

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 řiditelnosti 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 slinutím 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 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 známé.**

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.

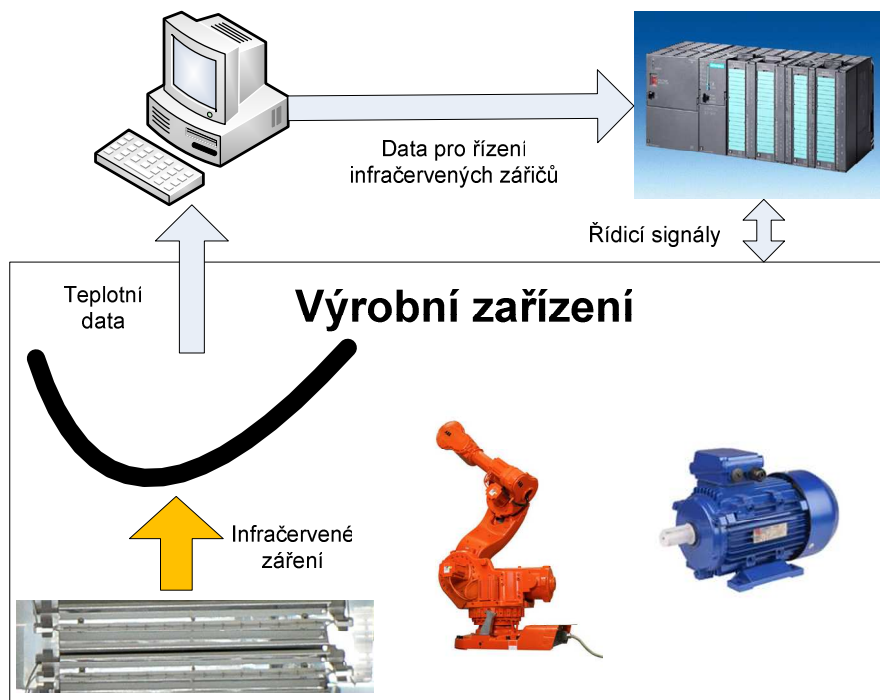


Obr. 2.1: Linka Krauss Maffei.

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 předeřevu 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.

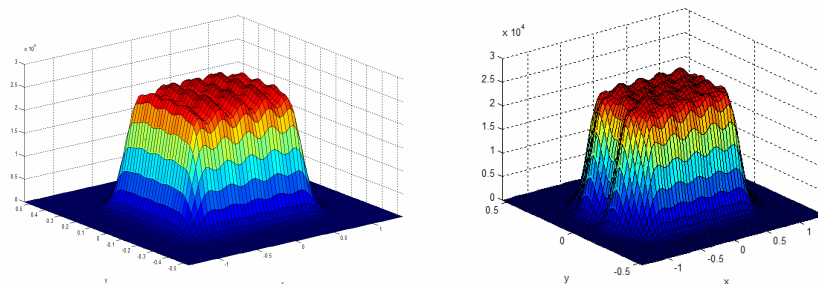
5 Vlastní řešení

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 technologii 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 rozmístování 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 rozmístování 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 snímaná 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 jakékoli 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 $\langle 0; 1 \rangle$. 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

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

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 $\mathbf{G}(s)$. Matice $\mathbf{G}(s)$ 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

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

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

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

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

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.

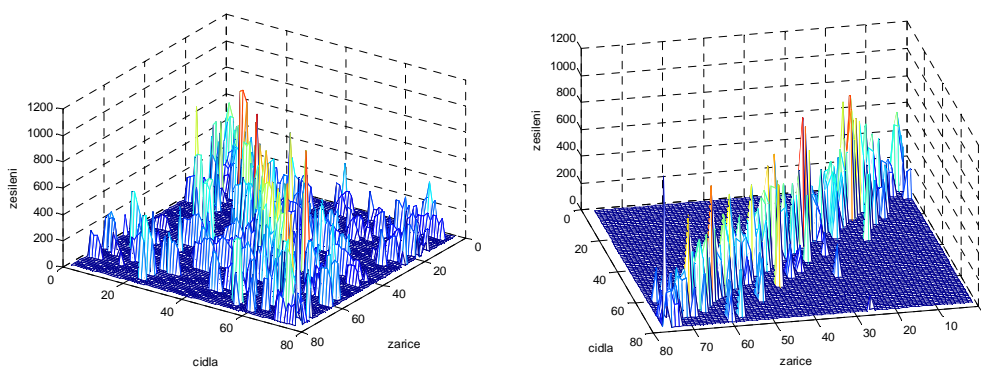
Pro identifikaci na použité výrobní formě, která má 77 nebo dokonce až 180 použitých zářičů, byla identifikace provedena v rámci 18 měřících cyklů. V každém cyklu bylo zvoleno několik infračervených lamp, které vzájemně neovlivňují stejná čidla, respektive účinek jednotlivých lamp na stejné čidlo je 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 měřícím 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 mohou 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 (**R**elative **G**ain **A**rray)
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.

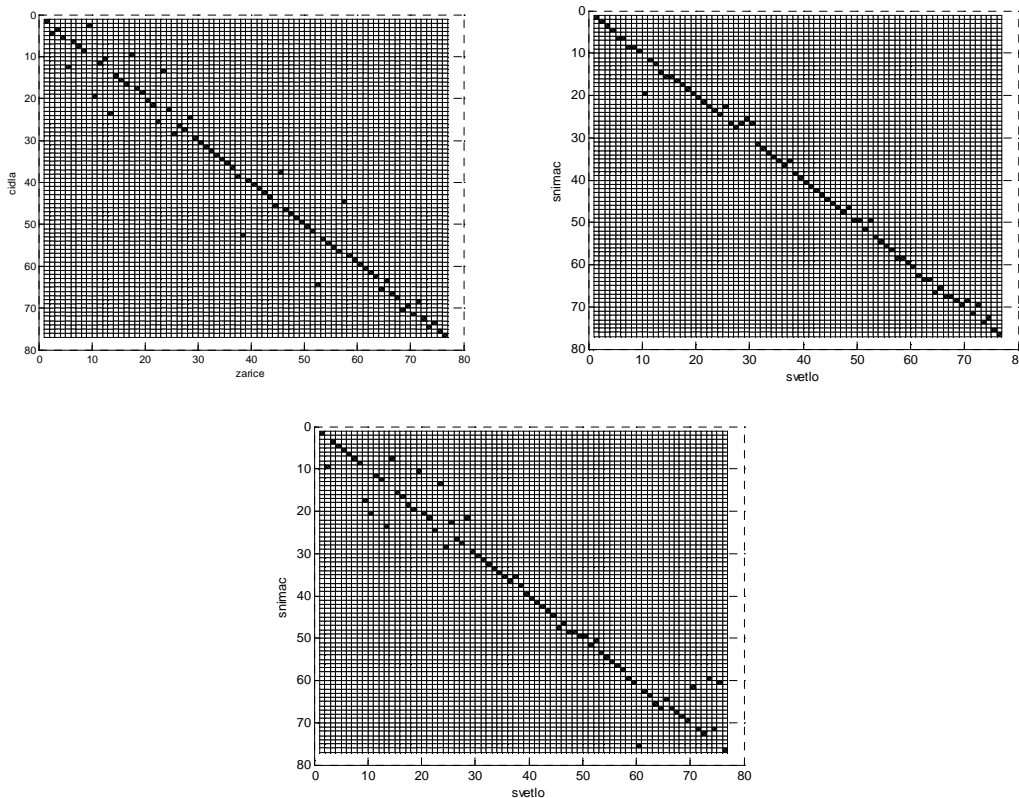
5.2.3.2 Přiřazení čidel k zářičům podle RGA

Jako druhý přístup byl zvolen přístup prostřednictvím výpočtu matice RGA (**R**elative **G**ain **A**rray). 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 \mathbf{A} . Je tedy dán vztahem

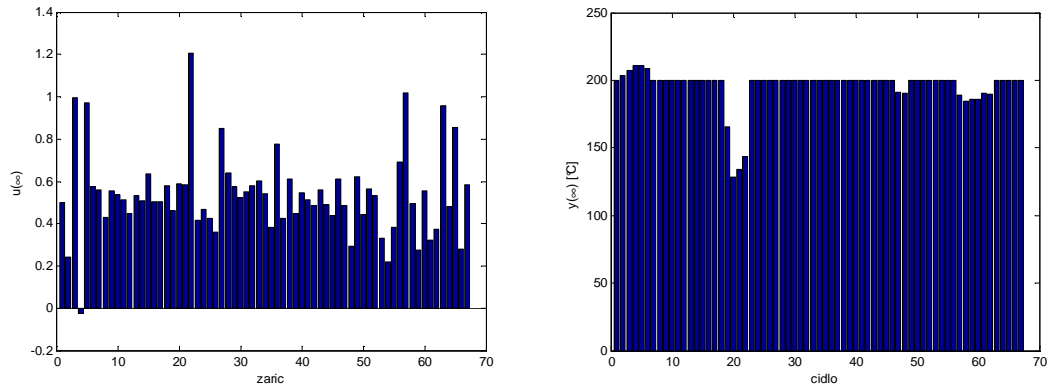
$$\gamma = \frac{\bar{\sigma}(\mathbf{A})}{\underline{\sigma}(\mathbf{A})}. \quad (4.8)$$

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 projevovat 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

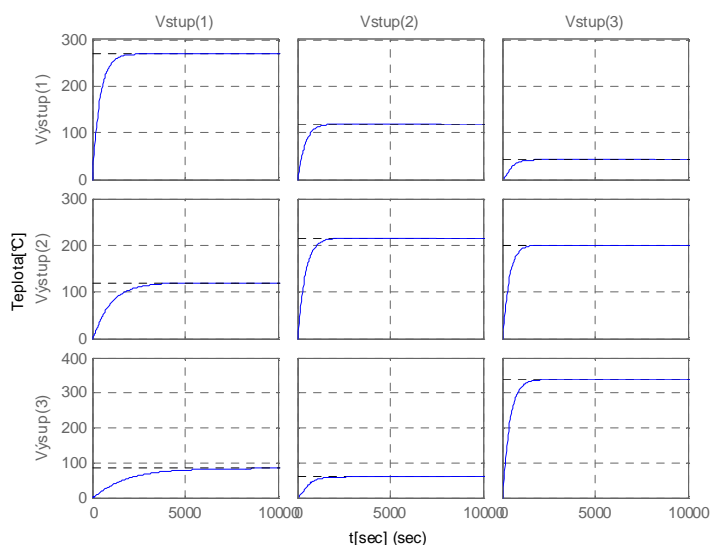
syntéza centralizovaných systémů řízení, která je zastoupena stavovou regulací, syntézou regulátoru pomocí lineárních maticových nerovností a syntéza regulátoru H_∞ .

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 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

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

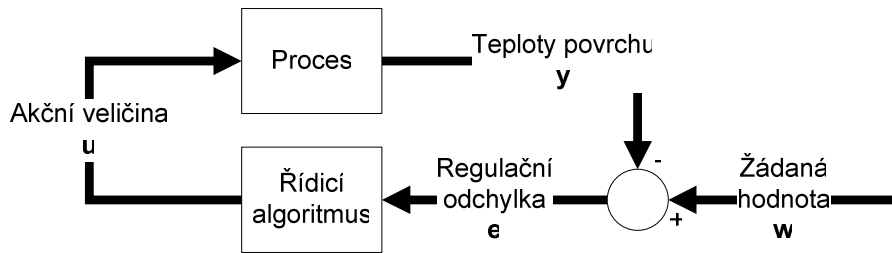
kde $\mathbf{u}(s)$ je obrazový vektor vstupní veličiny, $\mathbf{G}_S(s)$ je matice obrazových přenosů zjednodušeného modelu a $\mathbf{y}(s)$ je vektor laplaceových obrazů výstupní teploty povrchu rubu formy. Na Obr. 5.5 je pak zobrazena přechodová charakteristika zjednodušeného modelu.



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 $\mathbf{y}(s)$.

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



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 $\mathbf{G}_S(s)$ má diagonální charakter, pro matici obrazových přenosů regulátorů $\mathbf{R}(s)$ 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.

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

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

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 $\mathbf{G}_s(s)$ 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 \mathbf{Q} , \mathbf{R} a \mathbf{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 \mathbf{R} na akční veličině potlačit nabývání nežádoucích hodnot akční veličiny, které jsou v praxi nedosažitelné.

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

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 . 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 $g_{s_{ii}}(s)$ 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.

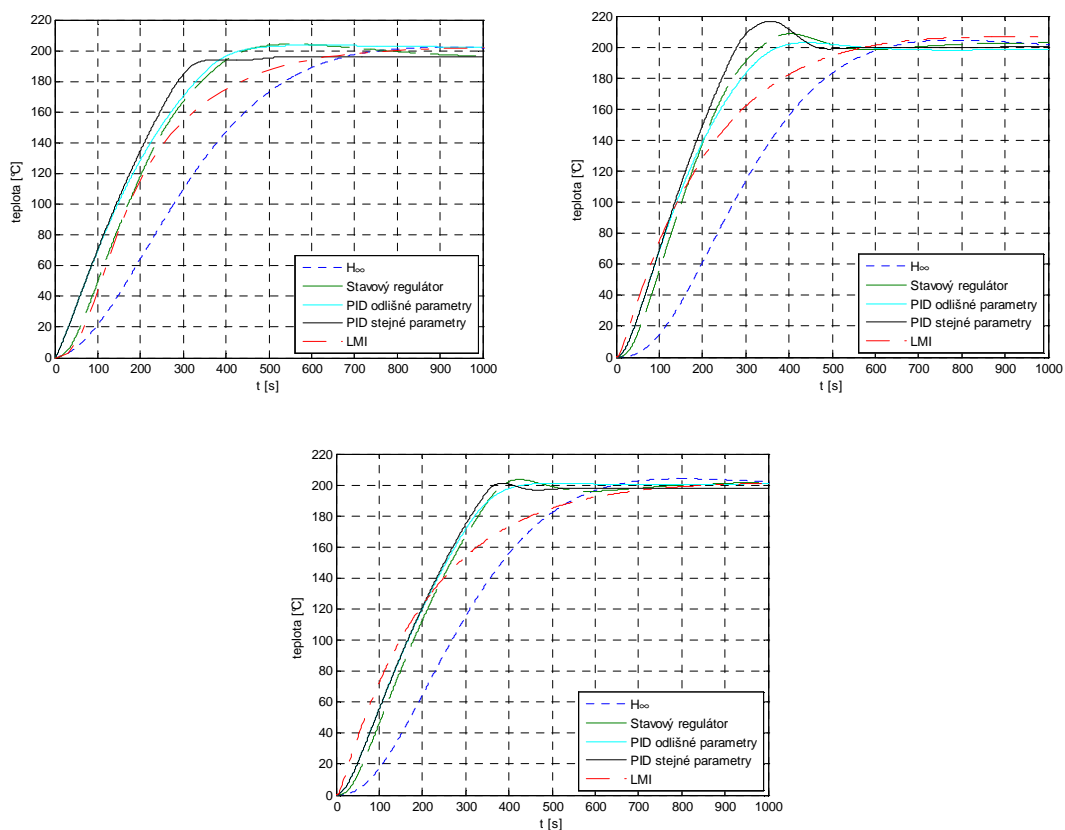
V prvních krocích byl hlavní požadavek odběratele zaměřen hlavně na co nejrychlejší zodpovězení otázky, jestli je vůbec možné výrobní formu vyhřát na požadovanou teplotu pomocí použitých infračervených zářičů. Ve druhé předvýrobní fázi bylo nutno zoptimalizovat homogenitu teplotního pole výrobní formy. 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 dvupolohové 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 termočlánkovým 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

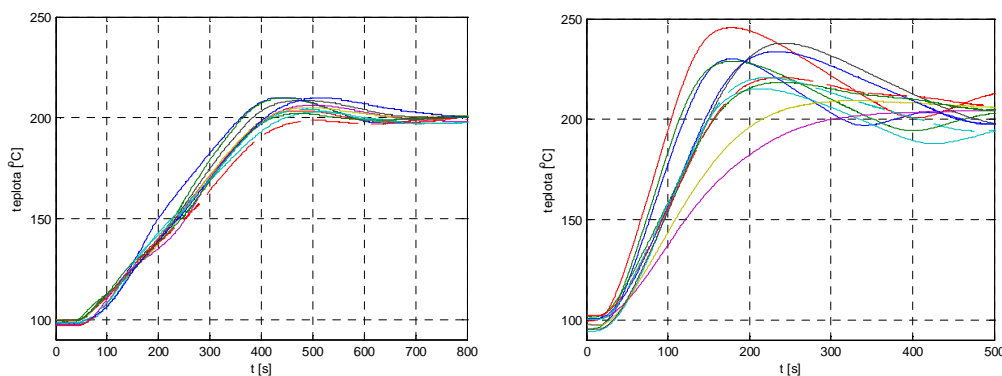
Jak již bylo řečeno, vzhledem k problematice dosažení optimálního stavu nastavení zářičů vůči teplotním čidlům docházelo na teplotním poli výrobní formy k poměrně výrazným překmitům při náběhu teplot na žádanou hodnotu. Bylo to díky tomu, že dodavatel výrobní formy udával maximální povolenou teplotu 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 seřazením 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.

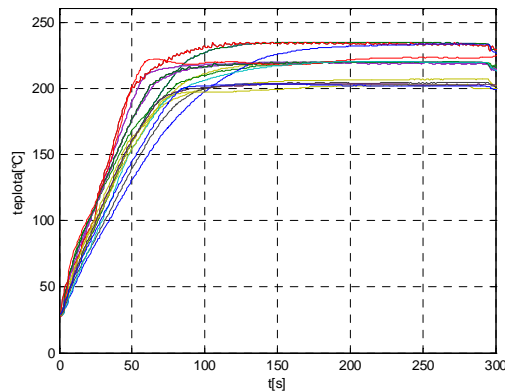


Obr. 5.8: Průběh teplot na reálném systému s použitím regulačního algoritmu s kooperací v levo a bez jeho použití vpravo.

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.

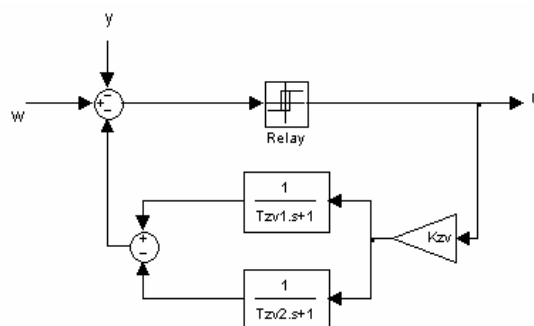
Při postupné opalizaci se ale ukázalo, že vzhledem k nestejně tloušťce výrobní formy nejsou na lícové (výrobní) straně formy na některých místech dostatečné teploty, respektive není naakumulována dostatečná tepelná energie v objemu formy, která dokáže dostatečně spéct práškový materiál. To bylo také 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 měřících 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 žadovaných 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 žadovaných 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] *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 mlodych 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 Zlin, 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.