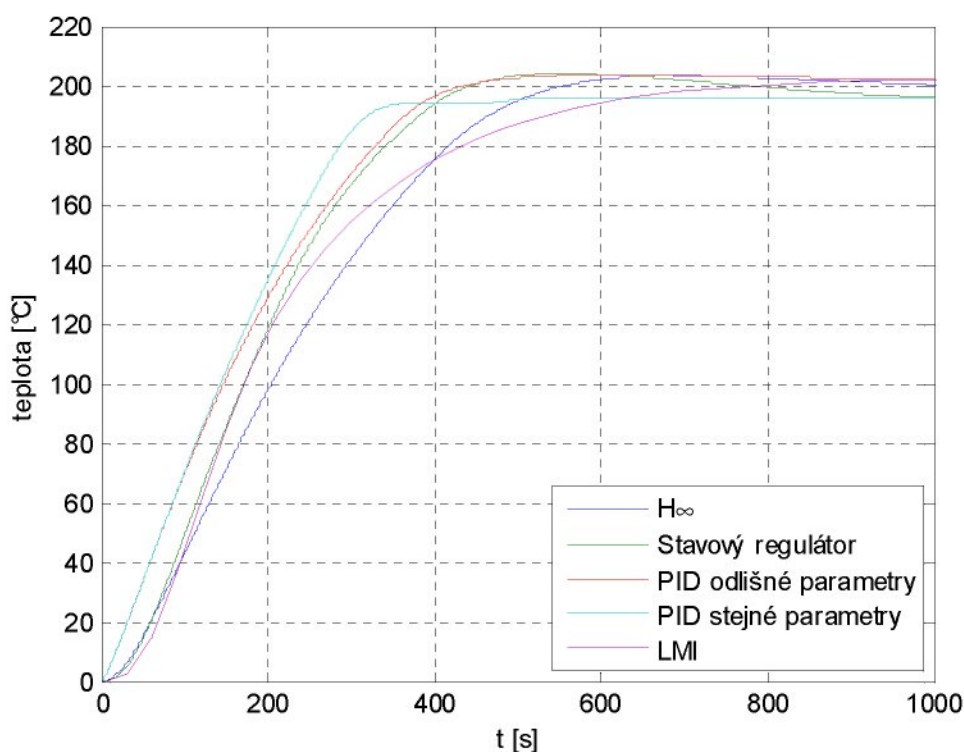
Z cílů zadaných zadavatelem je třeba si uvědomit, že pro zvolený typ regulátoru je nutno posoudit jakési vyvážení mezi cenou a složitostí implementace daného regulátoru a jeho přínosem, který se promítne na kvalitě finálního výrobku. Lze předpokládat, že sofistikované přístupy k návrhu řídicího algoritmu systému ohřevu mohou dosahovat lepších regulačních pochodů, potažmo kvality teplotního pole a snad i finálního výrobku. Ovšem je třeba vzít v úvahu, jestli náklady, které je nutno investovat do zařízení ve spojitosti s možnou aplikací sofistikovaných algoritmů řízení, vyváží pouze pravděpodobný přínos na kvalitu vyráběné umělé kůže. Toto kritérium pak pro zadavatele může mít zásadní vliv na nasazení takovýchto algoritmů.

Jak je vidět na Obr. 6.16, Obr. 6.17 a Obr. 6.18, požadavek na žádanou hodnotu a malý překmit je splněn prakticky pro všechny regulátory, které byly testovány. Pouze pro návrh stejných parametrů pro celou sadu PID regulátorů je překmit o něco větší. Problém je ale v požadavku na jednoduchost návrhu, tam jasně vítězí regulační obvod s PID regulátory. V případě změny výrobní formy za novou, nebo za formu jiného typu, je pak možno snadno upravit nastavení regulátorů dokonce ručně. To je jeden z důvodů, proč bylo zvoleno využití PID regulátorů.

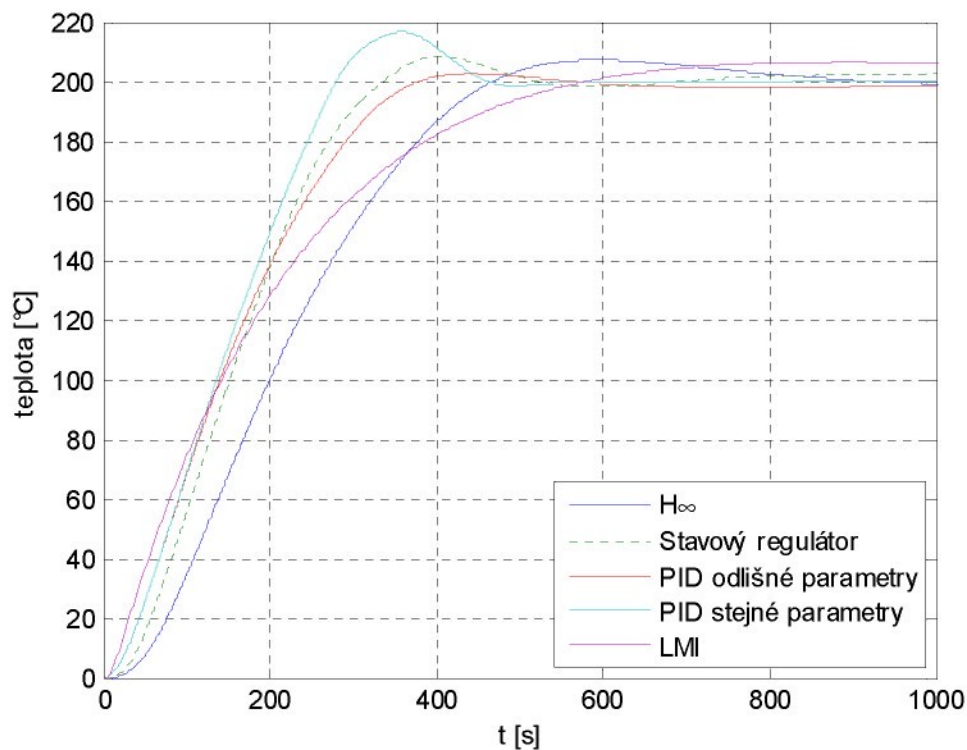
Dalším důvodem volby PID regulátoru byla implementace regulátoru. Jeho výstup, jak bylo uvedeno, je realizován dvoupolohovým spínacím relé na řídicím PLC, které spíná v nule. To je důvod, proč je možno s rozumnou periodou modulovat pouze omezené množství

hodnot. Maximální frekvence spínání je sice 100Hz, ale při takto rychlém spínání se poměrně rychle dostaneme na hranici životnosti spínacího prvku. Proto byla použita implementace PID regulátoru, jako zapojení relé s pružnou zpětnou vazbou, které aproximuje spojitý regulátor a využívá daleko nižší spínací frekvenci v tomto systému.

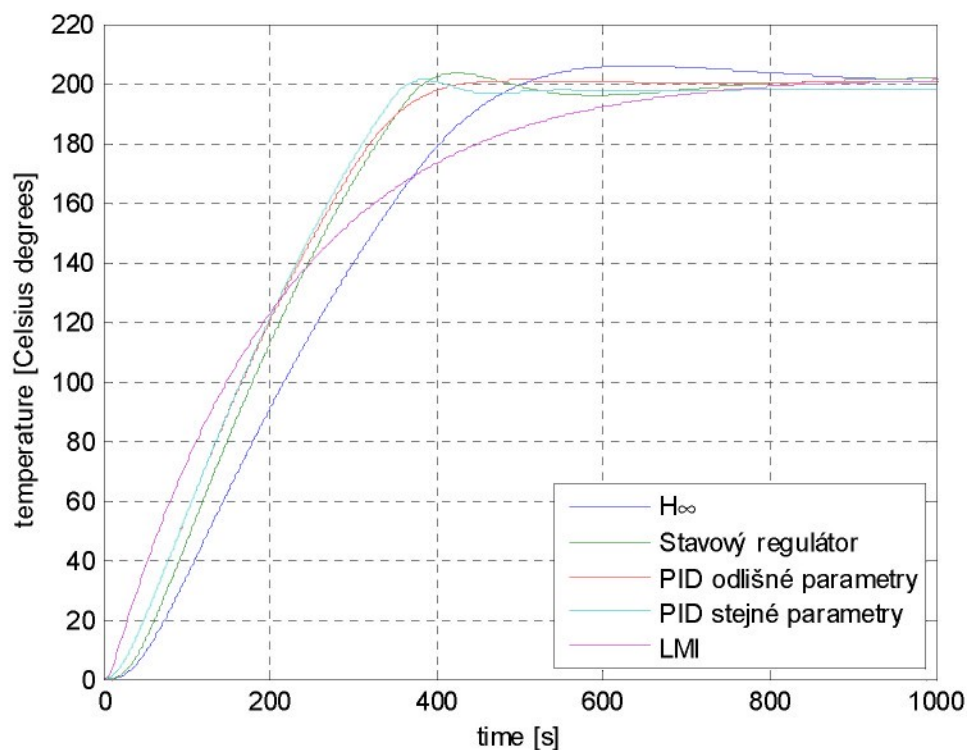
Jedinou nevýhodou použití PID regulátorů jako řídicích prvků je nutnost pro každou regulační smyčku nastavovat jiné parametry regulátoru, což může být poměrně zdlouhavé. To je důvod, proč byl zvolen kompromis mezi jedním nastavením pro všechny regulační smyčky a různým nastavením pro každou regulační smyčku. Smyčky tedy byly roztrženy podle rychlosti náběhu a statického zesílení do několika skupin, pro které bylo optimalizováno společné nastavení PID regulátoru.



Obr. 6.16: Porovnání řídicích algoritmů pro 1. výstup zjednodušeného modelu.



Obr. 6.17: Porovnání řídicích algoritmů pro 2. výstup zjednodušeného modelu.



Obr. 6.18: Porovnání řídicích algoritmů pro 3. výstup zjednodušeného modelu.

Je třeba si ale uvědomit, že v této fázi již sice docházelo k optimalizaci pozice zářičů vůči výrobní formě respektive termočlávkovým čidlům, ale ještě zdaleka nebylo dosaženo

optimálního stavu poloh zářičů a čidel. To mělo za následek poměrně velké překmity teplot na některých čidlech, a tím poměrně často docházelo k dosažení kritické teplotní hranice, při které musel být systém ohřevu nouzově odstaven. Proto bylo nutno přistoupit k modifikaci řídicího systému, jenž měl potlačit tento mezní stav. Tato modifikace je pak popsána v následující kapitole 6.6.1.

6.6.1 PID regulátor s kooperací

Jak již bylo řečeno, vzhledem k problematice dosažení optimálního stavu nastavení zářičů vůči teplotním čidlům docházelo na teplotním poli výrobní formy k poměrně výrazným překmitům při náběhu teplot na žádanou hodnotu. Bylo to díky tomu, že dodavatel výrobní formy udával maximální povolenou teplotu na lícové (výrobní) straně slushvací formy pouze 260°C. Nad touto hranicí tedy nebyla zaručena stálost povrchových vlastností výrobní formy. To mohlo v důsledku způsobit závažné a nevratné povrchové vady výrobní formy potažmo finálního produktu, jako je například nestejná lesklost a strukturu povrchu na PVC kůži. Vzhledem k obavám z tohoto poškození výrobní formy bylo přistoupeno k aplikaci některých opatření, aby bylo možno poškození formy zabránit. V první řadě bylo aplikováno nouzové odstavení ohřevu v případě dosažení kritické teploty 260°C. Dále pak bylo přistoupeno k opatření, které se při regulaci teplotního pole vypořádá s takto velkým teplotním překmitem při náběhu na žádanou hodnotu činící 210°C až 230°C.

Jelikož k lokálním přehřevům dochází na místech, která dosáhnou žádané hodnoty výrazně rychleji, než místa v jejich okolí, bylo nutno tuto rychlost ohřevu plošně vyrovnat. Tyto rozdíly rychlostí ohřevu jednotlivých částí jsou způsobeny nevhodným rozložením zářičů vůči složitému tvaru povrchu formy. Při daném uspořádání zářičů pak není možné dosáhnout rovnoměrného rozložení intenzity dopadajícího záření po celém povrchu formy bez dalšího zásahu. Je vlastně nutno řídit jednotlivé zářiče tak, aby se intenzita „homogenizovala“, a tím bylo také zajištěného rovnoměrného ohřevu na celém povrchu.

To by bylo možné dosáhnout seřízením jednotlivých regulačních smyček na stejnou rychlost náběhu. To však vede ke komplikovanému návrhu regulátoru, který musí zahrnout i potlačení vlivu křížových vazeb jednotlivých zářičů na více čidel. Tato problematika je pak popsána v kapitole 4. Daleko jednodušší a přitom postačující se ukázala varianta druhá, která vytváří kooperaci mezi jednotlivými smyčkami a při stejném nastavení regulátoru pro všechny regulační smyčky dosahuje přijatelných výsledků. Tato kooperace je pak vytvořena prostřednictvím žádaných hodnot teploty povrchu výrobní formy, které se pro jednotlivé

smyčky mění v závislosti na aktuální dosažené teplotě na jednotlivých čidlech. Tato metoda kooperace řízení je pak popsána v dalším textu.

Kooperativní algoritmus řízení pracuje tím způsobem, že pro matici regulátorů, která je pro řízení zvolena v diagonálním tvaru, jak je uvedeno výše, jsou upravovány jednotlivé žádané hodnoty. Řídicí systém je ve tvaru

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(s) &= \mathbf{G}_R(s) \cdot \mathbf{u}(s) \\ \mathbf{u}(s) &= \mathbf{R}(s) \cdot (\mathbf{w}_u(s) - \mathbf{y}(s)) \end{aligned} \quad (6.18)$$

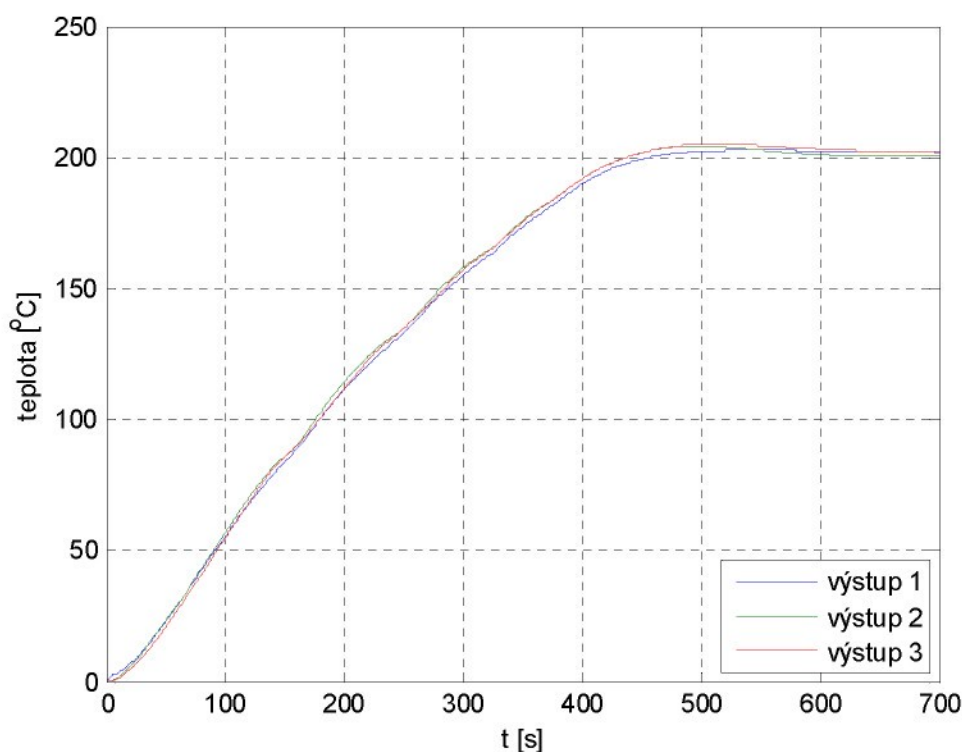
kde $\mathbf{G}_R(s)$ je matice přenosů reálného systému ohřevu, $\mathbf{y}(s)$ je vektor Laplaceových obrazů výstupních teplot, $\mathbf{u}(s)$ je vektor Laplaceových obrazů akčních veličin, $\mathbf{R}(s)$ je diagonální matice obrazových přenosů regulátorů PID a $\mathbf{w}_u(s)$ je vektor Laplaceových obrazů upravených žádaných hodnot teploty povrchu výstupní formy.

$$\mathbf{R}(s) = \begin{pmatrix} R_1(s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2(s) & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & R_N(s) \end{pmatrix}, \mathbf{w}(s) = \begin{pmatrix} w_1(s) \\ w_2(s) \\ \vdots \\ w_N(s) \end{pmatrix}, \mathbf{y}(s) = \begin{pmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ \vdots \\ y_N(s) \end{pmatrix} \quad (6.19)$$

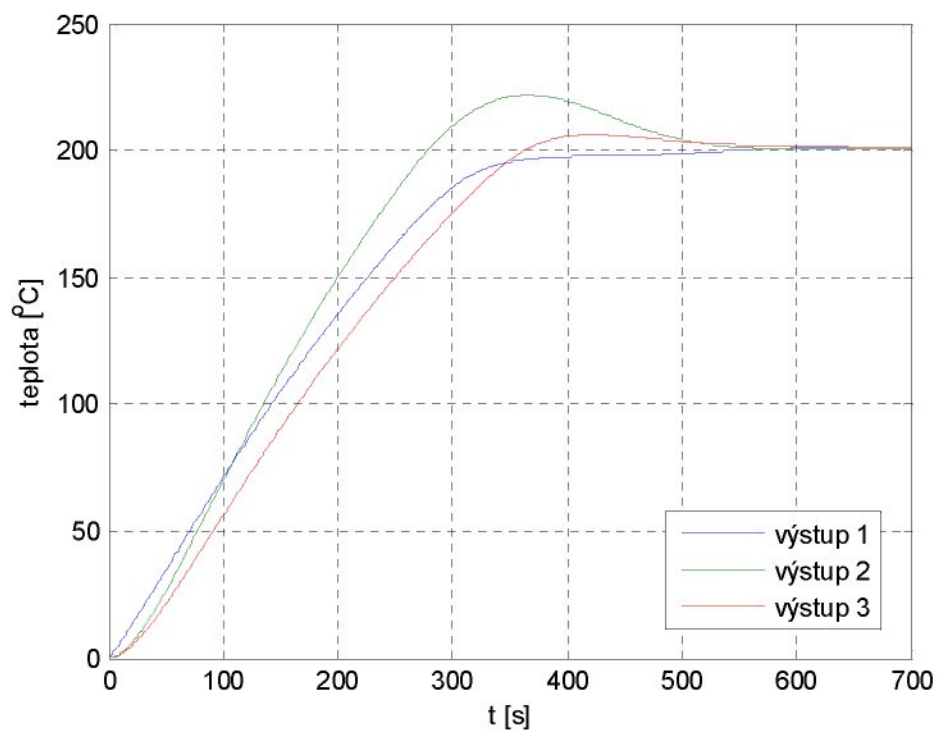
Celý kooperativní algoritmus pak pracuje na principu vyhledání částí povrchu formy, tedy teplot čidel na regulačních smyčkách, které nevyhovují požadavkům na homogenitu v průběhu náběhu na žádanou hodnotu, jenž je dána vlastnostmi spékaného materiálu a u těchto oblastí respektive regulačních smyček, které zajišťují ohřev dané oblasti, je změněna žádaná hodnota.

Řekněme tedy, že požadavek na homogenitu teplotního pole výrobní formy, která je vyhřívána na danou teplotu, je aby všechny regulované teploty se od sebe neodchýlily více jak o $\Delta^\circ\text{C}$. V každé sérii vzorků z teplotních čidel formy je tedy vyhledána maximální a minimální teplota $y_{\min}$ a $y_{\max}$. Je-li potom splněna podmínka $|y_{\min} - y_{\max}| \geq \Delta$, pak je aktivován kooperační algoritmus. Ten pro regulační smyčky, pro jejichž regulovanou teplotu je splněno $y_i \geq y_{\min} + \Delta$, upraví žádanou hodnotu w_i na $w_i = y_{\max}$. Pro ostatní regulované smyčky, pro které platí $y_{\min} + \Delta \geq y_i \geq y_{\min}$, zůstane zachována globální žádaná hodnota ustálené teploty $w_i = w$, která je dána technologem. To zajistí, že teploty, které se příliš rychle blíží žádané hodnotě ustáleného stavu, jsou dostatečně zpomaleny, aby nevznikl příliš veliký překmit teplot povrchu formy, a zároveň náběh bude dostatečně rychlý. V počátečních případech byla žádaná hodnota měněna na hodnoty $w_i = y_i$ nebo $w_i = y_{\min} + \Delta$, to však mělo za následek sice více vyhlazené překmity na poli teplot, ale náběh na žádanou hodnotu byl příliš pomalý. V okamžiku, kdy je dosaženo globální žádané hodnoty, je kooperační algoritmus vypnut trvale.

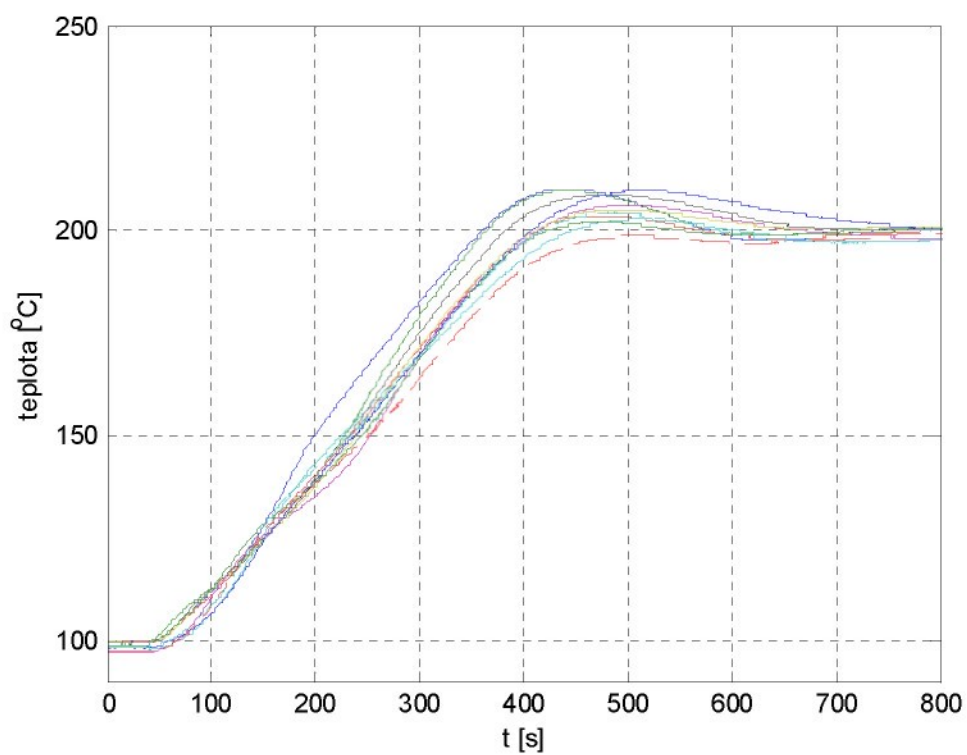
Průběh regulovaných veličin je pak vidět na následujících dvou obrázcích. Na Obr. 6.19 je ukázán průběh teplot regulačního pochodu při použití regulačního algoritmu s kooperací na zjednodušeném systému. Na Obr. 6.20 je pak pro srovnání zobrazen průběh teplot na zjednodušeném systému s použitím PID regulátorů bez kooperace. Na nich je vidět že algoritmus řízení s využitím kooperace velmi dobře potlačuje veliké překmity při náběhu na požadovanou hodnotu teploty povrchu formy. Na obrázcích Obr. 6.21 a Obr. 6.22 je pak vidět ověření algoritmu na reálném systému ohřevu. Je vidět opět potlačení překmitu při náběhu zhruba na čtvrtinu. Je ale také zřejmé, že dochází k prodloužení času náběhu na žádanou hodnotu, ale s tím se předem počítalo. Takže můžeme říci, že v před-sériové výrobě je možno tento algoritmus použít, ale pro sériovou výrobu je z hlediska rychlosti nepoužitelný. To znamenalo, že bylo nutno pro další vývoj dále optimalizovat rozložení čidel a zářičů, čímž bylo dosaženo rychlejšího výrobního cyklu.



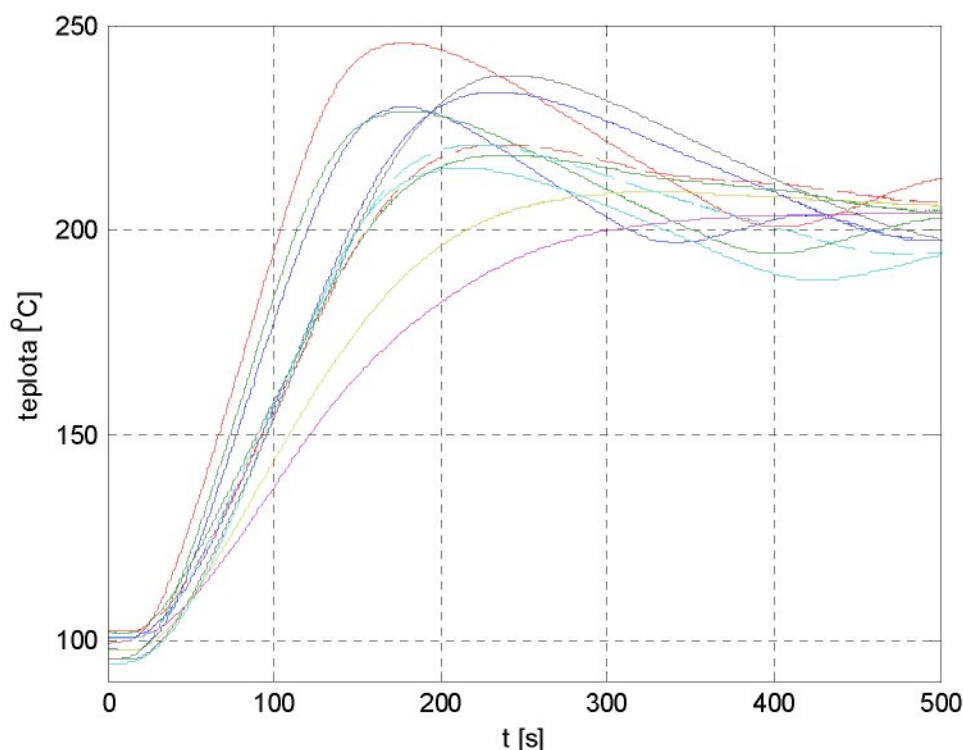
Obr. 6.19: Průběh regulované teploty zjednodušeného systému s použitím regulačního algoritmu s kooperací.



Obr. 6.20: Průběh regulované teploty zjednodušeného systému bez použití regulačního algoritmu s kooperací.



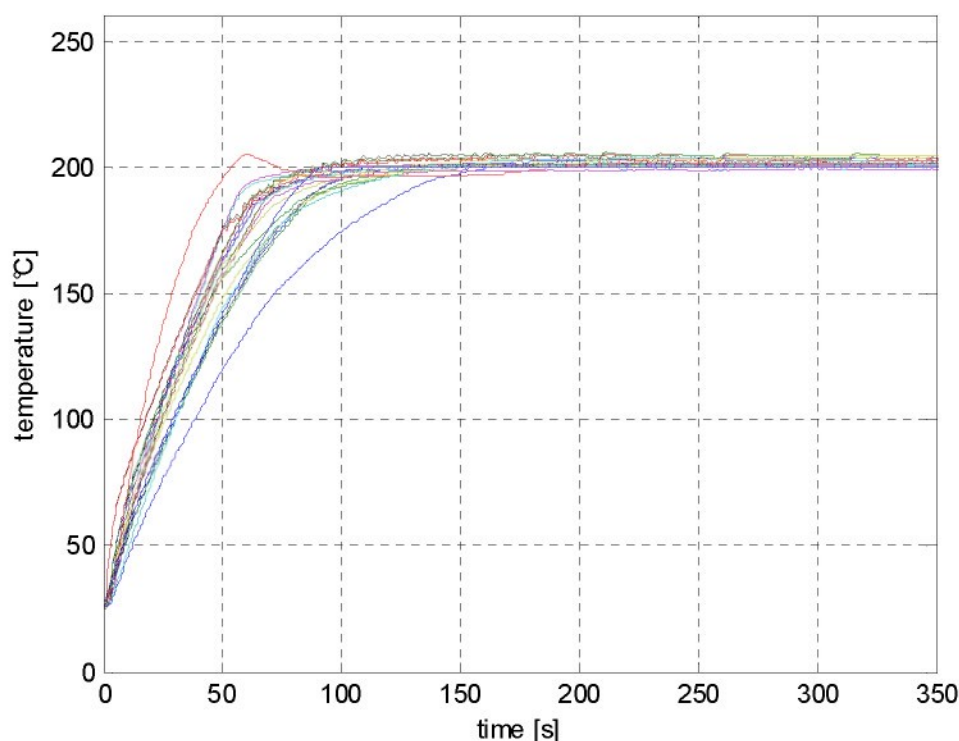
Obr. 6.21: Průběh teplot na reálném systému při použití algoritmu regulace s kooperací.



Obr. 6.22: Průběh teplot na reálném systému bez použití algoritmu regulace bez kooperací.

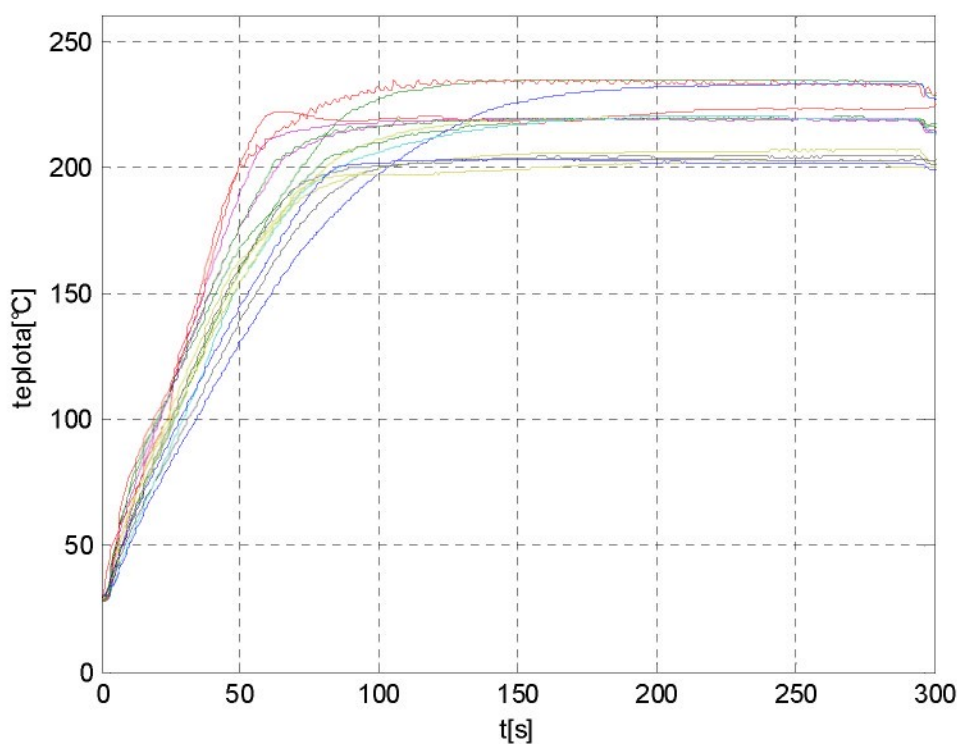
6.6.2 PID regulátor bez kooperace

V poslední fázi, ve které probíhala příprava na sériovou výrobu a optimalizace PVC syntetických kůží již byla optimalizací specializovaným dodavatelem, zlepšena pozice lamp a jejich rozložení vůči povrchu formy respektive čidlům. Z tohoto důvodu bylo možno vypustit kooperační přístup k úpravě regulačního pochodu a bylo možno přistoupit k použití regulačního algoritmu, který byl vybrán na začátku kapitoly 6.6. V něm bylo použito několik nastavení PID regulátorů, které byly přiděleny jednotlivým regulačním smyčkám podle jejich dynamických a statických parametrů jako jsou časová konstanta soustavy nebo statické zesílení. Celkem byly po identifikaci rozděleny regulační smyčky podle vlastností regulovaného systému do čtyř skupin a to na rychlé a pomalé a tyto dvě skupiny dále ještě na dvě podskupiny a to s velkým a malým statickým zesílením. Regulační pochod některých teplot je pak vidět na následujícím obrázku, kde byla žádaná hodnota nastavena na 200°C.



Obr. 6.23: Průběh vybraných teplot regulačního pochodu na reálné soustavě.

Při postupné opalizaci se ale ukázalo, že vzhledem k nestejně tloušťce výrobní formy nejsou na lícové (výrobní) straně formy na některých místech dostatečné teploty, respektive není naakumulována dostatečná tepelná energie, která dokáže dostatečně spéct práškový materiál. Tím docházelo zejména k vytváření pórů na lícové straně výrobků, což bylo nepříjemné. To bylo také důvodem proč používat více žádaných hodnot pro teploty na různých místech, čehož bylo dosaženo mírnou úpravou na počítačovém řídicím systému, ale samotný regulační algoritmus mohl zůstat beze změny. Regulační pochod na reálném systému ohřevu je pak vidět na následujícím obrázku. Vybrané teploty jsou stejné jako na Obr. 6.23. Jsou zde zvoleny tři žádané hodnoty a to 200°C, 215°C a 230°C



Obr. 6.24: Průběh vybraných teplot regulačního pochodu na reálné soustavě pro tři žádané hodnoty.

6.6.3 Implementace PID regulátoru

Vzhledem k možnostem výrobní linky, která je řízena prostřednictvím PLC vybaveného ON/OFF výstupy, které ovládají spínací prvky spínající v nule (to byl i jeden z důvodů použití PID regulátoru), bylo rozhodnuto, že PID regulátor byl implementován jako dvoupolohový PID regulátor s interakcí. Ten je naznačen na Obr. 6.25. Jeho funkce pak zajistí dostatečnou aproximaci PID regulátoru. Tato aproximace je pak dána ve vztahu

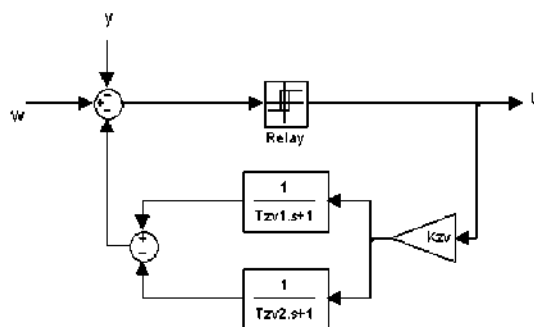
$$G_{PID}(s) \doteq \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{A}{1 + A \left(\frac{1}{T_{ZV1}s + 1} - \frac{1}{T_{ZV2}s + 1} \right) K_{ZV}}, \quad (6.20)$$

$$G_{PID}(s) = \frac{T_{ZV1}T_{ZV2}}{K_{ZV1}(T_{ZV2} - T_{ZV1})} \left(1 + \frac{T_{ZV1}T_{ZV2}}{T_{ZV2} + T_{ZV1}} s + \frac{1}{(T_{ZV2} + T_{ZV1})s} \right)$$

kde A je přenos dvoupolohového relé a K_{ZV} , T_{ZV1} a T_{ZV2} jsou konstanty dvoupolohového regulátoru s interakcí. Ze získaného vztahu je pak vidět, že parametry PID regulátoru je pak možné přepočíst na parametry dvoupolohového PID regulátoru s interakcí následovně podle vztahu (6.22). Předpokládáme-li parametry standardního spojitého PID regulátoru ve tvaru (6.21).

$$R(s) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) \quad (6.21)$$

$$K_{ZV} = \frac{1}{r_0 \sqrt{1 - 4(T_D / T_i)}}; T_{ZV1} = \frac{T_i}{2} (1 - \sqrt{1 - 4(T_D / T_i)}); T_{ZV2} = \frac{T_i}{2} (1 + \sqrt{1 - 4(T_D / T_i)}) \quad (6.22)$$



Obr. 6.25: Dvoupolohový regulátor s pružnou zpětnou vazbou.

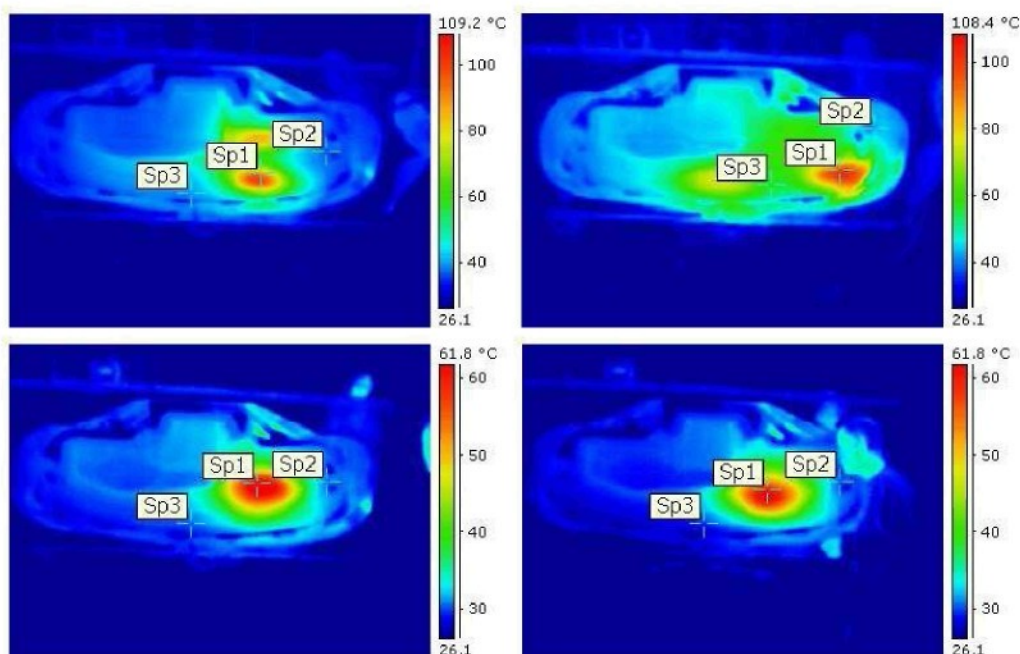
7 Regulační pochody při výrobním cyklu

Regulátor, jehož návrh a realizace je popsána v předchozí kapitole, byl následně použit na reálném systému ohřevu, který je součástí před-sériové linky pro výrobu umělých kůží pro automobilové interiéry. Tato kapitola se pak bude zabývat výsledky aplikace daného regulátoru na reálném systému ohřevu.

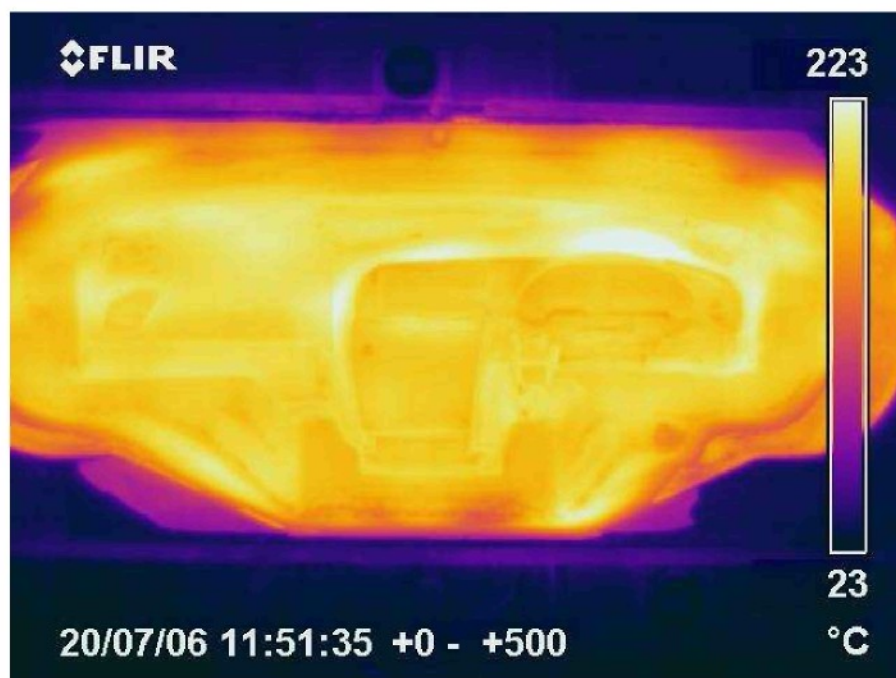
V první řadě je třeba si uvědomit, že pro výrobu kvalitní umělé kůže není až tak důležitá teplota na rubové „nepracovní“ straně formy, ale je rozhodující teplota na lícové straně formy, na kterou je při výrobě nanášen materiál, který je následně spékán. Problémem je ovšem skutečnost, že na lícové straně formy není možné teplotu měřit. To je důvod, proč je nutno při nastavení žádaných veličin, respektive při optimalizaci teplotního pole posuzovat teplotní pole lícové strany také podle kvality výsledného produktu. Splnění nebo nesplnění kvalitativních ukazatelů jakosti výrobku, je pak důvodem pro změny žádaných teplot na lici formy, což se realizuje prostřednictvím zadáváním rubových teplot v požadovaných mezích. Požadavky kvality si také vynucují změny technologických operací, jako je počet otočení, způsob reverzace, doba otáčení atd.

7.1 Vliv uspořádání zářičů ve výrobním cyklu

Jak bylo ukázáno v kapitole 4.4.4 rozložení teplotního pole formy je závislé na uspořádání zářičů vůči výrobní formě a je to vidět i z následujících obrázků. Na Obr. 7.1 je vidět jak velkou plochu ovlivňuje jeden zářič. Je zde vidět vliv hned čtyřech sousedních zářičů a můžeme zde vidět jak se právě teplotní pole, která jsou každým z nich ohřívána, překrývají. Na dalším obrázku Obr. 7.2 je pak vidět teplotní pole snímané termokamerou, které je dosaženo regulací na pracovní teplotu výrobní formy. Na některých místech je zde pak jasně vidět, že na formě vznikají v důsledku nevhodného usprádání lamp, zejména v mezerách mezi nimi, studená místa, která vedou k nedostatečnému spečení práškového polotovaru.



Obr. 7.1: Vliv jednotlivých zářičů na teplotu výrobní formy.

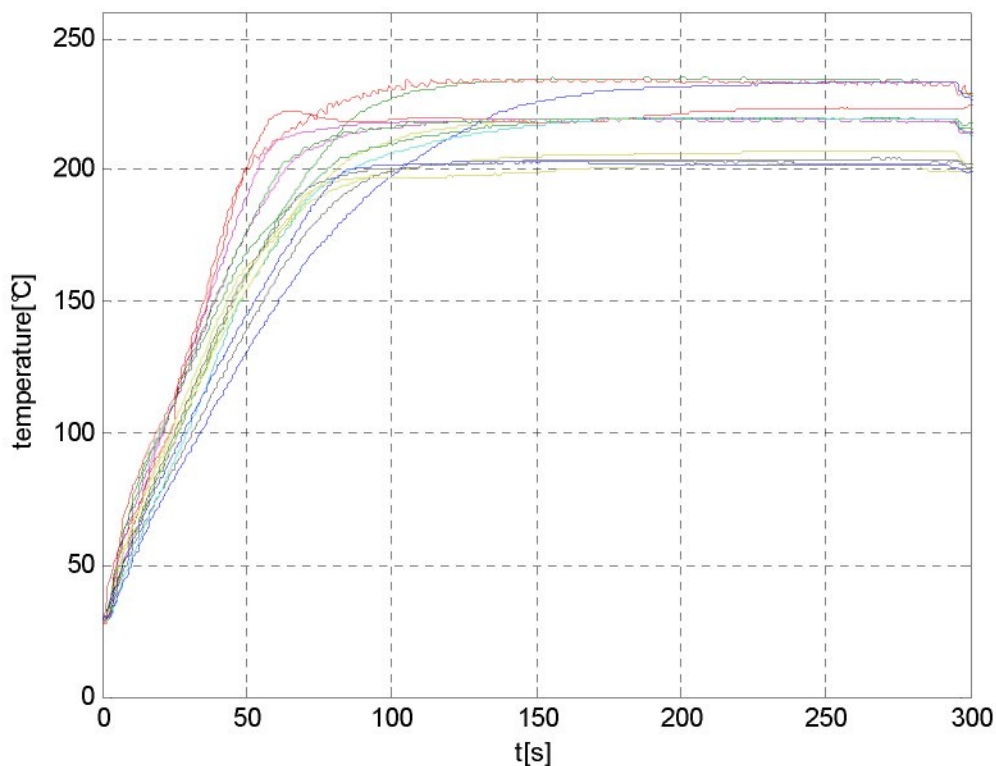


Obr. 7.2: Pohled termokamerou na vyhřátou výrobní formu.

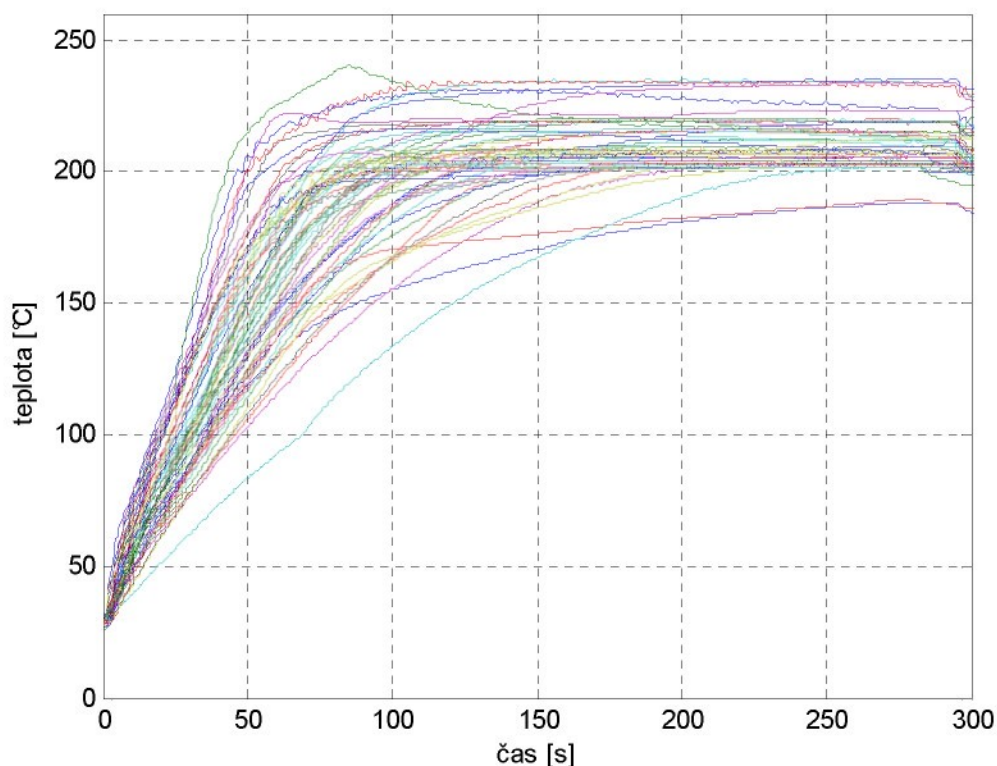
7.2 Lokální řízení teploty líce formy podle rubové strany formy

Jak již bylo řečeno, je nutno teplotní pole na lícové straně výrobní formy optimalizovat podle rozdílných teplot v různých místech na rubové straně výrobní formy. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k úpravě algoritmu v řídicím počítači, který umožňoval nastavení rozdílných požadovaných teplot v různých místech výrobní formy. Tedy lépe

řečeno, tento algoritmus pracuje s tím, že ke každé lampě je přiřazeno jedno čidlo s vlastní regulační smyčkou, což nám umožňuje nastavit pro každou lampu rozdílnou požadovanou hodnotu. Změny teploty na daném čidle se pak dosáhne pouze v případě, že bude nastavené stejné snížení pro všechny lampy, které jsou ovládány daným čidlem. To je pak vidět na Obr. 7.3, kde je pro několik čidel nastavena rozdílná požadovaná teplota. To má za následek, že můžeme v omezené míře na vybraných místech udržet odlišnou teplotu než v jiných místech výrobní formy. Na Obr. 7.4, je pak vidět pro toto nastavení průběh všech regulovaných teplot. Zde je vidět, že některé teploty mají velice pomalý náběh. Toto je způsobeno konstrukčním omezením při umisťování zářičů, což má za následek nedostatečný přísun tepelné energie do daného místa.



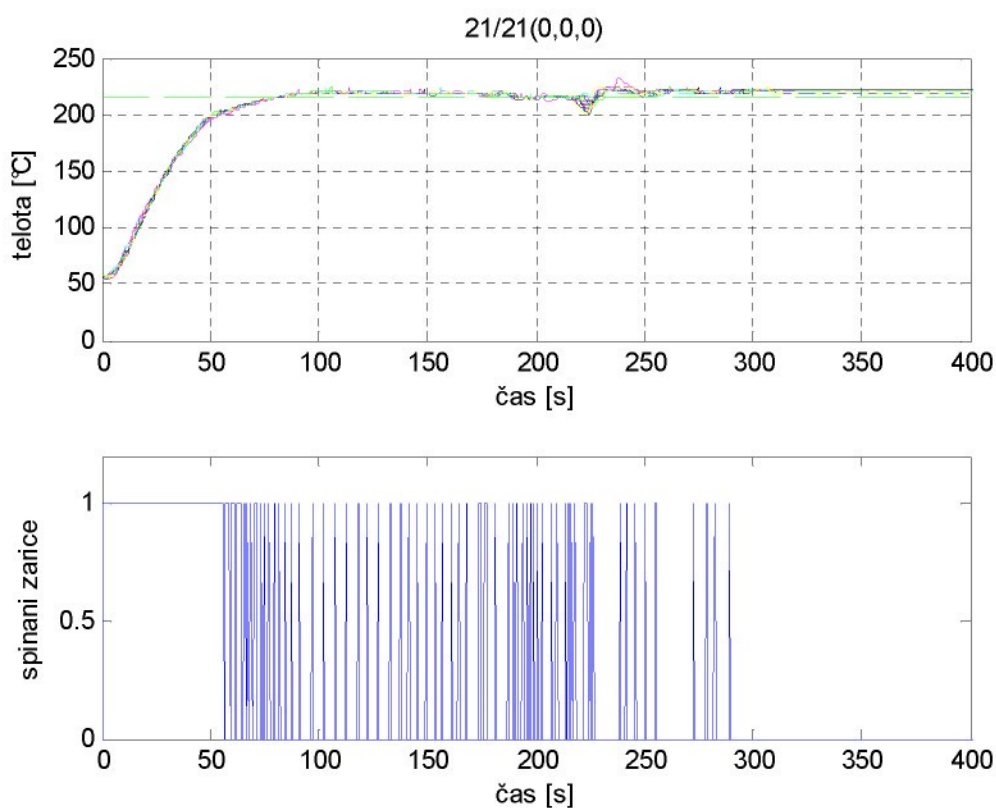
Obr. 7.3: Průběh na několika čidlech pro různé žádané hodnoty.



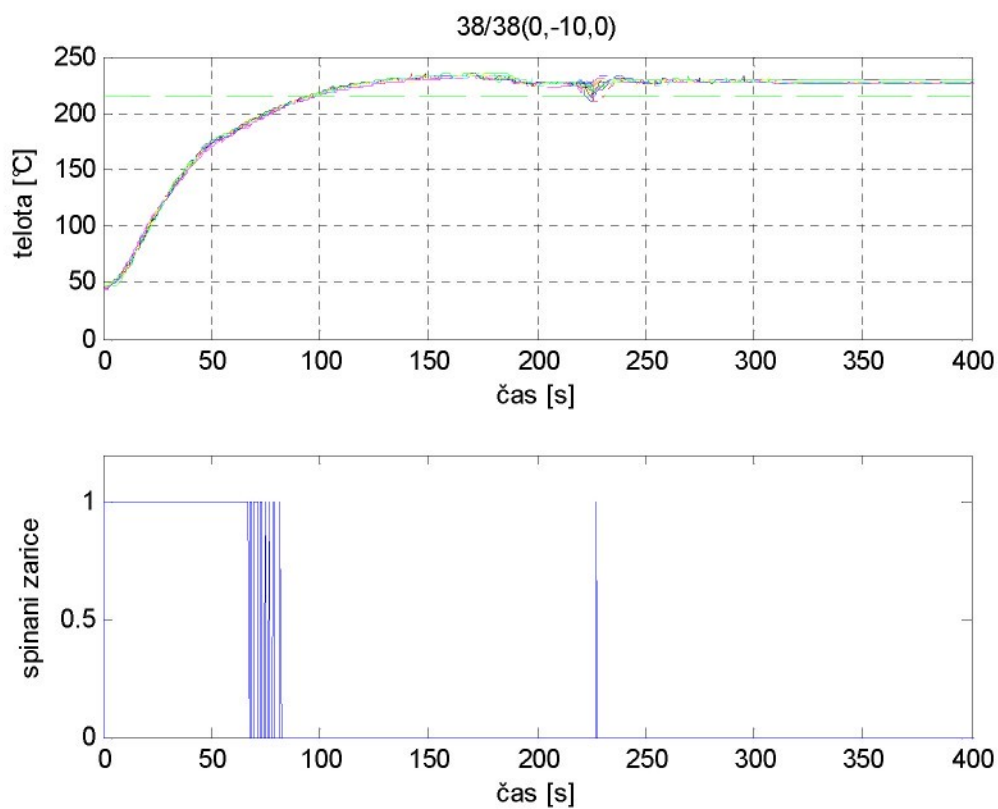
Obr. 7.4: Teploty všech čidel v regulaci pro různé žádané hodnoty.

V opačném případě, tedy že nejsou pro danou množinu světel, která je řízena stejným čidlem, přiřazeny stejné žádané hodnoty teploty, je regulováno na nejvyšší žádanou teplotu. Rozdíl je ovšem v tom, že některá světla začnou dříve redukovat svůj vyzařovaný výkon a tím dochází k omezení přehřátých míst v prostoru mezi čidly, kam jsou tato světla nasměrována. Některé vzorové případy jsou ukázány na následujících obrázcích. Na Obr. 7.5 je vidět případ, kde je nastavena žádaná hodnota na 220°C. V horní části obrázku je vidět průběh teploty na čidle 21, která je snímána ve dvaceti sedmi po sobě jdoucích výrobních cyklech. Odchylka žádané hodnoty je zde nastavena jako nulová. Ve spodní části je pak vidět průběh spínání zářiče, který je k tomuto čidlu přiřazen. Na Obr. 7.7 je pak vidět případ, kdy jsou k jednomu teplotnímu čidlu přiřazeny dva zářiče. Pro jednu regulační smyčku je pak žádaná hodnota teploty nezměněná a pro druhou regulační smyčku byla žádaná hodnota snížena o 10°C. Na spodní části je pak vidět, že zářič v první smyčce standardně reguluje na žádanou hodnotu, ovšem druhý zářič snižuje svůj výkon při daleko nižší teplotě. Tato teplota je pak dána změnou požadovanou teplotou. Zde je třeba si uvědomit, že takováto změna teploty není absolutní (tedy nenastaví přímo změnu teploty povrchu, která je do značné míry závislá také na okolních teplotách), ale je pouze nástrojem ke změně vyzařovaného výkonu zářičů

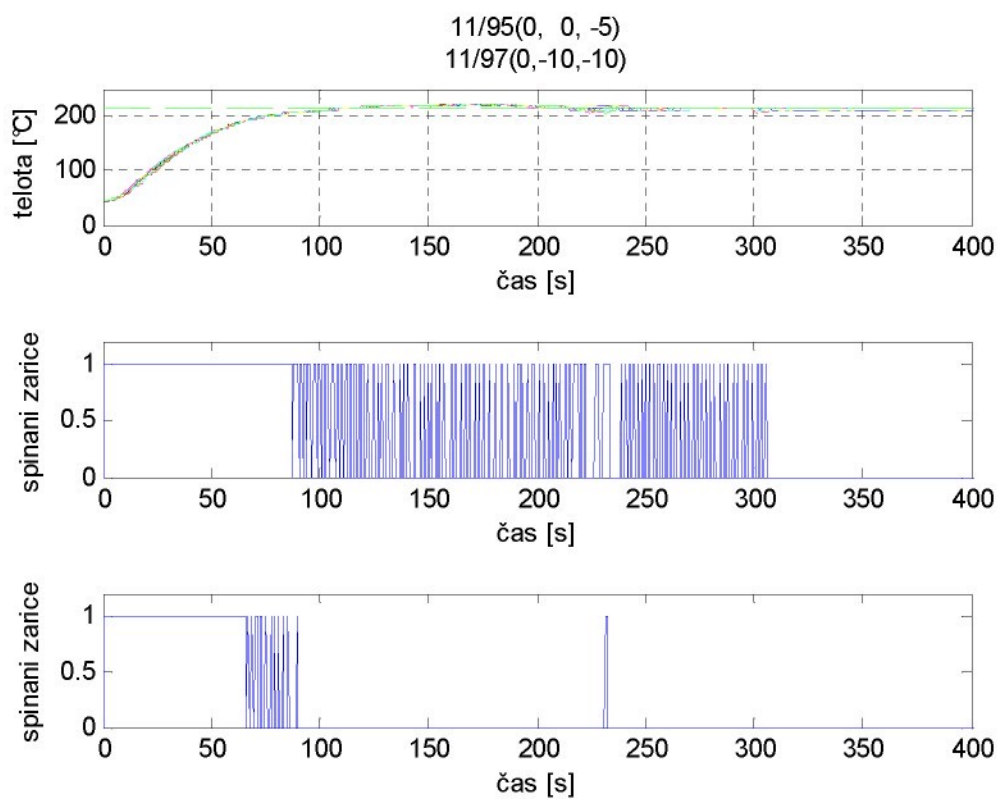
v průběhu výrobního cyklu a má za cíl pouze optimalizaci kvality výrobku. Na Obr. 7.6 je pak vidět tento případ, kdy je teplota v regulační smyčce snížena o 10°C . Daný zářič, který je s daným teplotním čidlem přiřazen do jedné regulační smyčky (dané čidlo není přiřazeno do jiné smyčky) pak jak je vidět ve spodní části obrázku sníží svůj výkon, přesto je však na průběhu teploty vidět, že teplota na čidle dále narůstá. To je zapříčiněno vlivem okolních zářičů na dané čidlo. Tyto vlivy již byly diskutovány v předcházejícím textu. Zde je třeba si uvědomit, že pro takovéto nastavení teplot není v první řadě důležitá měřená teplota rubové strany formy, která má v podstatě pouze orientační charakter. Důležitá je pouze kvalita výrobku, které je nutno tuto teplotu přizpůsobit.



Obr. 7.5: Průběh teploty a spínání zářiče v několika cyklech.



Obr. 7.6: Průběh teploty a spínání zářiče v několika cyklech. Žádaná hodnota je zde snížena o 10°C.

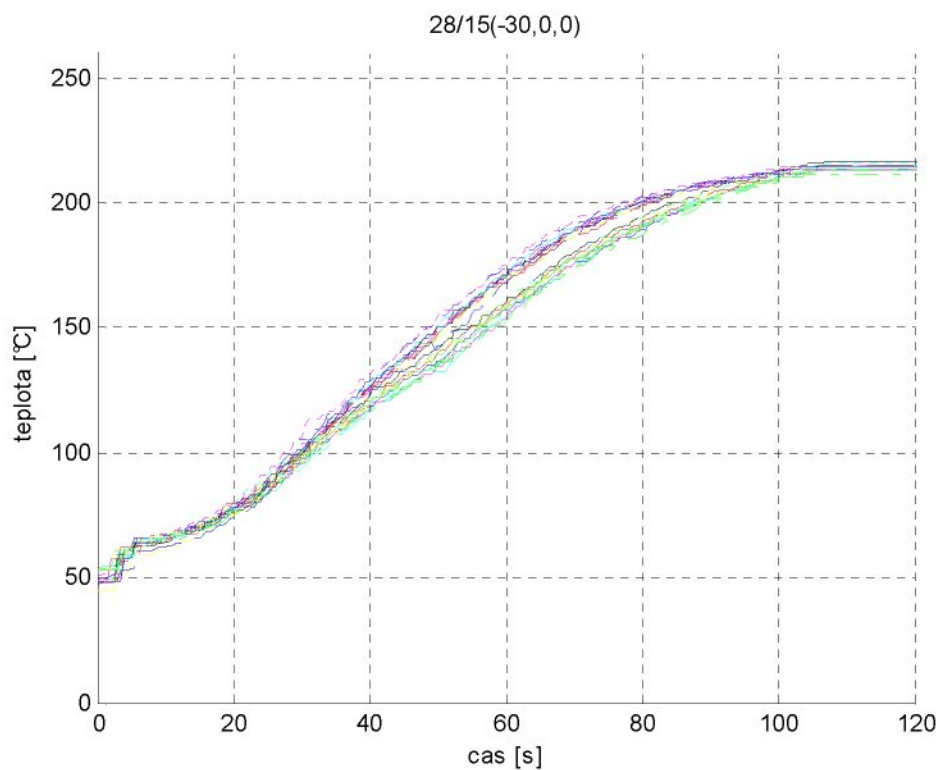


Obr. 7.7: Průběh teploty na čidle, které je použito pro řízení dvou zářičů.

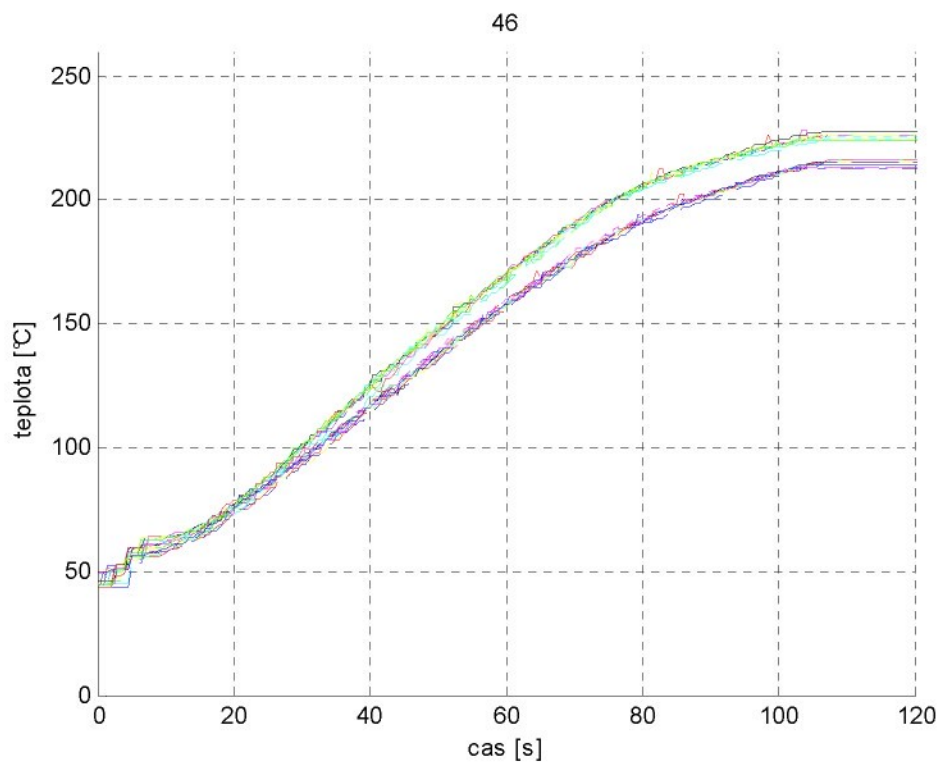
7.3 Stabilita výrobního cyklu

Při přípravě technologických zařízení pro hromadnou výrobu se prokazuje takzvaná „Stabilita výrobního cyklu“, kterou bylo nutno prokázat. Podstata tohoto pojmu spočívá v opakovatelnosti výrobního procesu při zachované kvalitě produkce. Výrobní proces ovlivňují zejména okolní podmínky (teplota v hale, celkový ohřev výrobní linky, materiálů a komponent a medií, ohřev chladicí vody, prášku atd.) a stav výrobní technologie. Z hlediska řízení a regulace to znamená, že se při opakované výrobě zachovávají požadavky na rozložení teplotních polí. „Stabilita ohřevů“ je dokumentována na Obr. 7.8 a Obr. 7.9.

Data jsou získána z třiceti dvou po sobě jdoucích cyklů na výrobním zařízení, které umožňuje současně používat více výrobních forem stejného typu, což značně urychluje výrobu. Na Obr. 7.8 je vidět průběh cyklu vyhřívání výrobní formy pro zmíněný počet cyklů. Byly použity dvě výrobní formy stejného typu, ovšem je zde na první pohled patrné, že průběh teplot probíhá ve dvou různých trendech. Tyto rozdíly jsou dány hlavně tím, že rubový černicí nátěr výrobní formy je nestejné kvality. V průběhu času totiž v závislosti na intenzitě používání černění postupně ztrácí svoje původní vlastnosti. Jak je vidět na Obr. 7.8, tak na regulovaném čidle to nepředstavuje až takový problém. Působením regulátorů se totiž daří výslednou teplotu po ohřevu držet na stejné hladině. Ovšem jak je vidět na Obr. 7.9, tak na čidle, které není přiřazeno do regulační smyčky, může docházet k odchylce teploty v závislosti na použité formě a tím může docházet také k rozdílné kvalitě finálních výrobků. Proto je nutno stav každé výrobní formy sledovat a udržovat v přijatelných mezích. Je také potřeba brát v úvahu, že průběh regulace může být ovlivněn okolními podmínkami, jako jsou třeba teplota ve výrobní hale, teplota chladicí vody a mnoho dalších.



Obr. 7.8: Teploty v několika cyklech při použití dvou výrobních forem (regulované čidlo).

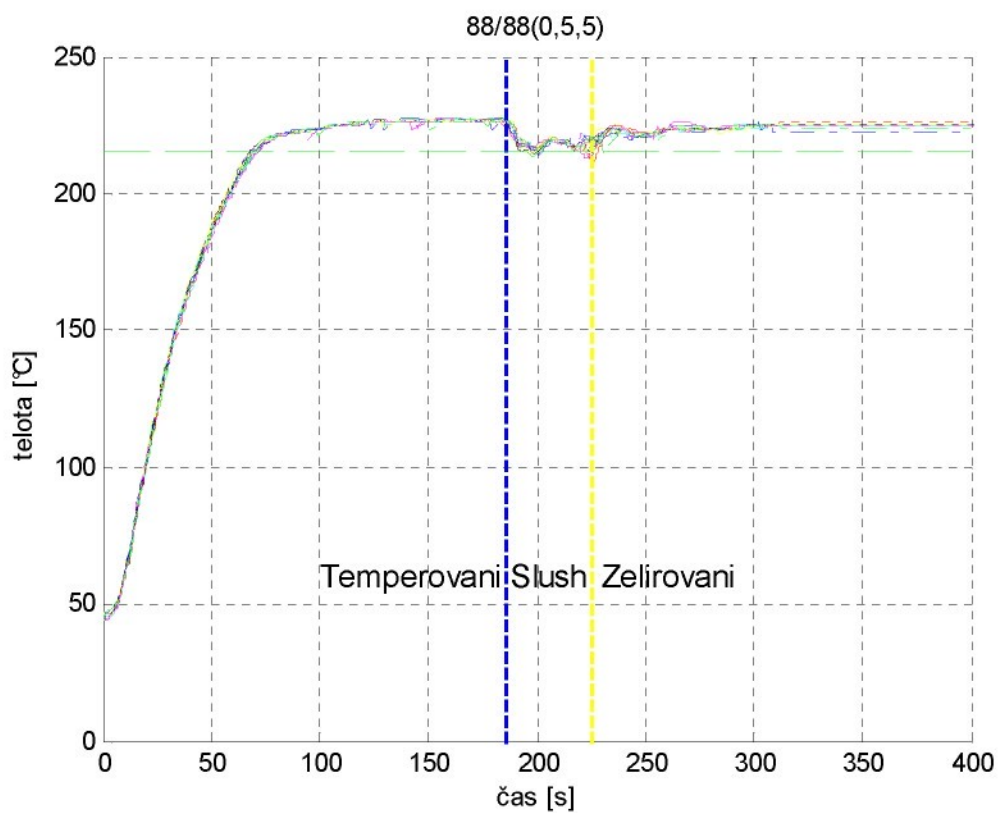


Obr. 7.9: Průběh teploty v několika cyklech při použití dvou výrobních forem (neregulované čidlo).

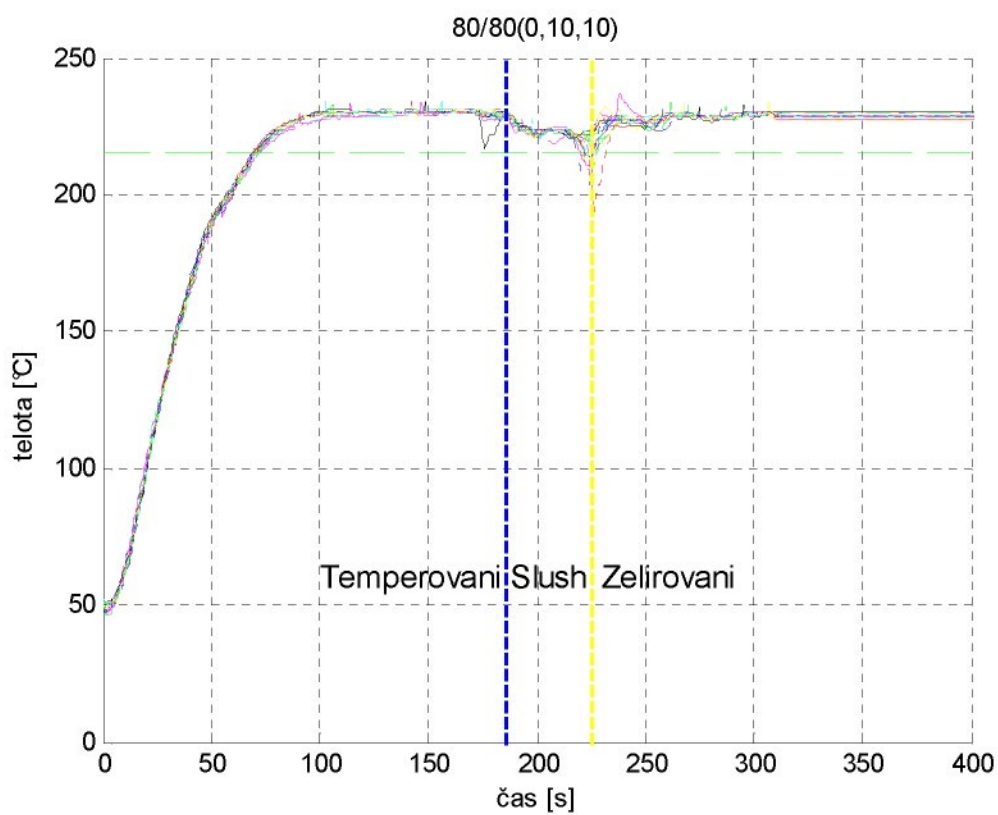
7.4 Průběh teplot na čidlech v jednotlivých fázích výrobního cyklu

Výrobní cyklus, jak již bylo řečeno, se skládá z jednotlivých fází. V našem případě se budeme zabývat pouze těmi, při kterých dochází k ohřevu formy. Nejprve je třeba výrobní formu vyhřát na požadovanou teplotu, při které na ni bude nanesen práškový materiál. Tuto první fázi můžeme nazvat jako „temperování“. V druhé fázi při takzvaném „slushování“ dochází k nanesení práškového materiálu na výrobní formu. Již v této fázi je prášek nutno částečně natavit, aby došlo k „nalepení“ dostatečného množství materiálu, které zajistí náležitou tloušťku finálního výrobku. V poslední fázi pak dochází ke spečení materiálu do jednolitě vrstvy a nazýváme ji „želirování“. Jednotlivé výrobní cykly jsou pak naznačeny na Obr. 7.10, Obr. 7.11, Obr. 7.12 a Obr. 7.13 jak pro regulovaná čidla, tak pro čidla kontrolní.

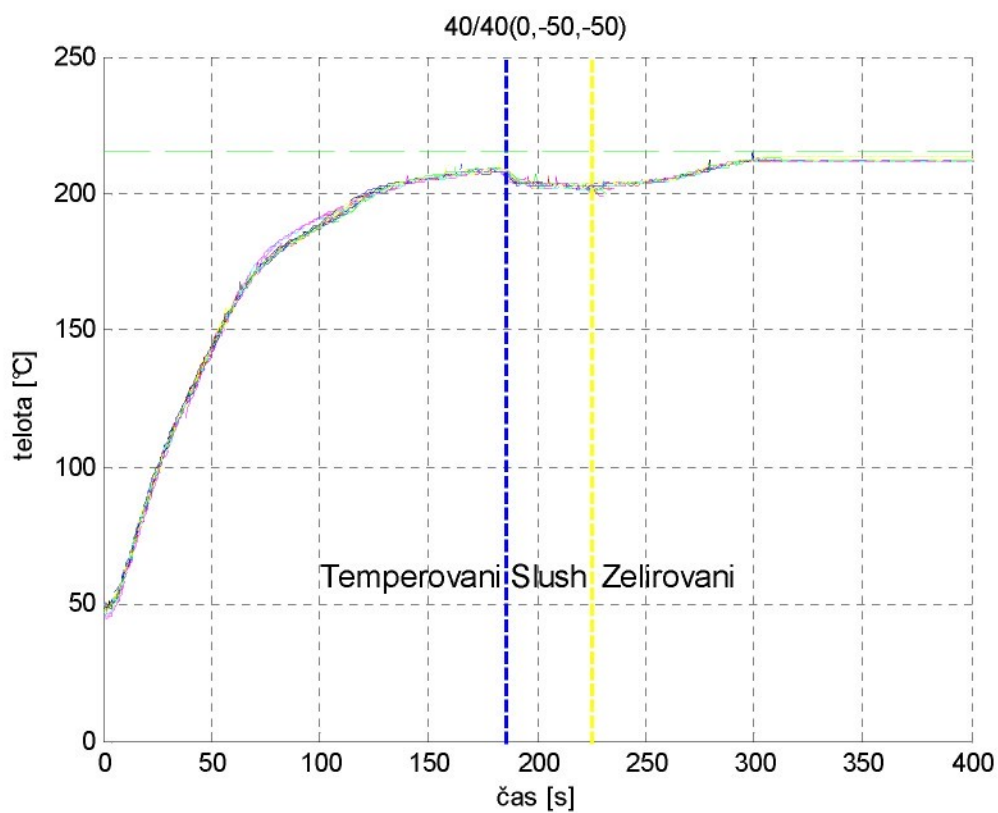
Ve fázi temperování je nutno formu co možná nejrychleji zahřát na teplotu, která je definována technologickými požadavky. Ve druhé fázi, kdy je na výrobní formu nasypán práškový termoplastický materiál, je na obrázcích zřetelně vidět pokles teploty. Ten je dán spotřebovávanou energií pro natavení prášku. Je třeba si uvědomit, že teplota prášku je cca 30°C a k jeho natavení dochází kolem 200°C. Tato fáze je tedy velmi citlivá na zachování dostatečně vysoké teploty, aby se prášek dostatečně natavil a zůstal přichycen v dostatečném množství. V poslední fázi „želirování“ je nutno zajistit dostatečný přísun energie, aby došlo k dokonalému slinutí práškového materiálu do jednolitě vrstvy a výrobek měl požadované parametry. V případě, že by bylo dodáno energie málo, mohlo by dojít na lícové straně výrobku k výskytu pórů, které ruší vizuální dojem výrobku. Ze strany rubové by pak docházelo k nespečení materiálu, což by mělo za následek problémy při dalším zpracování. Ve vnitřní struktuře výrobku by pak mohlo dojít k vytvoření jakýchsi bublinek, které by měly za následek výrazné zhoršení mechanických vlastností produktu. Na druhé straně při dodání příliš velkého množství energie by mohlo dojít k zažloutnutí povrchu výrobku a tím k jeho znehodnocení. Proto je nutné dodávat energii v přiměřených dávkách, což zabezpečuje vhodná volba řídicího mechanismu systému ohřevu.



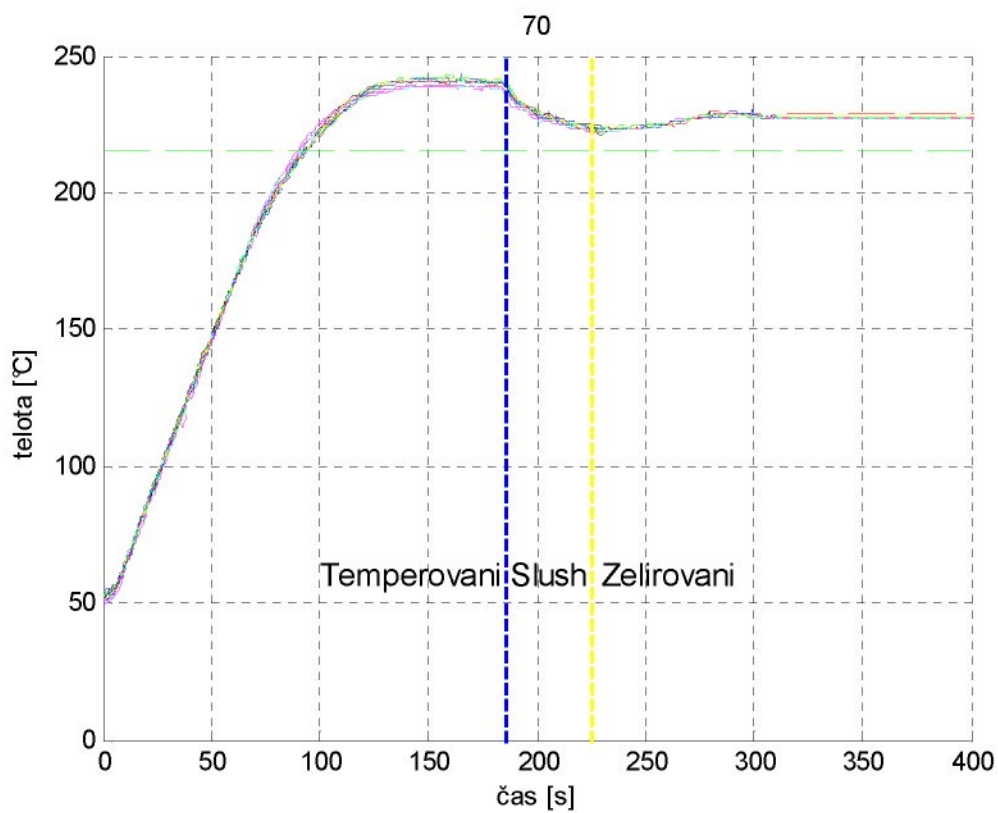
Obr. 7.10: Fáze cyklu pro čidlo s regulací.



Obr. 7.11: Fáze cyklu pro čidlo s regulací.



Obr. 7.12: Fáze cyklu pro čidlo s regulací.



Obr. 7.13: Fáze cyklu pro čidlo bez regulace.

8 Shrnutí výsledků

Tato disertační práce pojednává o řízení teplotního pole pro výrobu umělé kůže technologií *slush moulding*. Klíčovým problémem této technologie se ukázalo, stejně jako u jiných technologií zpracování plastů, optimální teplotní pole. V tomto případě je rozhodující teplotní pole výrobní formy, na kterou je nanášen termoplastický práškový materiál, který se za působení tepla speče do souvislé vrstvy. Z hlediska mnoha faktorů bylo použito pro ohřev takovéto výrobní formy infračervené záření. Tato volba má celou řadu pozitiv. Jednak není třeba například nijak hospodařit s topnými médii, jako například u minerálních olejů nebo horkého písku, a navíc výsledný rozměr stroje bude daleko menší. Tento způsob však sebou přináší i různé komplikace, jako je například nutnost „plošného“ měření teploty, nebo v důsledku použití mnoha infračervených zářičů, jejichž poloha je přizpůsobena tvaru výrobní formy, v této práci řešené řízením rozsáhlých MIMO systémů. Zde je nutno zmínit, že nebylo nikde v literatuře nalezeno použití takto složité soustavy infračervených zářičů, natož realizace řízení takto rozsáhlého a komplikovaného MIMO systému v praxi.

V počátečních fázích vývoje byl z důvodů možnosti snadnější volby struktury regulačního obvodu a následné syntézy, ověření a výběru optimálního řídicího algoritmu sestaven zjednodušený simulační model, který je popsán v kapitole 5. Tento model byl sestaven na základě naměřených dat, na která byla uplatněna parametrická identifikace, jenž má za výsledek parametrický model systému ohřevu ve formě matice obrazových přenosů.

Na základě získaného matematického modelu byla jednak na experimentálním a pak i na prototypovém výrobním zařízení vypracována metodika, popsaná v kapitole 5.4, která umožňuje jednak zvolit optimální strukturu regulačního obvodu, respektive přiřazení vhodných zářičů a teplotních čidel do regulačních smyček. Toto by mělo výrazně zkrátit přizpůsobení řídicího algoritmu novému sortimentu nebo aplikaci navrženého algoritmu řízení na jiný technologický problém. Na základě takto vytvořeného matematického modelu je pak možno formulovat a následně také částečně ověřit podmínky dosažitelnosti nebo regulovatelnosti takto rozsáhlého MIMO systému, popsané v kapitole 4.5. Tato navržená metodika se pak doplňuje s metodikou pro optimalizaci nastavení zářičů a čidel vůči výrobní formě, která je vyvíjena firmou LENAM. V kapitole 5.4 je pak popsáno, jak postupná optimalizace rozložení zářičů usnadňuje volbu struktury regulačního obvodu a také kvalitu teplotního pole výrobní formy.

Pro samotnou regulaci bylo na části zjednodušeného simulačního modelu, který vycházel z identifikace vlastností reálného systému, navrženo a teoreticky odzkoušeno několik řídicích algoritmů, jejichž použití se uvažovalo pro takto rozsáhlý MIMO systém, který je tvořen systémem ohřevu výrobní formy vyvíjené linky. Popis jednotlivých algoritmů lze nalézt v kapitole 6. Bylo zde diskutováno několik centralizovaných i decentralizovaných algoritmů řízení, ze kterých se podle daných požadavků zadavatele vybral jeden. Je nutno říci že výběrové kritérium bylo nastaveno zejména podle možného vybavení pro implementaci algoritmu na danou výrobní technologii. Další součástí kritéria pro výběr daného řídicího systému bylo také nutno přihlídnout ke složitosti návrhu takového regulátoru. Na základě těchto požadavků pak bylo vybráno řízení pomocí soustavy jednotlivých PID regulátorů, kterým bylo v krajních případech (neoptimální rozmístění zářičů a čidel, atd.) umožněna jakási „kooperace“, která měla v těchto situacích zabránit přehřevům výrobní formy a následnému zdlouhavému čekání na vyrovnaní teplot, nebo dokonce zabránit samotnému zničení výrobní formy. V pozdější fázi vývoje pak byl algoritmus optimalizován vzhledem ke kvalitě finálního výrobku, což ukázalo, že není v první řadě důležitá teplota na vyhřívané straně formy, ale teplota na druhé pracovní straně, která je odlišná. Proto bylo přistoupeno k úpravě algoritmu, která umožňuje zvolit různé žádané hodnoty pro jednotlivé zářiče a tak optimalizovat teplotu pole podle vad umělé kůže. Samotné požadavky a výběr vhodného regulátoru jsou diskutovány v kapitole 6.6.

Výsledky získané z výše popsané analýzy za použití vypracované metodiky určení struktury regulačního obvodu pak byly spolu s regulačním algoritmem nasazeny nejdříve na prototypovou a později na před-sériovou linku. Ta momentálně splňuje všechny požadavky na sériovou výrobu, která na ní nyní probíhá, což bylo potvrzeno celou řadou auditů renomovaných výrobců.

9 Závěr

V závěru této práce je možno konstatovat, že předložená práce vznikala v rámci vývoje zkušební výrobní linky pro výrobu měkčených umělých kůží pro automobilový průmysl, která využívá technologii takzvaného „slushování“, tedy technologie založené na spékání práškového termoplastického materiálu. Během celého vývoje zkušební linky byly získávány cenné poznatky a závěry, které ve výsledku vedly k realizaci sériové výrobní linky. Je nutno si uvědomit, že na vývoji výrobní linky se podílela celá řada firem, jako například firma Magna (Cadence Innovation), která byla zadavatelem a zároveň vyvíjela výrobní postupy pro použití „slushovací“ technologie na vyvíjeném zařízení. Dále se podílela na vývoji firma AURA Engineering jako projektant a dodavatel technologického zařízení, firma Lenam jako dodavatel matematických analýz a matematické simulační podpory a Technická Univerzita v Liberci jako dodavatel měřicích systémů a řídicích nástrojů.

Návrhy a řešení řídicího systému, kterým se zabývá tato práce, pak byly v daných fázích vázány na časové termíny dalších dodavatelů, montáží a zkouškami výroby. Bylo nutno neustále komunikovat s ostatními pracovníky a dodavateli, a zároveň se podílet na jednotlivých zkouškách vyvíjeného zařízení. Výrobní zkoušky, které byly průběžně prováděny, pak okamžitě poukázaly jednak na problémy s řízením teplotního pole, ale také na problémy konstrukce a nedostatky výrobních postupů. V rámci následných analýz těchto zkoušek bylo nutno zpracovat v první řadě velké množství dat a následně upravit teoretické předpoklady, které již byly nasazeny na výrobní lince, podle dostupných výsledků analýz. Tato skutečnost kladla enormní požadavky na návrh řídicího systému a formovala komplexnost daného vývoje a výzkumu ve smyslu analýzy problému a návrhu teoretického řešení. Toto řešení bylo v mnoha případech ověřeno následnou matematicko-fyzikální simulací problému, která zpravidla předcházela realizaci řešení a jeho následnému odzkoušení na vyvíjeném zařízení. Následná analýza výsledků pak měla odhalit případné další problémy spojené s daným řešením a popřípadě nastínit další postup vývoje pro řešení daného problému.

Pro řešení systém ohřevu, který je využit pro vyhřívání výrobní formy na lince pro výrobu měkčených umělých kůží a který je možno z hlediska řízení označit jako rozsáhlý MIMO systém, byly v rámci této disertační práce prováděny výzkumné činnosti, které zahrnují:

- Analýzu a výběr infračervených zářičů jako akčních členů pro systém ohřevu.

- Vývoj a tvorbu simulačního modelu pro MIMO systém, který je tvořen vyhřívacím zařízením a výrobní formou.
- Výběr vhodné struktury řízení.
- Analýzu možností vybraných řídicích algoritmů.
- Návrh a výběr řídicí strategie žádaných hodnot podle požadavků, které byly definovány odběratelem a jenž vycházely z kvality finálního výroku.

Vybraný algoritmus řízení i metodika pro výběr optimální struktury řízení byla odzkoušena na prototypovém stroji pro před-sériovou výrobu a současně době je již reálně nasazena na stroji, který slouží k výrobě sériové. Vypracovaná metodika, která je popsána v rámci této práce, pak může být v budoucnu použita na systémech podobných vlastností a nadále bude rozvíjena a optimalizována v rámci plánovaného projektu ministerstva průmyslu a obchodu.

Je možno konstatovat, že na základě výrobních zkoušek byly z hlediska zadavatele Magna (Cadence Innovation), globální cíle splněny (I., II. a III.)

Shrňme-li tedy výsledky této práce, pak můžeme konstatovat, že práce:

- 1) Přispívá k rozšíření teoretických poznatků v oboru zaměřeném na návrh a implementaci MIMO řídicích systémů pro ohřev pomocí infračervených zářičů v těchto bodech:
 - Metodika polohování infračervených zářičů a následné přiřazení zářičů a čidel s ohledem na požadavky řízení na základech měření.
 - Analýza vlastností sofistikovaných algoritmů řízení a PID regulátorů při řešení úlohy ohřevu skupinou infračervených zářičů z hlediska kvality regulace a její implementace.
 - Předkládá základní poznatky pro vývoj metodiky určené k analýze a syntéze řízení systému ohřevu skupinou infračervených zářičů, které budou základem připravovaného systému, který umožní automatickou syntézu nastavení regulátorů a volbu struktury regulačního obvodu.
 - Návrh strategie řízení pro dosažení požadovaných technologických parametrů teplotního pole pomocí žádaných hodnot teploty na jednotlivých čidlech. Tento způsob řízení se označuje jako „regulátory v kooperaci“.
- 2) Má okamžitý přínos pro průmyslovou praxi, za který pak lze pokládat:

- Návrh řídicího systému pro řízení teplotního pole výrobní formy vyhřívané infračervenými zářiči a jeho implementace na PC, který zajistí dosažení požadovaných technologických parametrů vzhledem k teplotám tak, aby bylo dosaženo definovaných kvalitativních parametrů finálního výrobku.
 - Implementaci řídicího systému jednak na před-sériové prototypové lince a následně na lince pro sériovou výrobu, která provádí ohřev na třech nezávislých pozicích, a to dvě pozice předehřevu a jedna pozice pro nanášení a spečení materiálu. Tato linka pak může využívat i většího počtu výrobních forem.
- 3) Přináší nové poznatky a metodiky, a ty pak lze použít v budoucnosti při vývojových a výzkumných činnostech pro:
- Další vývoj automatizované přípravy výroby, z hlediska ohřevu a regulace teploty, a to zejména při zařazování nového sortimentu, respektive zavádění nového modelového produktu do sériové výroby.
 - Nalezení takových principů řízení teplotního pole pomocí infračervených zářičů, které umožní dosáhnout teplotního pole požadované kvality a to bez použití tak vysokého počtu čidel. Tato metodika předpokládá použití pouze několika čidel v klíčových oblastech, která umožní vyhřát výrobní formu na základě „zkušeností“ regulačního algoritmu z předcházejících cyklů.

Literatura

- [1] KNIGHTS, Mikell. Injection molding. *Plastics Technologi*. Aug. 2006, no. 52, s. 52-71.
- [2] Slush TPOs now match PVC for detail. , *European Automotive Design*. Sep. 2005, no. 9, s. 25.
- [3] TOLINSKI, Mike. The TPO Skins Game. *Automotive Plastics*. Dec. 2008, no. 58, s. 36-39.
- [4] *United States Patent and Trademark Office* [online]. 2007 , 9.1.2007 [cit. 2008-09-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.uspto.gov/>>.
- [5] SKOGESTAD, Sigurd, POSTLETHWAITE, Ian. *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. 2nd edition. England : John Wiley & Sons Ltd, 2005. 575 s.
- [6] BEQUETTE, B. Waine. *Process Control: Modeling, Design, and Simulation*. New Jersey : Pearson Education, Inc., 2003. 770 s.
- [7] KROKAVEC, Dušan. Eigenvalue assignment by state feedback in large scale systém. In *Proceedings of 8th International Carpathian Control Conference*. Košice : [s.n.], 2007. s. 377-380. ISBN 978-80-8073-8.
- [8] LI, Chunshien, PRIEMER, Roland. Fuzzy control of unknown MIMO plants. In *Proceedings of Fuzzy sets and systems*. 1999th edition. [s.l.] : [s.n.], 1999. s. 245-267.
- [9] *Aktuelles Kiefel Kunststofftechnologien* [online]. 2007 [cit. 2007-01-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.kiefel.de/>>.
- [10] *KraussMaffei* [online]. 2007 [cit. 2007-01-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.krauss-maffei.de>> .
- [11] KROKAVEC, Dušan, FILASOVÁ, Anna. Decentralized control design using LMI. In *Proceedings of 8th International Carpathian Control Conference*. Košice : [s.n.], 2007. s. 381-384. ISBN 978-80-8073-8.
- [12] MARTINEC, Tomáš. *Měření teplotních polí pomocí kontaktních metod měření*. Liberec, 2009. 146 s. , CD-ROM. Dizertační práce.
- [13] LIENHARD IV, John H., LIENHARD V, John H. *A Heat Transfer Textbook*. 3rd edition. USA : Phlogiston Press, 2008. 749 s.
- [14] HOKR, Milan. *Poznámky k přednáškám z předmětu Aplikace počítačových modelů na FM TUL* [online]. 2006 , 5.4.2006 [cit. 2009-06-12]. Dostupný z WWW: <http://flow.kmo.tul.cz/~apm/files/lessons/apm-prednasky_06-04-05.pdf>.

- [15] *Modelování v elektroenergetice : Sdružené úlohy 4* [online]. 26.4.2002 , 26.4.2002 [cit. 2009-06-12]. Dostupný z WWW: <<http://k315.feld.cvut.cz/download/men/COUP4.pdf>>.
- [16] NÁHLOVSKÝ, Tomáš. *Model teplotních polí jednoduchých těles při ohřevu zářičů*. Liberec, 2008. 93 s. , CD-ROM. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Osvald Modrlák, CSc. .
- [17] LENAM s.r.o.. *Výzkumná zpráva 6080/01+04 : Charakteristika zářičů Philips a Hereaus*. Liberec, 2007. 8 s., dostupné v archivu firmy LENAM
- [18] PHILIPS, IRK *halogen infrared radiators in the industrial heating process*. Manuál.
- [19] *Home - Royal Philips* [online]. 2007 [cit. 2007-06-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.philips.com/global/index.page>>.
- [20] LENAM s.r.o.. *Výzkumná zpráva 051208 : Radiation of Galvano/Heating & Cooling*. Liberec, 2005. 27 s., dostupné v archivu firmy LENAM
- [21] LENAM s.r.o.. *Výzkumná zpráva 6080/01 : Studie dvou alternativních možností pro rozmístění zářičů*. Liberec, 2007. 8 s., dostupné v archivu firmy LENAM
- [22] LENAM s.r.o.. *Výzkumná zpráva 5110/02 : Numerická simulace možností regulaceprocesu ohřevu Galvana*. Liberec, 2005. 15 s., dostupné v archivu firmy LENAM

Vlastní literatura

- [V1] ŠKOLNÍK, Petr, MODRLÁK, Osvald. Control methods of temperature field heated by infrared radiators. In *Proceedings of 9-th International Carpathian Control Conference*. Romania : University of Craiova, 2008. s. 623-626. ISBN 9789737468970.
- [V2] MODRLÁK, Osvald, ŠKOLNÍK, Petr. Practical approach for temperature control in an industrial heating process with infrared radiators. In *Proceedings of 8th International Carpathian Control Conference*. Košice : Tu Košice, 2007. s. 466-469. ISBN 978-80-8073-8.
- [V3] HUBKA, Lukáš, ŠKOLNÍK, Petr. A practical approach for temperature modelling and control of industrial heating process with infrared radiators in a predevelopment of a production line, In *Miedzynarodowa konferencja młodych naukowcow szkol wyszych Euroregoinu Nysa*. Jelenia Gora: Akademia Ekonomiczna we Wrocławiu, 2007. s. 115-118. ISBN: 978-83-60975-00-8
- [V4] MARTINEC, Tomáš, ŠKOLNÍK, Petr, HUBKA, Lukáš. *Modelling and control of temperature field of an industrial form with infrared radiators*. In *ECMS 2007*. Liberec : Technical University of Liberec, 2007. s. 215-220. ISBN: 978-80-7372-202-9
- [V5] HUBKA, Lukáš, MENKINA, Michal, ŠKOLNÍK, Petr. *Modelling of the drum-boiler in Matlab*. In *ECMS 2007*. Liberec : Technical University of Liberec, 2007. s. 203-208. ISBN: 978-80-7372-202-9
- [V6] Distributed temperature control of a body part surface. In *Control of power & heating systems 2006*. Zlín : Tomas Bata University in Zlín, 2006. s. 1-4. ISBN 80-7318-409-5.
- [V7] ŠKOLNÍK, Petr, MODRLÁK, Osvald. Rotationspeed state and fuzzy control of DC motor. In *Process control2006*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2006. s. 1-4. ISBN 80-7194-860-8.

Příloha A – Navržený H_∞ regulátor

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

$$R_{11} = \frac{1,84 \cdot s^3 + 8,73 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 + 1,03 \cdot 10^{-5} \cdot s + 3,40 \cdot 10^{-9}}{s^3 + 1,38 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 + 5,07 \cdot 10^{-7} \cdot s + 1,26 \cdot 10^{-12}}$$

$$R_{12} = \frac{-0,43 \cdot s^3 + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot s^2 + 6,49 \cdot 10^{-5} \cdot s + 7,86 \cdot 10^{-8}}{s^3 + 8,78 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 + 1,92 \cdot 10^{-5} \cdot s + 4,79 \cdot 10^{-11}}$$

$$R_{13} = \frac{0,97 \cdot s^9 + 2,24 \cdot 10^{-2} \cdot s^8 + 2,23 \cdot 10^{-4} \cdot s^7 + 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot s^6 + 4,43 \cdot 10^{-9} \cdot s^5 + 1,01 \cdot 10^{-11} \cdot s^4 + \dots}{\dots + 1,47 \cdot 10^{-14} \cdot s^3 + 1,30 \cdot 10^{-17} \cdot s^2 + 6,30 \cdot 10^{-21} \cdot s + 1,24 \cdot 10^{-24}}$$

$$R_{13} = \frac{s^9 + 2,26 \cdot 10^{-2} \cdot s^8 + 2,15 \cdot 10^{-4} \cdot s^7 + 1,12 \cdot 10^{-6} \cdot s^6 + 3,47 \cdot 10^{-9} \cdot s^5 + 6,45 \cdot 10^{-12} \cdot s^4 + \dots}{\dots + 6,90 \cdot 10^{-15} \cdot s^3 + 3,82 \cdot 10^{-18} \cdot s^2 + 8,48 \cdot 10^{-22} \cdot s + 2,09 \cdot 10^{-27}}$$

$$R_{21} = \frac{-0,6411 \cdot s^3 - 3,16 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 - 5,12 \cdot 10^{-6} \cdot s + 1,58 \cdot 10^{-9}}{s^3 + 1,38 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 + 5,07 \cdot 10^{-7} \cdot s + 1,26 \cdot 10^{-12}}$$

$$R_{22} = \frac{3,09s^5 + 2,94 \cdot 10^{-2} \cdot s^4 + 1,05 \cdot 10^{-4} \cdot s^3 + 1,72 \cdot 10^{-7} \cdot s^2 + 1,26 \cdot 10^{-10} \cdot s + 3,22 \cdot 10^{-14}}{s^5 + 6,55 \cdot 10^{-3} \cdot s^4 + 1,43 \cdot 10^{-5} \cdot s^3 + 1,19 \cdot 10^{-8} \cdot s^2 + 3,39 \cdot 10^{-12} \cdot s + 8,39 \cdot 10^{-18}}$$

$$R_{23} = \frac{-1,83 \cdot s^3 - 7,08 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 - 7,45 \cdot 10^{-6} \cdot s - 2,33 \cdot 10^{-9}}{s^3 + 1,38 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 + 5,07 \cdot 10^{-7} \cdot s + 1,26 \cdot 10^{-12}}$$

$$R_{31} = \frac{1,46 \cdot 10^1 \cdot s^3 + 3,01 \cdot 10^{-4} \cdot s^2 + 1,98 \cdot 10^{-8} \cdot s - 4,43 \cdot 10^{-10}}{s^3 + 1,38 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 + 5,07 \cdot 10^{-7} \cdot s + 1,26 \cdot 10^{-12}}$$

$$R_{32} = \frac{-1,59 \cdot s^3 - 1,50 \cdot 10^{-2} \cdot s^2 - 3,73 \cdot 10^{-5} \cdot s - 1,06 \cdot 10^{-8}}{s^3 + 8,78 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 + 1,92 \cdot 10^{-5} \cdot s + 4,79 \cdot 10^{-11}}$$

$$R_{33} = \frac{1,33 \cdot s^9 + 3,54 \cdot 10^{-2} \cdot s^8 + 4,05 \cdot 10^{-4} \cdot s^7 + 2,61 \cdot 10^{-6} \cdot s^6 + 1,03 \cdot 10^{-9} \cdot s^5 + 2,59 \cdot 10^{-11} \cdot s^4 + \dots}{\dots + 4,08 \cdot 10^{-14} \cdot s^3 + 3,84 \cdot 10^{-17} \cdot s^2 + 1,91 \cdot 10^{-20} \cdot s + 3,88 \cdot 10^{-24}}$$

$$R_{33} = \frac{s^9 + 2,26 \cdot 10^{-2} \cdot s^8 + 2,15 \cdot 10^{-4} \cdot s^7 + 1,12 \cdot 10^{-6} \cdot s^6 + 3,47 \cdot 10^{-9} \cdot s^5 + 6,45 \cdot 10^{-12} \cdot s^4 + \dots}{\dots + 6,90 \cdot 10^{-15} \cdot s^3 + 3,82 \cdot 10^{-18} \cdot s^2 + 8,48 \cdot 10^{-22} \cdot s + 2,09 \cdot 10^{-27}}$$

Pořadí spouštění	Název souboru	Funkce
4.	aaa01.m	vyřazení nulových řádků a sloupců, přiřazení zářič-čidlo, vytvoření matice systému
	data132_zpracdata.mat	původní-naměřená data (*data.mat). Data upravená (*data2.mat), která vstupují do identifikace. Ořezání špiček i v čase
	data132_zpracdata2.mat	
	data133_zpracdata.mat	
	data133_zpracdata2.mat	
	data134_zpracdata.mat	
	data134_zpracdata2.mat	
	data135_zpracdata.mat	
	data135_zpracdata2.mat	
	data136_zpracdata.mat	
	data136_zpracdata2.mat	
	data137_zpracdata.mat	
	data137_zpracdata2.mat	
	data138_zpracdata.mat	
	data138_zpracdata2.mat	
	data139_zpracdata.mat	
	data139_zpracdata2.mat	
	data140_zpracdata.mat	
	data140_zpracdata2.mat	
	data141_zpracdata.mat	
	data141_zpracdata2.mat	
	data142_zpracdata.mat	
	data142_zpracdata2.mat	
3.	id_kompl4.m	identifikace systému. Výsledkem je soubor idGal.mat, kde je systém uložen (sc)
	idGAL.mat	neredukovaný systém (sc), vektor nestabilních přenosů (nestab=[])
	idGAL_fin.mat	neredukovaný systém (sc), redukováný systém (F), jeho stavový popis (ss_F)
	idGAL_fin2.mat	neredukovaný systém (sc), redukováný systém (F), jeho stavový popis (ss_F), indexy vzájemného přiřazení pro zpětnou kontrolu (indexyF), nastavení regulátoru (P, Is)
2.	maxima.m	vytvoření souborů dataXXX_zpracdata2.mat. Provedení úprav v čase i vypuštění nesmyslných hodnot (chyby v měření)
	nulovezesileni.m	pokusy o vytvoření matice systému různým přiřazením - nefunkční
	nulovezesileni2.m	
	nulovezesileni2a.m	
	okoli_def2.m	přiřazení čidlo-zářič. Příliš rozsáhlý a nepřehledný model.
1.	okoli_def3.m	přiřazení čidlo-zářič
	okoli_popis.mat	výsledek z okoli_def3.m (okoli_def2.mat)
	okoli_popis2.mat	
	sim_gal02F.mdl	
	sim_gal02F2.mdl	model pro simulaci kooperace
	sim_gal02F3.mdl	
	sim_gal03F.mdl	
6.	Setrideni_upr.m	vytvoření matice přiřazení
5.	verifikace.m	porovnání přenos-měřená data
	zadana_hodnota.m	nefunkční
	zadana_hodnota2.m	nefunkční
	zadana_hodnotaF.m	1 žádaná hodnota pro všechny zářiče
	zadana_hodnotaF2.m	plný počet žádaných hodnot, po dosažení w se vypne kooperace pro všechny a nastaví se w
	zadana_hodnotaF3.m	plný počet žádaných hodnot, po dosažení w se vypne

		kooperace pouze u toho, co dosáhl w, ostatní kooperují
--	--	--

Pro spuštění postačí spustit aaa01.m a mít v adresáři soubor idGal.mat. Pro simulace spouštět soubory sim_gal02F*.mdl, sim_gal03F.mdl.

Pořadí spouštění	Název souboru	Funkce
	A.mat	Data vstupující do modelu
	A1.mat	
	B.mat	
	B1.mat	
	Data.mat	
	Hinf.m	Návrh regulátoru H_∞
	Hinf_krit.m	Dodatečné kritérium pro návrh H_∞ regulátoru
H _∞ 1	Hinf_rucne_obr.m	Návrh regulátoru H_∞
	lqr_krit.m	Dodatečné kritérium pro stavový regulátor
	lqr_sim.mdl	Simulace kritéria stavového regulátoru
PID1.1	PID.m	Návrh PID regulátoru (každá smyčka jiné parametry)
	PID_jed_krit.m	Kritérium pro návrh PID regulátoru
PID1.2	PID_jeden.m	Návrh PID regulátoru (každá smyčka stejné parametry)
	PID_krit.m	Kritérium pro návrh PID regulátoru
H _∞ 2	redukce2.m	Redukce řádu H_∞ regulátoru
	Simulace.mdl	Simulační model LMI regulátoru
	Simulace_lqr.mdl	Simulační model stavového regulátoru
	SimulaceHinf.mdl	Simulační model H_∞ regulátoru
	Simulace_PID.mdl	Simulační model PID regulátoru
LQR1	Stav_lqr.m	Návrh stavového regulátoru
	sys.mat	Model systému