

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



Autoreferát disertační práce

## POKROČILÉ ALGORITMY ŘÍZENÍ PRVKŮ A SKUPIN ELEKTRÁRENSKÝCH BLOKŮ

**Sophisticated control algorithms of elements and groups of power  
plant units**

Ing. Michal Menkina

Liberec 2011



# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

## Pokročilé algoritmy řízení prvků a skupin elektrárenských bloků

Sophisticated control algorithms of elements and groups of power  
plant units

Ing. Michal Menkina

Studijní program: P 2612 – Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: 2612V045 – Technická kybernetika  
Pracoviště: Ústav řízení systémů a spolehlivosti  
Fakulta mechatroniky, informatiky a inženýrských studií  
Technická univerzita v Liberci  
Studentská 2, 461 17 Liberec  
Školitel: doc. Ing. Osvald Modrlák, CSc.

Rozsah disertační práce a příloh

Počet stran: 128 + 12 (přílohy)  
Počet obrázků: 74  
Počet tabulek: 8

---

## Anotace

Disertační práce řeší zcela nově pomocí sofistikovaných metod řízení problematiku regulace teploty přehřáté páry v průtočném elektrárenském kotli. Teoretickou bází jsou metody syntézy robustních PID regulátorů a  $H_\infty$  regulátorů, které minimalizují normu smíšené citlivostní funkce.

Praktickým základem analýzy i syntézy je nelineární stavový model průmyslového průtočného kotle, který je parametrizován podle technické a výrobní dokumentace. Těžištěm práce je pak v nalezení vhodného lineárního modelu pro syntézu robustních regulátorů a v návrhu robustního decentralizovaného a centralizovaného řídicího systému, které splňují technologické požadavky v celém výkonovém rozsahu. V souladu s cílem práce je nalezena optimální struktura nestrukturované neurčitosti pro zadané technologické režimy a výkonové hladiny. Ve svých důsledcích jde o návrh struktur a syntézy SISO a MIMO robustní regulace teploty přehřáté páry ve vysokotlaké části průtočného kotle. Jsou zpracovány dva návrhy robustních regulátorů a to robustní PID a robustní  $H_\infty$  regulátory. Dále jsou diskutovány možnosti různých zapojení robustních regulátorů v regulované vysokotlaké části výroby páry. V závěru této části je pak provedeno ověření regulačních algoritmů na nelineárním modelu průtočného kotle. Vlastností robustní regulace teploty přehřáté páry jsou porovnávány s vlastnostmi regulace adaptivního PID řídicího systému. Byl zpracován zcela nově návrh systému řízení přehřáté páry, který se opírá o nelineární stavový model a metody robustní syntézy.

**Klíčová slova:** průtočný kotel, regulace teploty přehřáté páry, nelineární simulační model, neurčitost, robustní PID regulátor, robustní  $H_\infty$  regulátor

---

## Annotation

This thesis deals with entirely new sophisticated methods of controlling problems superheated steam temperature control in once-through boiler in power plant. Theoretical base are the methods of synthesis of robust PID controller and  $H_\infty$  controllers that minimize the standard mixed sensitivity function. The practical basis for analysis and synthesis is nonlinear state space model of industrial of once-through boiler which is parameterized according to technical and manufacturing documentation. The focus of the work is in finding a suitable linear model for the synthesis of robust controllers and design a robust decentralized and centralized control systems that meet the technological requirements in the whole output range. In line with the aim of the work is found an optimal structure for unstructured uncertainty given technological modes and power levels. In their consequences for the design of structures and synthesis of SISO and MIMO robust temperature control of high pressure part in once-through boiler. They are considering two proposals of robust controllers and robust PID and robust  $H_\infty$  controllers. There are also discussed different possibilities of robust controllers involved in the control of high-pressure part. At the end of this section is then verification of control algorithms in the nonlinear model of flow boiler. Properties robust temperature control of high pressure part are compared with those of control adaptive PID control system. It was developed a completely new design control system of high-pressure part which is based on nonlinear state space model and synthesis of robust methods.

**Keywords:** once-through boiler, robust temperature control of high pressure part, nonlinear simulation model, uncertainty, robust PID controller, robust  $H_\infty$  controller

---

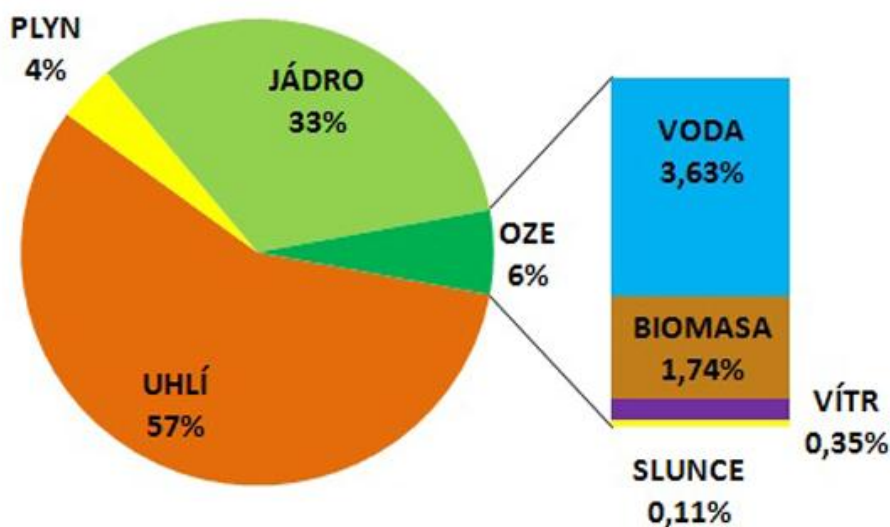
# Obsah

1	Úvod.....	7
2	Cíle práce .....	9
3	Současný stav.....	11
3.1	Konstrukce průtočných kotlů .....	11
3.2	Současný řídicí systém přehřáté páry .....	12
4	Teoretické základy robustní regulace .....	14
4.1	Možnosti lineární aproximace přehříváku.....	14
4.1.1	Bloková struktura modelu přehříváku definovaná aproximačními přenosy .....	14
4.1.2	Linearizovaná část nelineárního modelu pro definované lokální vstupy a výstupy .....	16
4.2	Metoda syntézy robustní regulace.....	16
4.2.1	Neurčitost.....	16
4.2.2	Syntéza robustního PID regulátoru .....	17
4.2.3	Syntéza $H_\infty$ regulátoru.....	17
5	Vlastní řešení .....	20
5.1	Bloková struktura lineárního modelu definovanými obrazovými přenosy .....	20
5.2	Linearizace nelineárního modelu .....	21
5.3	Decentralizované řízení - syntéza robustních regulátorů pro regulaci přehřáté páry 22	
5.3.1	Syntéza robustních PID regulátorů pro VT část .....	22
5.3.2	Syntéza robustních PID a $H_\infty$ regulátorů v kaskádní struktuře pro VT část .....	23
5.3.3	Syntéza robustních $H_\infty$ regulátorů pro VT část .....	28
5.4	Syntéza centralizovaného robustního $H_\infty$ regulátoru pro VT část.....	29
5.5	Porovnání výsledků s projektovanou kaskádní PID regulací.....	32
6	Závěr .....	35
	Citovaná literatura.....	37
	Vlastní publikace.....	38

---

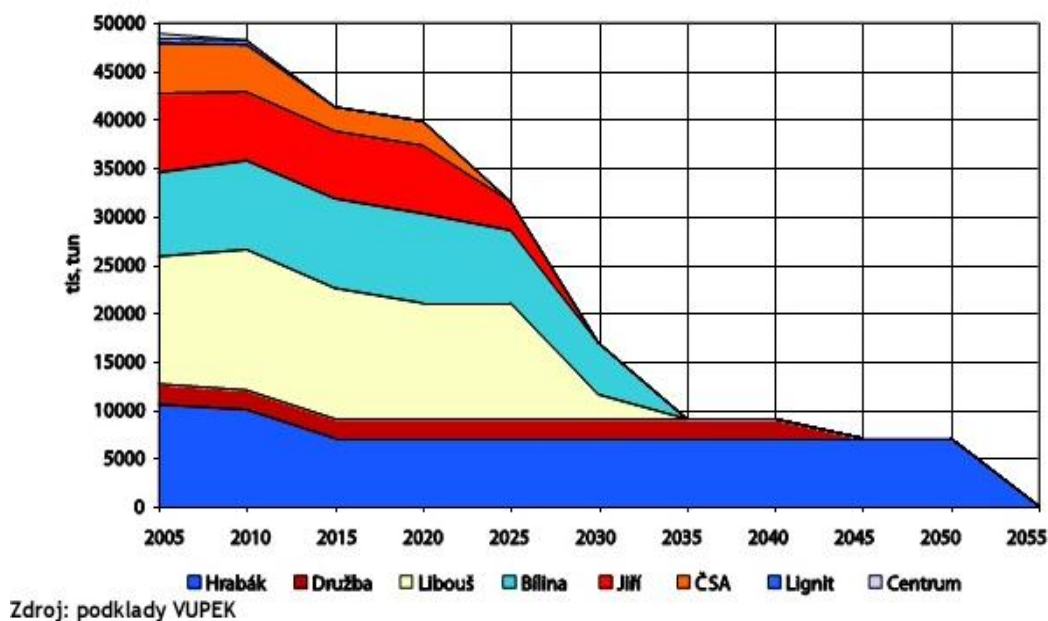
# 1 Úvod

V dnešní době je nezbytnou podmínkou rozvoje společnosti a výroby dostatek elektrické energie. Rychlý růst elektrické a tepelné energie ve světě vede ke zvyšování instalovaných výkonů elektráren, tepláren a objevovat další zdroje elektrické energie. V České republice [1] se dodávána do sítě elektrická energie z jaderných elektráren 33%, z uhelných elektráren 57%, z obnovitelných zdrojů 6%, (voda 3%, biomasa 1,74%, větrné elektrárny 0,35% a z fotovoltaických elektráren 0,11%) (Obr. 1-1).



Obr. 1-1: Podíl energie (převzato z [1])

Současná koncepce monopolního výrobce elektrické energie firmy ČEZ vychází jednak z předpokládaného útlumu výroby elektrické energie z uhelných elektráren, dále z předpokladu, že hlavním energetickým zdrojem budoucnosti bude výroba z jaderných elektráren a posílení výroby z obnovitelných zdrojů. Přesto však je z grafu životnosti zásob uhlí a lignitu dle dolů (Obr. 1-2) zřejmé, že výroba elektrické energie z uhelných elektráren je z hlediska zásob uhlí možná a v nejbližších letech a je i ekonomicky zajímavá. Vzhledem k připravenosti a ceně rozšíření jaderné elektrárny Temelín a k době výstavby je téměř jisté, že dodávky z uhelných elektráren budou tvořit i v nejbližší budoucnosti (v horizontu 15 let) ještě stále významný podíl na krytí spotřeby a vývozu elektrické energie.



Obr. 1-2: Životnost zásob hnědého uhlí a lignitu dle dolů (převzato z [1])

Česká republika je součástí Evropské unie a tedy i volného evropského trhu s elektrickou energií. Je také vázána směrnici a doporučeními Evropského parlamentu. Evropská unie stanovila pro každou členskou zemi cíl do roku 2020 pokrýt 20% své energetické spotřeby z obnovitelných zdrojů! Není to úkol jednoduchý. Situaci výrazně dále komplikuje negativní postoj některých zemí k výrobě elektrické energie z jaderných zdrojů, jejíž důsledek je odstavování vlastních jaderných zdrojů. Pochopitelně je tento postoj zárodkem tlaku proti přípravě a výstavbě nových jaderných elektráren v sousedních zemích.

V souladu s cílem EU současná koncepce výroby elektrické energie zahrnuje i rozvoj a využití energie z obnovitelných zdrojů (vody, větru, slunečního záření, biomasy a bioplynu). Rozvíjí se využívání tepelnými čerpadly, geotermální energie a energie kapalných biopaliv. Instalované výkony z větrných a fotovoltaických elektráren komplikují řízení výkonu v rozvodných sítích. Klasickým nejjednodušším přístupem řešení je pak výstavba záložních zdrojů o stejném výkonu, jejichž výkon je možno efektivně regulovat. Zde se prosazuje stavba plynových, paroplynových nebo uhelných elektráren. Součástí této strategie je i **obnova starších uhelných elektráren**, které však musí splňovat nová kvalitativně obchodně-technická i ekologická kritéria.



---

## 2 Cíle práce

Motivací ke vzniku práce a jejího obsahu byly potřeby výzkumného centra MŠMT 1M06059 „Progresivní systémy a technologie pro energetiku“, na jehož řešení se náš ústav spolupodílí. Požadavky na nové nebo rekonstruované tepelné elektrárny jsou již v průběhu projektových prací nejčastěji formulovány celkovou požadovanou účinností, která je extrémně vysoká a celou řadu dalších požadavků. Jsou známy i požadavky na budování uhelných elektráren, které pracují s nadkritickými parametry páry, které však, jak je známo, jsou špatně regulovatelné. Navíc mají extrémní nároky na tepelné vlastnosti použitých materiálů. Hledají se proto na jedné straně technologické uzly a veličiny podkritických uhelných elektráren, které fyzikálně umožní dosáhnout požadovaných zlepšení. Na druhé straně jsou hledány perspektivní metody řízení a regulace např. v rámci Centra energetiky, včetně jejich implementací na projektované nebo existující řídicí systémy. Rozhodujícím kritériem je splnění požadavků kvality regulace v celém požadovaném výkonovém rozsahu. Požadavky kladené na algoritmy a řídicí systémy tepelných elektráren v prostředí deregulovaného trhu jsou svým způsobem extrémní. Ukazuje se, že **tady je hranice implementací klasických PID regulátorů**. Rozumíme tomu tak, že nastavitelné parametry regulátorů jsou pevně zadané a během regulačního procesu neměnné. (Není uvažována adaptace parametrů regulátoru). Cíle doktorské práce byly rozděleny na globální a dílčí.

Globální cíle je pak možno formulovat takto:

1. Vypracovat metodiku návrhu struktur a syntézy robustní regulace teploty přehřáté páry ve **vysokotlaké části průtočného kotel**. Kotel je determinován technickými a konstrukčními parametry.
2. Vypracovat metodiku návrhu lineárního matematického modelu pro potřeby syntézy na základě reprezentace nelineárního stavového modelu průtočného kotle.
3. Ověřit funkčnost navržené robustní regulace na zvolených výkonových hladinách, poruchové a havarijní stavy včetně vyregulování poruchových veličin na teplotě přehřáté páry pomocí simulačních experimentů na nelineárním stavovém modelu průtočného kotle.
4. Vyhodnotit regulační pochody a analyzovat velikosti vstříků a dodržení tolerancí ve srovnání s regulačními pochody dosažených implementací projektovaného řídicího systému.

- 
5. Posoudit vlastnosti a možnosti robustního řízení při implementaci řízení s nelineárním modelem průtočného kotle.

Aby bylo možno naplnit globální cíle, je třeba vytyčit vývojové etapy a určit jejich dílčí cíle. Splnění dílčích cílů podmiňuje realizaci a zpracování dalších vývojových etap. Byly zvoleny následující dílčí cíle:

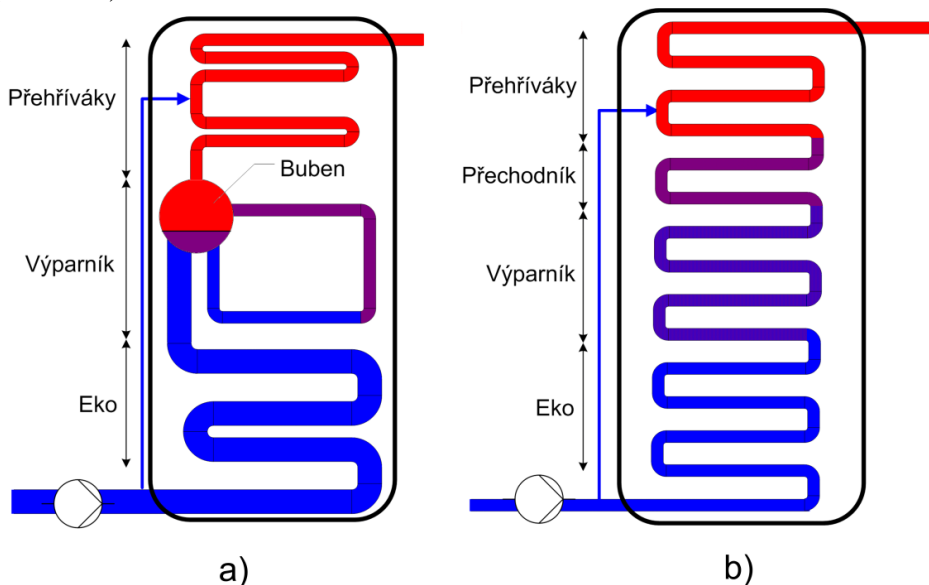
1. Vytvoření vhodného lineárního modelu technologického celku šoty I, II, a výstupního přehříváku, jako základního předpokladu syntézy robustních regulátorů.
2. Stanovení nestrukturovaných neurčitostí a určení jejich optimální struktury.
3. Implementovat a ověřit metodiku syntézy robustních PID regulátorů
4. Vypracovat metodiku a filozofii SISO robustních regulátorů procesu přehřívání vysokotlaké páry.
5. Vypracovat metodiku a strukturu MIMO regulace procesu přehřívání vysokotlaké páry.
6. Hodnocení vlastností robustní regulace
7. Zařazení vybraných technologických režimů a poruch do systému simulačních experimentů s robustními regulátory a s nelineárním stavovým modelem.

---

## 3 Současný stav

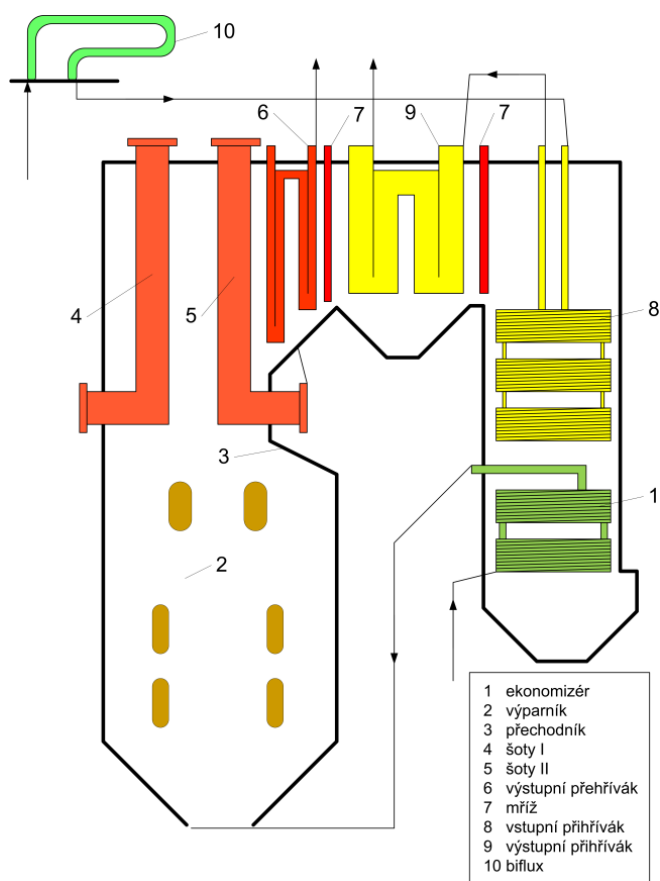
### 3.1 Konstrukce průtočných kotlů

Konstrukcí parních kotlů s ohledem na způsob proudění vody a páry existuje několik možností [2]. Obecně lze konstatovat, že se výkonné elektrárenské kotle dělí na bubnové a průtočné (Obr. 3-1).



Obr. 3-1: Princip bubnového (a) a průtočného (b) kotel (převzato z [3])

Je skutečností, že v současnosti převládají ve výrobě a v dodávkách nových nebo obnovovaných bloků moderní technologie, tedy převážně průtočné kotle. Práce je proto zaměřena na aplikaci sofistikovaných algoritmů na řízení technologických parametrů průtočného kotle [4] (obr. 3-2), stejné principy lze aplikovat i kotle bubnové. Kotel průtočný si můžeme v zjednodušené formě představit jako trubku, ve které se voda přemění na páru, a té se dodá další energie v přehřívácích. Kotel je konstruován [5], [6] a provozován [2] tak, že ke změně z vody na páru dojde už před přehříváky a dále proudí jen pára. Části před a za klíčovým prvkem kotle (výparník) se využívá nejprve ekonomizér, který je obvykle umístěn v zadním tahu. Oběžné trubky výparníku, se obvykle zařazují podél všech stěn topeniště kotle, kde mají spaliny nejvyšší teplotu. Pak jsou zařazeny přehříváky, které mají buď sálavou či konvekční charakteristiku. Přehříváky mají za úkol dodat páře dostatek energie, která je posléze využitelná na turbíně. Vstříkovými ventily zařazenými do oběhu v části přehříváků je zajištěno řízení výstupní teploty vysokotlaké páry. U dnešních obvykle používaných konstrukcí kotlů [2], [6] se ještě většinou využívá mezipřehřívání páry. Pára ve vysokotlaké části turbíny předá svou energii a dojde ke ztrátě teploty i tlaku, poté je znovu přehřívána v kotli a vedena do středotlaké nebo nízkotlaké části turbíny. Přehřívání páry je obvykle vícestupňové a řízení výstupní teploty středotlaké páry bývá zajištěno vstříky a obtoky. Dále je součástí kotle ještě protiproudý tepelný výměník biflux, jehož úkolem je energetická výměna mezi vysokotlakou (VT) a středotlakou (ST) párou.

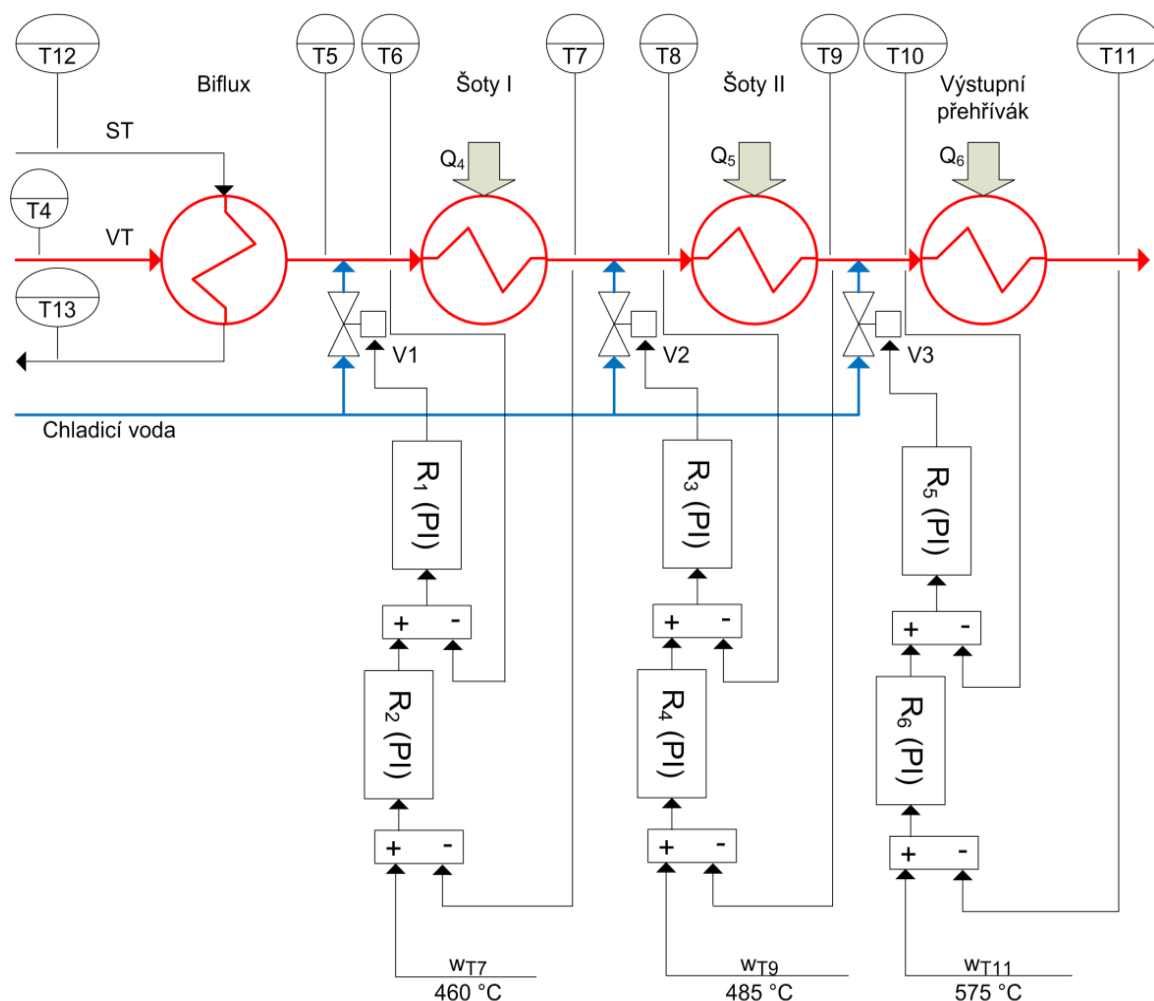


Obr. 3-2: Průtočný kotel (převzato z [3])

### 3.2 Současný řídicí systém přehřáté páry

Nejvýznamnější částí celého technologického uzlu vysokotlaké části výroby páry z hlediska regulace jsou šoty I, šoty II a výstupní přehřívák [2], [4], [6] neboť pouze tyto části mají možnost regulace teploty výstupní páry. Regulace je realizována vstříkem kondenzátu pomocí předřazených vstřikovacích ventilů V1, V2 a V3, které mají na všech významných výkonových hladinách nenulový průtok. Přísně vzato, za uvedených podmínek (konstantní tepelné příkony  $Q_1$ ,  $Q_2$  a  $Q_3$ ), představuje proces přehřívání páry nelineární vícerozměrový MIMO systém. Při změně výkonových hladin se mění i tepelné příkony a tento proces výrazně mění svoji dynamiku v rámci provozních výkonových hladin. Technická realizace řízení včetně jeho struktury je komponována jako **decentralizovaný systém řízení** se třemi nezávislými kaskádními smyčkami (subsystémy). Připomeneme si pouze, že akční veličinou je otevření ventilu V1, V2 a V3. Regulovanou veličinou je teplota přehřáté páry na výstupu ze subsystému.

Struktura **projektovaného řídicího systému** regulace přehřáté vysokotlaké páry [3], [7] vychází z klasické kaskádní regulace s regulátory typu PI(D) (Obr. 3-3). Ve schématu jsou vyznačeny v souladu s projektovou dokumentací vstřikovací ventily V1, V2 a V3, dále dodávaná tepla (tepelné příkony) na šotech I a II  $Q_4$ ,  $Q_5$ ,  $Q_6$  a měřené teploty T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12 a T13 a jejich využití v kaskádní regulaci.



**Obr. 3-3: Zjednodušené schéma stávajícího řídicího obvodu**

Projektovaný řídicí systém s PID regulátory upravuje automaticky během procesu regulace parametry regulátoru – provádí se jejich adaptace. Základem adaptace parametrů regulátorů je využívání databáze znalostí parametrů regulátorů při různých výkonových a provozních hladinách a režimech. Na základě dlouhodobých výzkumů, praktických zkoušek a seřizování parametrů regulace teploty přehřáté páry při různých výkonových hladinách, byla vytvořena databáze nastavení parametrů PID regulátorů pro různé typy parních kotlů. Tato databáze tvoří základ adaptace parametrů regulátorů v kaskádní regulaci. Databázový systém obsahuje ještě informace o požadovaných fyzikálních veličinách a parametrech pro jednotlivé provozní režimy a situace. Parametry regulátorů tedy nejsou konstantní, ale dosti složitým způsobem se spojitě mění na základě aktuálního stavu kotle, velikosti teploty, průtoku, tlaku a na základě aktuálního otevření ventilu. Veškeré tyto změny mají za úkol nastavit parametry regulátorů tak, aby byly optimální pro aktuální provozní režim kotle.

## 4 Teoretické základy robustní regulace

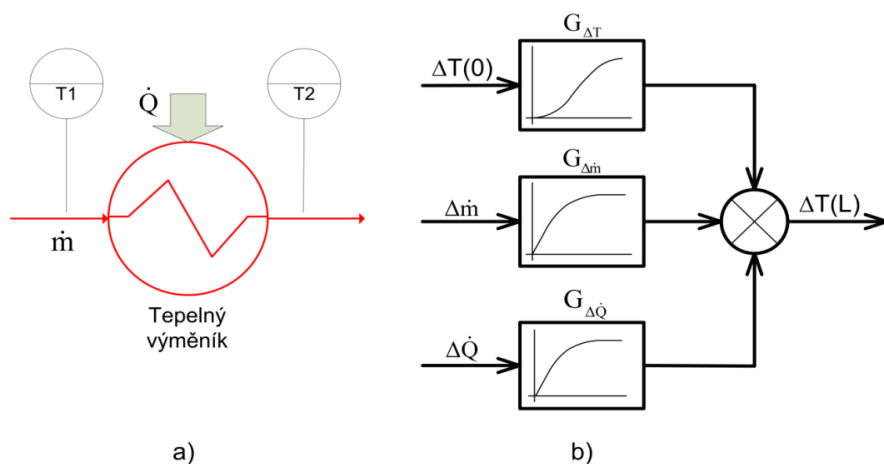
### 4.1 Možnosti lineární aproximace přehříváku

Návrh regulátoru se zpravidla provádí pro střední regulovaný výkon, nebo tzv. **jmenovitý/nominální** výkon daného zařízení. Syntéza robustních regulátorů je založena na znalosti **lineárního modelu**. Vzhledem k tomu, že se lineární model mění v závislosti na technologických režimech výrobních zařízení, vstupuje do procesu syntézy regulátoru **nominální model**, který respektuje charakteristické rysy a technologické režimy daného zařízení. Logicky z toho vyplývá, že prvním krokem je hledání lineárního modelu a následně pak nominálního modelu. Stojíme před úlohou, vytvořit lineární model přehříváku.

#### 4.1.1 Bloková struktura modelu přehříváku definovaná aproximačními přenosy

Přehřívák páry můžeme chápat jako proces přenosu tepelné energie mezi dvěma médii (Obr. 4-1 a)). Množství přiváděného tepla prvním médiem (teplonosné médium) označíme jako přiváděný tepelný příkon  $\dot{Q}$ . Druhé médium je přehřátá pára, která vstupuje o teplotě páry  $T_1$  a průtokovém množství  $\dot{m}$ . Výstupní teplotou a regulovanou veličinou je **výstupní teplota přehřáté páry**  $T_2$ . Z pohledu syntézy řídicího systému a regulace, je vhodné mít co nejjednodušší aproximaci obrazovým přenosem, který popisuje dynamické chování soustavy. Provedené zjednodušení musí alespoň v hlavních rysech zachovávat korespondenci modelu a systému v dynamickém i statickém chování. Náhrada u tepelných výměníků je samozřejmě možná. V literatuře jsou často uváděny struktury a aproximační přenosy [3] a v dalších. Dynamické chování každého řízeného tepelného výměníku je možno rozdělit do tří základních skupin [3]:

- změny vstupní teploty ohřívaného média,
- změny průtoku ohřívaného média,
- změny teploty či průtoku teplonosného média – změna dodávaného tepelného příkonu



Obr. 4-1: Blokové schéma aproximace tepelného přehříváku

Přehřívák tedy můžeme charakterizovat jako systém se třemi vstupy a jedním výstupem. Je zřejmé, že při řízení výstupní teploty přehříváků pomocí vstříkovaní kondensátu nebo vody, se aktivně využívá **změny vstupní teploty ohřívajícího média**. Jednotlivé účinky jsou pak aproximovány jednoduchými přenosovými funkcemi. Dynamická změna výstupní teploty je pak dána součtem jednotlivých účinků dílčích obrazových přenosů (Obr. 4-1 b)). Pro konstrukci většinou postačuje znalost o statických vlastnostech, ale pro syntézu řízení je nutná znalost dynamických vlastností. Přenosy jednotlivých účinků je možno vyjádřit ve tvaru [3], [6], [8]:

$$G_{\Delta T}(s) = \frac{\Delta T(L)}{\Delta T(0)} = \frac{K_T}{(T_T \cdot s + 1)^n}, \quad (4.1)$$

$$G_{\Delta \dot{Q}}(s) = \frac{\Delta T(L)}{\Delta \dot{Q}} = \frac{K_Q}{T_Q \cdot s + 1}, \quad (4.2)$$

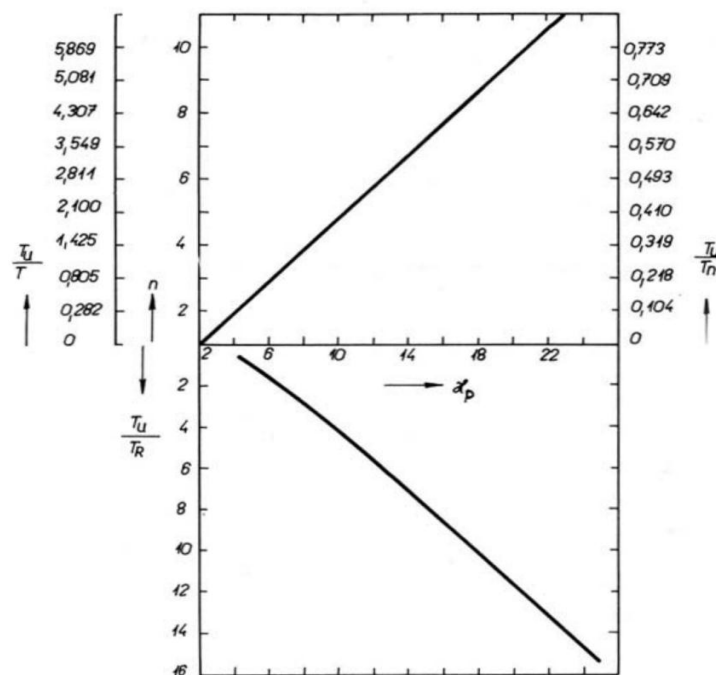
$$G_{\Delta \dot{m}}(s) = \frac{\Delta T(L)}{\Delta \dot{m}} = \frac{K_m}{T_m \cdot s + 1}, \quad (4.3)$$

kde  $K_T = \frac{c_p(0)}{c_p(L)}$ ,  $K_p = \frac{\alpha \cdot S}{c_p \cdot \dot{m}} \rightarrow n, n \in \mathbb{Z}$ ,  $T_T$  se určí z grafů (Obr. 4-2) jako nejbližší vhodná

náhrada pro systém s dobou průtahu  $T_u$ , dobou náběhu  $T_n$  a z časové konstanty  $T_R = \frac{m_{Fe} \cdot c_{Fe}}{\alpha \cdot S}$

(založeno na [9]). Dále je  $K_Q = T(L) - T(0)$ ,  $T_Q = [T(L) - T(0)] \cdot \frac{m_{Fe} \cdot c_{Fe}}{\alpha_{prostup} \cdot S_{out}}$ ,

$$K_m = (T(L) - T(0)) - \frac{\dot{m}}{T(L)} \cdot \left[ \frac{\partial(T(L) - T(0))}{\partial \dot{m}} \right]_{\dot{m}}, \quad T_m = \frac{m_{Fe} \cdot c_{Fe}}{\dot{m} \cdot c_p}.$$



Obr. 4-2: Aproximace konstant přenosu  $F_{\Delta T}$  (převzato z [6])

---

## 4.1.2 Linearizovaná část nelineárního modelu pro definované lokální vstupy a výstupy

Vzhledem k tomu, že máme k dispozici nelineární stavový model průtočného kotle v prostředí MatLabu, mohu využít k získání lineárního modelu lokální aproximaci lineárním modelem části nelineárního stavového modelu. V MatLabu jsou vyvinuty softwarové prostředky, které linearizaci umožňují. Je možno využítí funkcí *linearize*. Základem těchto metod je nahrazení dílčích bloků modelu v Simulinku lineárními stavovými rovnicemi. Tímto postupem se zachovává počet integrátorů v linearizovaném modelu a linearizovaný model má pak stejný řád jako nelineární část systému. Tato funkce po zadání vstupního místa a výstupního místa v daném simulačním schématu vrátí obrazový přenos mezi těmito definovanými místy. Můžeme tedy zase vytvořit sadu přenosů pro jednotlivé teplené výměníky (šoty I, šoty II, výstupní přehřívák) a dané výkonové hladiny v rozsahu 50 – 100%.

## 4.2 Metoda syntézy robustní regulace

### 4.2.1 Neurčitost

Pro modelování reálných dynamických systémů se nám nepodaří nikdy získat přesný matematický model. Řídicí systém, který je navržen pro matematický model v simulacích vykazuje vysokou kvalitu řízení a stabilitu, ale v reálném provozu může způsobovat nežádoucí kmitání nebo dokonce nestabilitu. Rozdíl mezi vytvořeným matematickým modelem a reálným systémem se v našem oboru nazývá *neurčitostí*.

Popisů neurčitosti v matematickém modelu existuje několik, avšak nejběžnější jsou následující tři [10], [11],

**Reálné parametrické neurčitosti** – struktura modelu je zde známa, ale některé fyzikální parametry v modelu jsou neurčité, pro které se zavede interval daný mezními hodnotami, ve které se může reálný parametr pohybovat

**Dynamické neurčitosti** – jde o obecnější popis než je parametrická neurčitost, jelikož do modelu zahrnuje zanedbané nebo nemodelované dynamiky, obvykle na vysokých frekvencích, buď úmyslným zanedbáním, nebo neznalostí fyzického procesu.

**Několik lineárních modelů** – jde o přirozený přístup popsání neurčitosti vzniklou změnou pracovního bodu nelineárního systému, kde každý z nich představuje v nějakém smyslu extrém v chování.

Multiplikativní neurčitost je vlastně aditivní neurčitost, která je normovaná na každé frekvenci přenosem systému. Tedy vyjadřuje relativní míru neurčitosti pro různé frekvence. Model perturbovaného systému  $G_p$  (Obr. 4-3) zahrnující multiplikativní neurčitost může mít tvar

$$G_p(s) = (1 + W_m(s)\Delta_m)G_{nom}(s) \quad (4.4)$$

Ve frekvenční oblasti pak platí

$$G_p(j\omega) = (1 + W_m(j\omega)\Delta_m)G_{nom}(j\omega) \quad (4.5)$$



Pro krajní případ položíme

$$\|\Delta_m\|_\infty = 1. \quad (4.6)$$

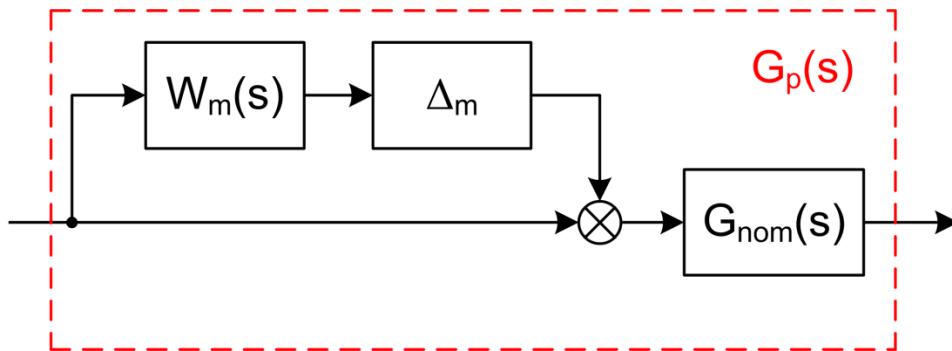
a rovnice (4.5) má pak tvar

$$G_p(j\omega) = (1 + W_m(j\omega))G_{nom}(j\omega) \quad (4.7)$$

Víme, že **přenos váhová funkce**  $W_m(j\omega)$  moduluje neurčitost v závislosti na frekvenci  $\omega$ . Z rovnice (4.7) je tedy **možno odhadnout toleranční oblast neurčitostí pomocí váhové funkce**  $W_m(j\omega)$ .

$$|W_m(j\omega)| \geq \max_{G_p} \left| \frac{G_p(j\omega) - G_{nom}(j\omega)}{G_{nom}(j\omega)} \right| \quad (4.8)$$

Takto zavedená amplitudová charakteristika váhové funkce  $W_m(j\omega)$  charakterizuje maximální možnou **chybu modelu** v závislosti na frekvenci  $\omega$ .



Obr. 4-3: Model vstupní multiplikativní neurčitosti

Modely zahrnující zbylé neurčitosti s kompletním popisem a všemi podrobnostmi jsou k dohledání v literatuře [10], [11].

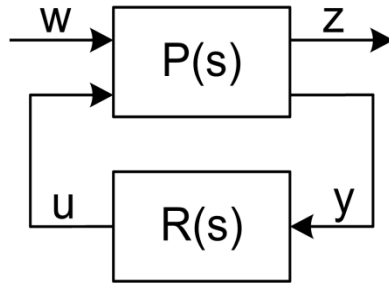
### 4.2.2 Syntéza robustního PID regulátoru

Dnes máme na výběr několik přístupů k návrhu robustních PID regulátorů. Jeden z přístupů návrhu robustního PID regulátoru je založen na Hermite-Biehlerově teorému [12], [13], který se dá rozdělit na dvě části. V první části se určí oblast stability pro zadaný systém a poté minimalizací podmínky robustnosti (4.9) získáme optimální parametry regulátoru. Pokud bude uvažována parametrická neurčitost, je nutné nejprve použít Kharitonovův teorém.

$$\min_{(k_p, k_i, k_d)} \|W_m(s)T(s)\|_\infty. \quad (4.9)$$

### 4.2.3 Syntéza $H_\infty$ regulátoru

Pro syntézu  $H_\infty$  regulátorů je dobré vyjít z modelu zobecněného uzavřeného obvodu (Obr. 4-4). Dynamika regulovaného systému je popsána blokovou přenosovou maticí  $P$ . Vstupem jsou dva vektory  $w$ ,  $u$ , kde  $w$  zde představuje vektor vnějších vstupů systému, jako jsou poruchy  $d$ , žádané hodnoty nebo šumové signály. Vektor  $u$  představuje výstup z regulátorů. Výstup je opět tvořen dvěma vektory  $z$ ,  $y$ . Vektor  $z$  představuje kritériální veličiny, které jsou minimalizovány ve smyslu splňující cíl řízení a  $y$  je vektor měřených veličin a vstupuje do regulátorů.



Obr. 4-4: Zobecněný model zpětnovazebního obvodu

Popis dynamiky zobecněného modelu uzavřeného obvodu má tvar

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = P(s) \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$u = R(s)y$$

Přenos  $G_{zw}$  je označován jako dolní lineární podílová transformace (dolní LFT) a má tvar

$$G_{zw} = G_l(P, R) = P_{11}(s) + P_{12}(s)R(s)(I - P_{22}(s)R(s))^{-1}P_{21}(s). \quad (4.11)$$

Na přenosu (4.11) se formuluje  $H_\infty$  optimální řízení. Existuje také horní LFT, která vyjadřuje vliv dynamické neurčitosti na dynamiku soustavy. Problém  $H_\infty$  optimálního řízení tedy můžeme zformulovat následovně

*Úkolem  $H_\infty$  optimálního řízení je nalézt všechny přijatelné regulátory  $R(s)$ , které minimalizují  $H_\infty$  normu z přenosové funkce  $G_{zw}$ .*

Avšak, nalezení  $H_\infty$  optimálního regulátoru je často velmi teoreticky i numericky náročné. Pro praxi proto není nutné navrhovat  $H_\infty$  optimální regulátor a je výhodnější získat *suboptimální*  $H_\infty$  regulátor. Problém suboptimálních  $H_\infty$  regulátorů je možno formulovat následovně

*Nechť existuje  $\gamma > 0$ , pak úkolem suboptimálního  $H_\infty$  řízení je nalézt všechny přijatelné regulátory  $R(s)$ , jestliže nějaké existují, které splňují podmínku  $\|G_{zw}\|_\infty < \gamma$ .*

Návrh robustního řízení pro nestrukturované neurčitosti provedeme pomocí minimalizace smíšené citlivosti. Nalezení optimálního  $H_\infty$  regulátoru minimalizací smíšené citlivosti a suboptimálního  $H_\infty$  regulátoru zapíšeme ve tvaru

$$\min_{R \text{ stabilizující}} \left\| \begin{bmatrix} W_p S \\ W_u R S \\ W_m T \end{bmatrix} \right\|_\infty. \quad (4.12)$$

Z praktického hlediska se místo optimálního  $H_\infty$  regulátoru hledá suboptimální  $H_\infty$  regulátor, který vyhovuje podmínce

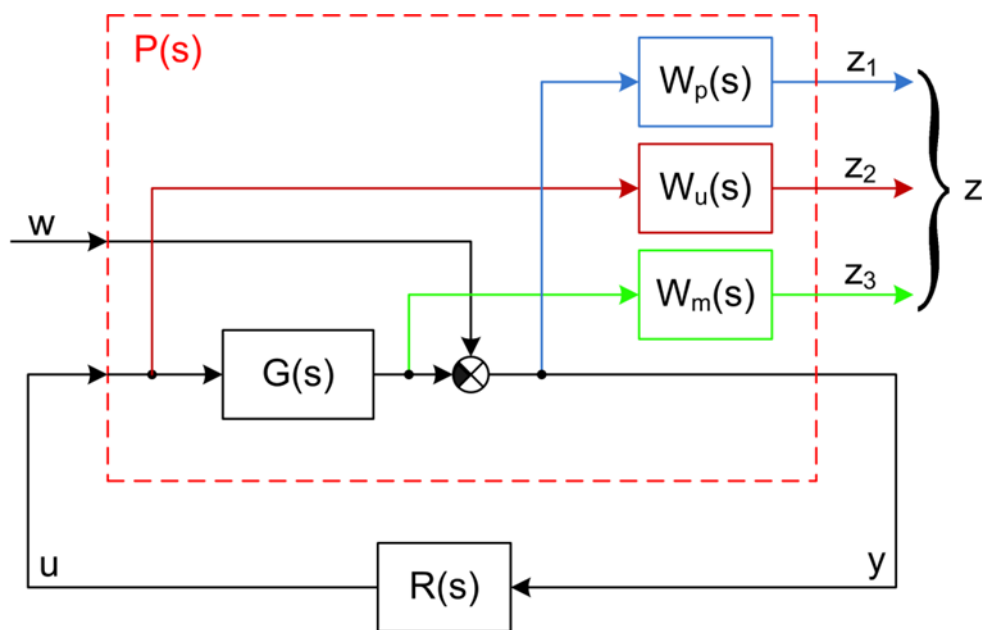
$$\|G_l(P, R)\|_\infty = \left\| \begin{bmatrix} W_p S \\ W_u R S \\ W_m T \end{bmatrix} \right\|_\infty < \gamma . \quad (4.13)$$

Signálový přístup k  $H_\infty$  optimalizaci pro nestrukturované neurčitosti je možno vyjádřit z blokového schématu na Obr. 4-5. Pro  $w(t)=1$  jsou pak kriteriální veličiny definovány

$$z_1 = W_1 \frac{1}{1+GR} w(t) = W_p S$$

$$z_2 = W_2 \frac{R}{1+GR} w(t) = W_u R S \quad \rightarrow \quad G_{zw} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_p S \\ W_u R S \\ W_m T \end{bmatrix} . \quad (4.14)$$

$$z_3 = W_3 \frac{GR}{1+GR} w(t) = W_m T$$



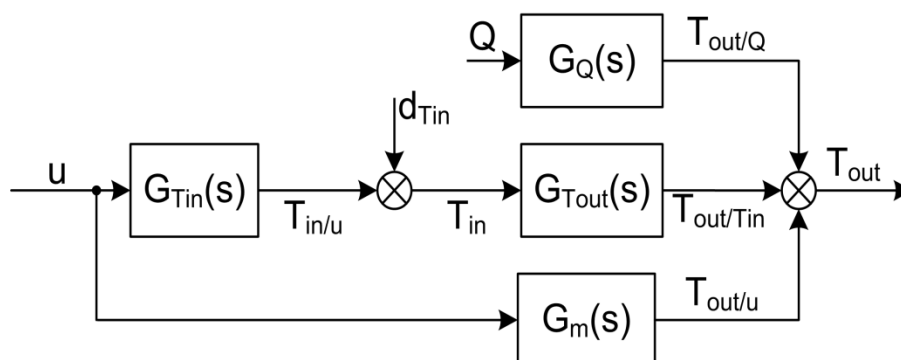
Obr. 4-5: Zobecněný model pro  $H_\infty$  optimalizaci

## 5 Vlastní řešení

### 5.1 Bloková struktura lineárního modelu definovanými obrazovými přenosy

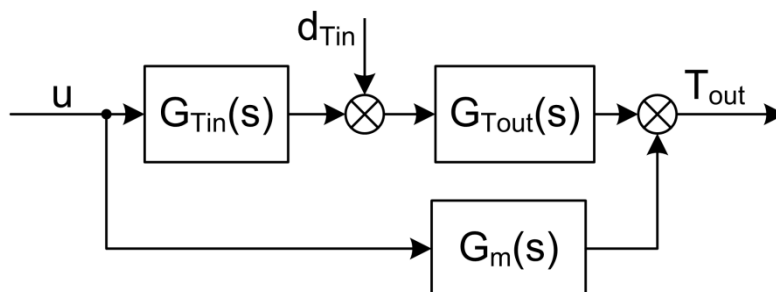
Technologicky je přehřívání páry realizováno kaskádní regulací, proto jsem upravil strukturu modelu dle Obr. 5-1, která obsahuje podstatné vlastnosti obvodu. Akční veličinou (manipulated variable) je poloha vstřikovacího ventilu vody  $u(t)$ , kterou měním množství vstřikované vody  $\dot{m}_{V3}$ . Tím měním vstupní teplotu páry do výměníku-přehříváku  $T_{in/u}$  za vstřikem. Skutečná vstupní teplota do výměníku je  $T_{in}$ , která je rovna  $T_{in} = T_{in/u} + d_{Tin}$ . Vycházíme z předpokladu lineární charakteristiky vstřikovacího ventilu.

Dynamický účinek akční veličiny  $u(t)$  na vstupní teplotu páry  $T_{in/u}$  je vyjádřen obrazovým přenosem  $G_{Tin}(s)$ . Dynamický účinek změny vstupní teploty  $T_{in}$  na výstupní teplotu přehříváku  $T_{out/Tin}$  je aproximován obrazovým přenosem  $G_{Tout}(s)$ . Vliv zvýšení průtoku vstřikovacím ventilem na teplotu  $T_{out/u}$  aproximuje obrazový přenos  $G_m(s)$ . Zvýšení tepelného příkonu aproximuje obrazový přenos  $G_Q(s)$ . Aditivní poruchová veličina na teplotě  $T_{in/u}$  je označena symbolem  $d_{Tin}$  a představuje účinek poruchových veličin na teplotě (Obr. 5-1).



Obr. 5-1: Struktura lineárního modelu tepelného výměníku s předřazeným vstřikem

Z hlediska návrhu algoritmu řízení přehřáté páry vstřikováním vody, není možno využít obrazový přenos  $G_Q(s)$  a je proto možné ho zanedbat. Struktura modelu se pak zjednoduší tak, jak je uvedeno na Obr. 5-2.



Obr. 5-2: Zjednodušená struktura lineárního modelu tepelného výměníku s předřazeným vstřikem

Parametrizace modelu je realizována tak, aby všechny jeho parametry a velikosti všech veličin odpovídaly reálným provozním veličinám. Dynamické a statické účinky vstřiku na změnu teploty za vstřikem jsou aproximovány obrazovým přenosem

$$G_{Tin}(s) = \frac{K_{Tin}}{(T_{Tin1} \cdot s + 1)(T_{Tin2} \cdot s + 1)}, \quad (5.1)$$

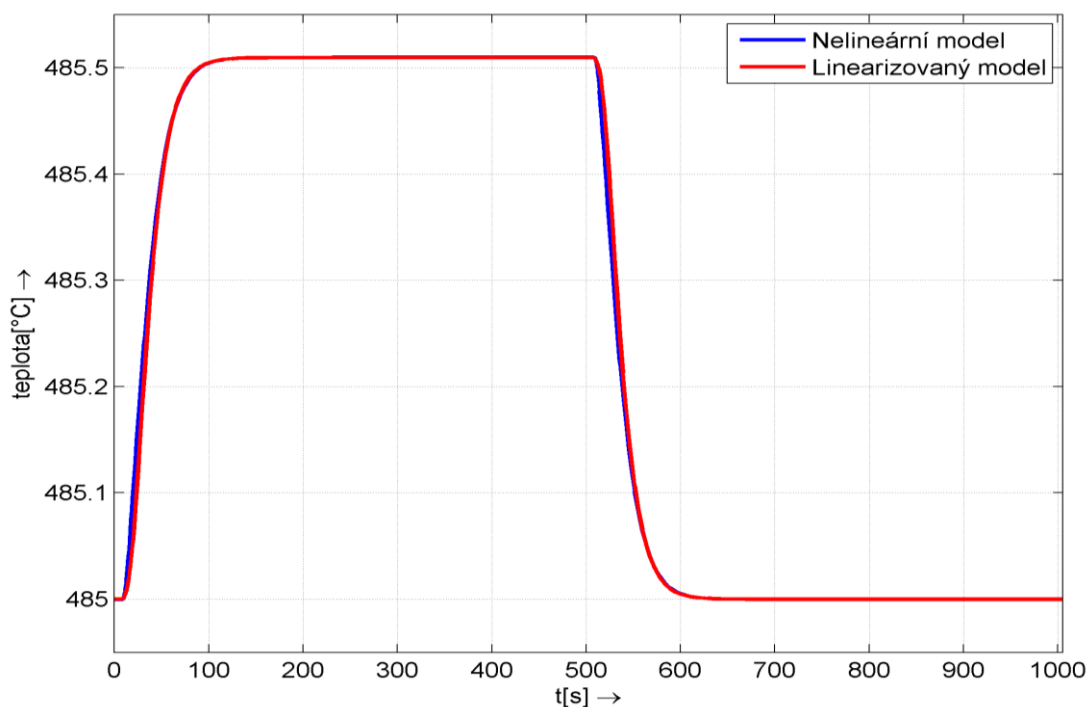
dynamické a statické účinky změn vstupní teploty na teplotu páry vystupující z přehříváku jsou aproximovány obrazovým přenosem

$$G_{Tout}(s) = \frac{K_{Tout}}{(T_{Tout} \cdot s + 1)^n}, \quad (5.2)$$

Dynamické a statické účinky změny polohy vstřiku na výstupní teplotu jsou aproximovány obrazovým přenosem

$$G_m(s) = \frac{K_m}{T_m \cdot s + 1}. \quad (5.3)$$

Porovnání shody linearizovaného modelu s nelineárním modelem tepelného výměníku šoty II je vidět na Obr. 5-3, při skokové změně o 0.01 otevření ventilu vstřiku na výkonové hladině 90%. Je vidět, že tvar odezvy je zachován a odchylky mezi oběma modely jsou nepatrné.



Obr. 5-3: Srovnání nelineárního a linearizovaného modelu

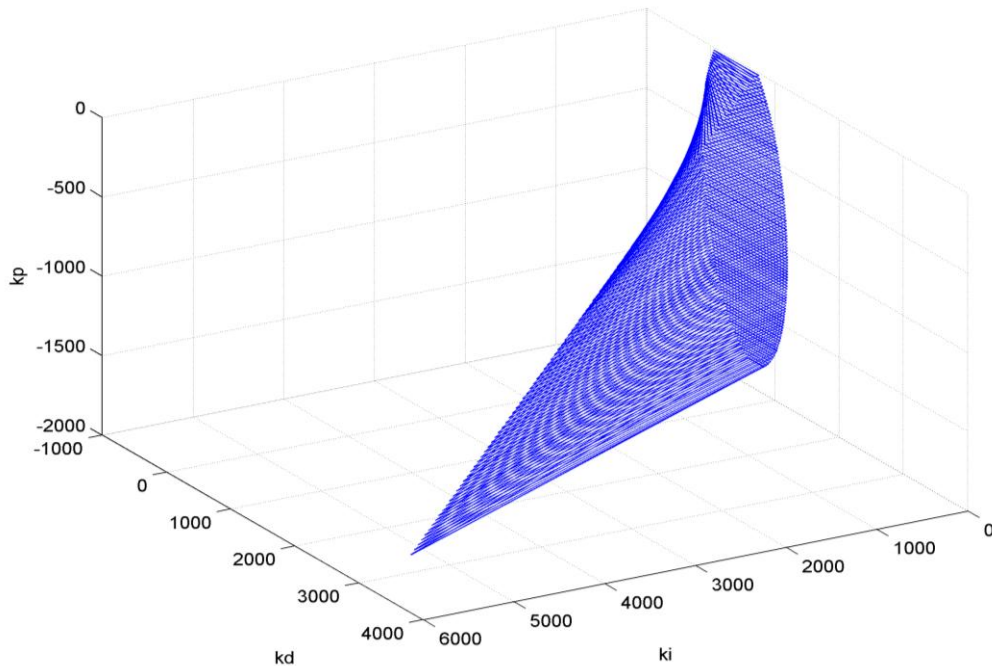
## 5.2 Linearizace nelineárního modelu

V druhé metodě jsem využil funkci *linearize*, která je k dispozici v softwaru MatLab. Vytvořil jsem opět sadu přenosů ( $G_{Tin}$ ,  $G_{Tout}$ ,  $G_m$ ) pro jednotlivé tepelné výměníky (šoty I, šoty II, výstupní přehřívák) a dané výkonové hladiny v rozsahu 50 – 100%. Linearizace opět byla provedena na nelineárním modelu. Získané přenosy byly vyššího řádu, který byl dán počtem integrátorů v požadované části v nelineárním modelu.



V první řadě byla vypočtena stabilní oblast (Obr. 5-6) a výsledné intervaly jednotlivých koeficientů jsou

$$\begin{aligned} k_p &\in (-1848.7 ; 2.7175) \\ k_i &\in (0 ; 5555.6) \\ k_d &\in (-128.56 ; 3183.3) \end{aligned} \quad (5.4)$$

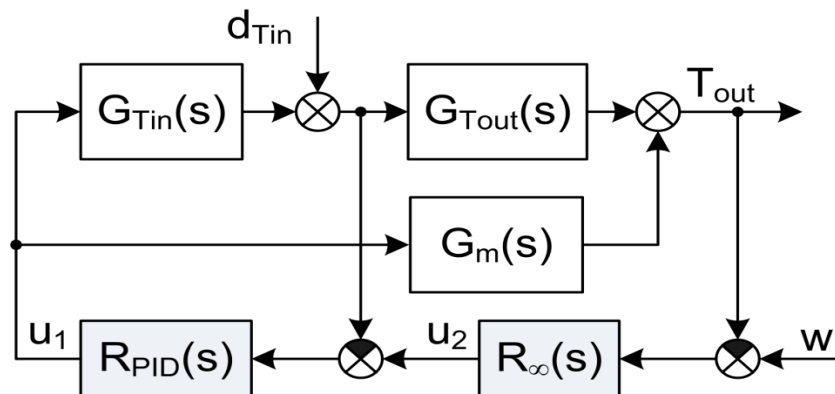


Obr. 5-6: Oblast stability pro parametry  $k_p, k_i, k_d$

Nyní stačí provést minimalizaci  $H_\infty$  normy z vážené doplňkové citlivostní funkce (4.9) a získáme koeficienty hledaného robustního PID regulátoru.

### 5.3.2 Syntéza robustních PID a $H_\infty$ regulátorů v kaskádní struktuře pro VT část

V této kapitole se budeme zabývat syntézou  $H_\infty$  regulátoru při zachování kaskádní struktury, přičemž ve vnitřní smyčce bude zapojen robustní proporcionální regulátor  $R_{PID}(s)$ , který byl navržen v předcházející kapitole. Vlastní robustní  $H_\infty$  regulátor  $R_\infty(s)$  je zapojen ve vnější regulační smyčce tak, jak je znázorněno na Obr. 5-7.



Obr. 5-7: Bloková struktura pro syntézu  $H_\infty$  regulátoru v kaskádní struktuře

Z Obr. 5-7 si vyjádříme opět přenos  $G_{T_{out}u_2}$ , který bude potřebný pro syntézu robustního regulátoru  $R_{\infty}(s)$  ve vnější smyčce. Přenos má tvar

$$G_{T_{out}u_2}(s) = \frac{R_{PID}(s)G_{T_{in}}(s)G_{T_{out}}(s) + R_{PID}(s)G_m(s)}{1 - R_{PID}(s)G_{T_{in}}(s)}. \quad (5.5)$$

Pro nalezení optimálního  $H_{\infty}$  regulátoru minimalizací smíšené citlivosti probrané v kapitole 4.2.3, řešíme (4.12) respektive (4.13). Je třeba zvolit a parametrizovat jednotlivé váhové funkce  $W_p, W_u, W_m$ .

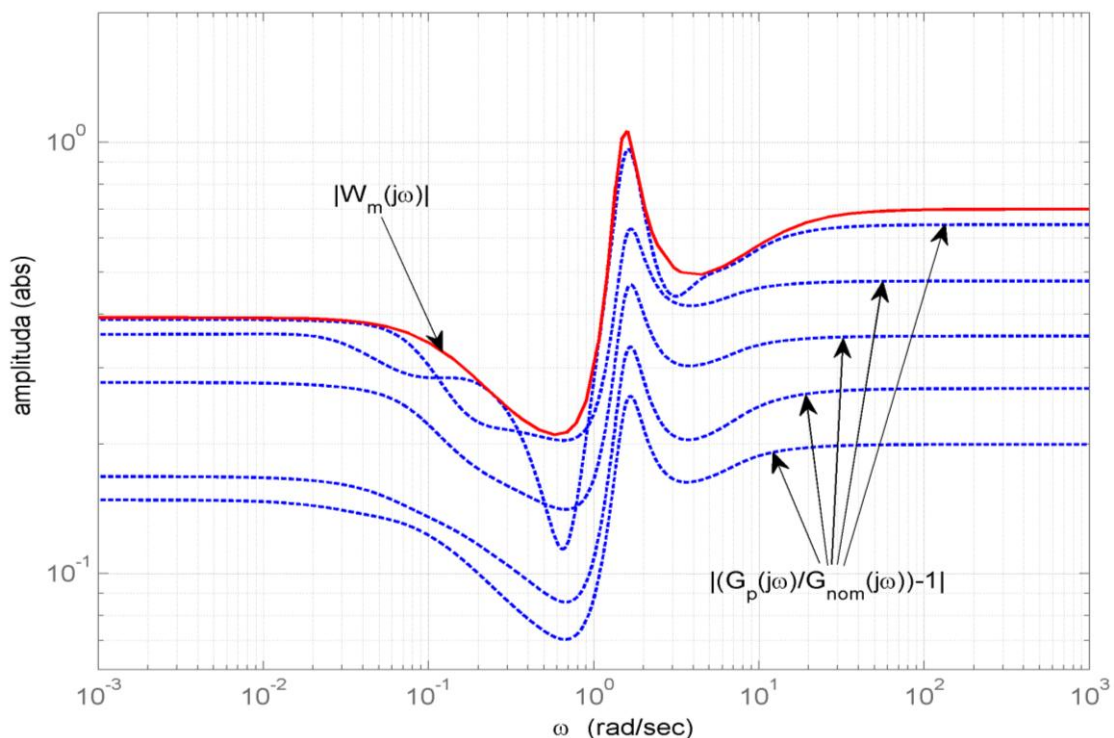
Váhová funkce  $W_p$  udává požadavek na tvar citlivostní funkce  $S$ . Po řadě experimentů jsem zvolil váhovou funkci  $W_p$  pro nominální model  $G_{nom}$  ve tvaru

$$W_p(s) = \frac{0.6667s + 0.1995}{s + 1.995 \cdot 10^{-5}}. \quad (5.6)$$

V souladu se zavedenou multiplikativní neurčitostí nalezneme váhovou funkci  $W_m$  jako obálku dílčích relativních neurčitostí, tak jak jsem to uvedl v kapitole 4.2.1. Jako příklad uvádím váhovou funkci  $W_m$  pro nominální lineární model tepelného přehříváku šotů II na výkonové hladině 70%, která má tvar

$$W_m(s) = \frac{0.7001s^4 + 4.582s^3 + 5.858s^2 + 5.531s + 1.312}{s^4 + 10.26s^3 + 8.391s^2 + 23s + 3.343}. \quad (5.7)$$

Pro zajímavost uvádím amplitudové frekvenční charakteristiky jednotlivých relativních neurčitostí na daných výkonových hladinách a jejich obalovou křivku  $|W_m(j\omega)|$ , které jsou zobrazeny na Obr. 5-8. Z obrázku je zřejmé, jakým způsobem váhová funkce  $W_m(s)$  vytváří obálku a tedy i horní mez k amplitudovým charakteristikám relativních neurčitostí.

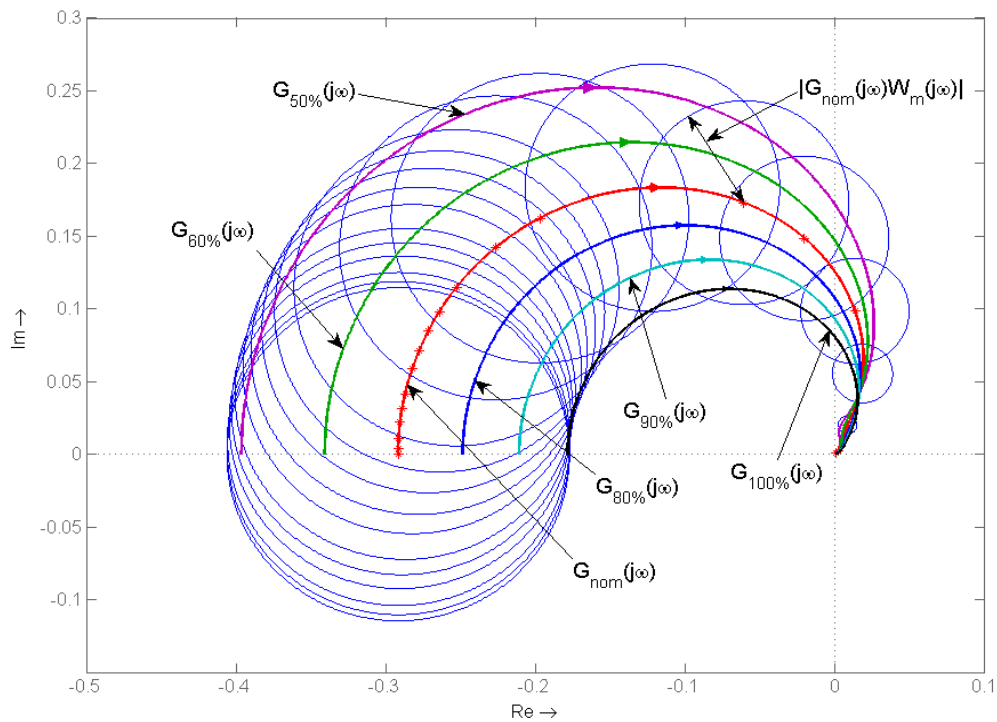


**Obr. 5-8: Amplitudová charakteristika relativní neurčitost a váhová funkce  $W_m$  pro šoty II**



Na Obr. 5-9 je zobrazena frekvenční charakteristika v komplexní rovině jmenovitého přenosu  $G_{nom}(j\omega)$  a množiny přenosů aproximujících dynamiku soustavy na jednotlivých výkonových hladinách  $G_{50\%}(s)$ ,  $G_{60\%}(s)$ ,  $G_{80\%}(s)$ ,  $G_{90\%}(s)$ ,  $G_{100\%}(s)$ .

Pro multiplikativní neurčitost si můžeme vyjádřit kruhovou množinu hodnot v komplexní rovině (Obr. 5-9), což je kruh se středem v  $G_{nom}(j\omega)$  a poloměrem  $|G_{nom}(j\omega) W_m(j\omega)|$ . Poloměr kružnic  $|G_{nom}(j\omega) W_m(j\omega)|$  se středem na frekvenční charakteristice  $G_{nom}(j\omega)$  tedy definuje maximální neurčitost pro dané  $\omega$ .



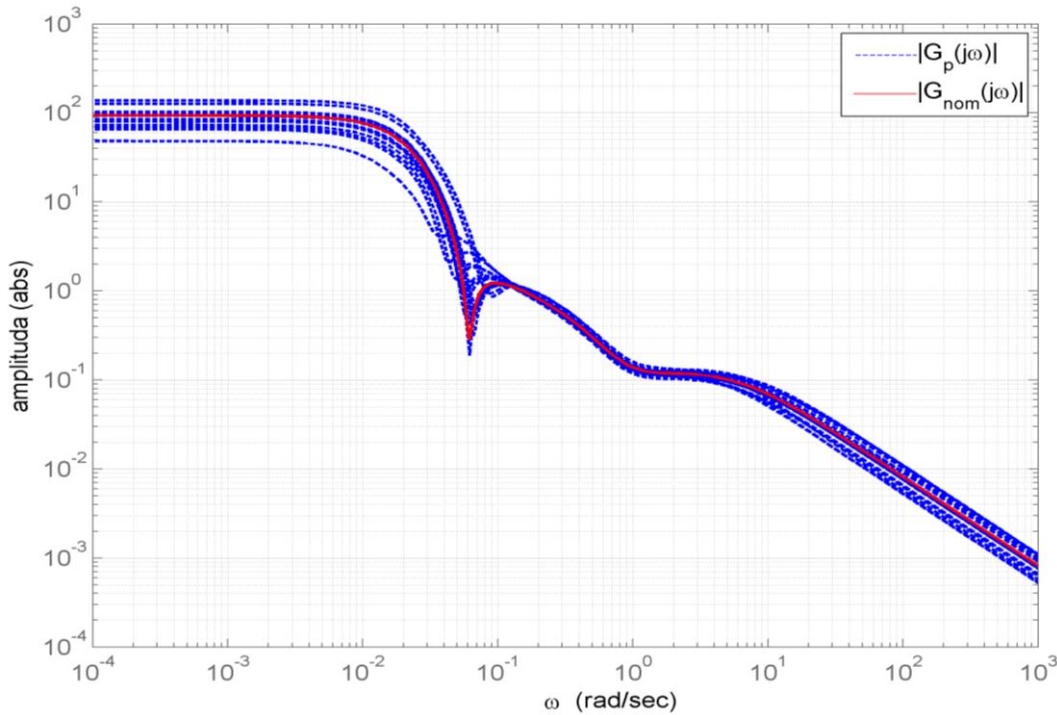
**Obr. 5-9: Kruhové množiny hodnot při multiplikativní neurčitosti pro šoty II**

Amplitudová frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích nominálního přenosu  $|G_{nom}(j\omega)|$  a množiny neurčitostí jsou na (Obr. 5-10). Na základě průběhů frekvenční charakteristiky a amplitudy  $G_{nom}(s)$  v obrázcích Obr. 5-9, Obr. 5-10 usuzujeme, že nominální výkonová hladina je stanovena v celku správně.

Váhovou funkci  $W_u$  penalizující akční veličinu jsem volil jako konstantní člen.

$$W_u(s) = 0.01. \quad (5.8)$$

Nyní máme vše potřebné pro syntézu  $H_\infty$  regulátoru minimalizací smíšené citlivosti probrané v kapitole 4.2.3, řešíme (4.12) respektive (4.13). Výpočet jsem provedl v softwaru MatLab, kde jsem si vytvořil m-file, v němž využívám funkce *mixsyn*.



**Obr. 5-10: Amplitudová charakteristika perturbovaného systému  $G_p$  s multiplikativní neurčitostí a nominálního systému  $G_{nom}$**

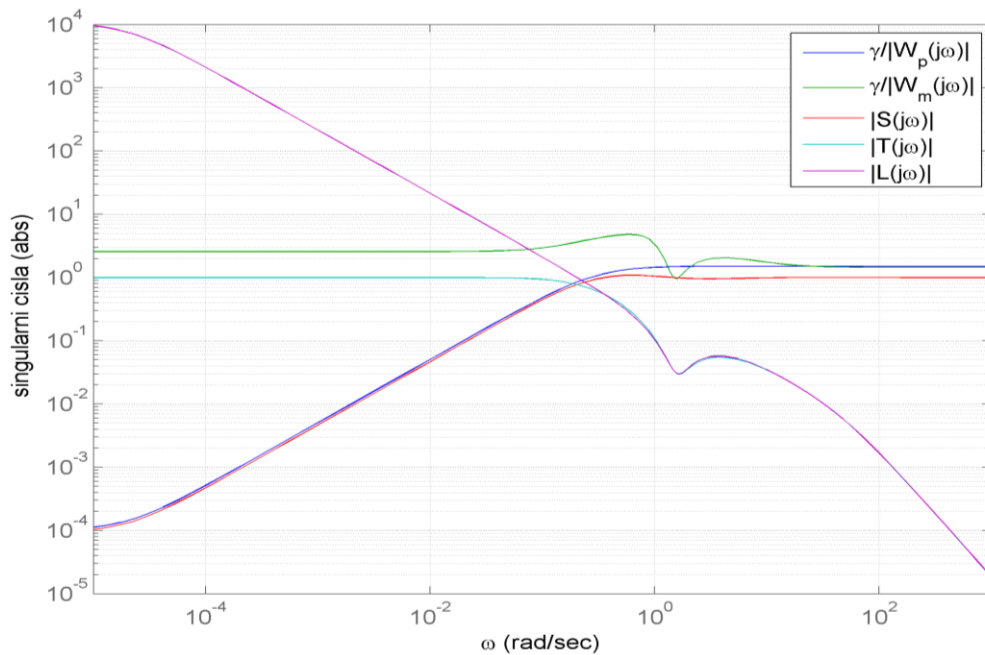
Výsledný obrazový přenos  $H_\infty$  regulátoru jsem upravil následujícím způsobem: nejmenší kořenový činitel jmenovatele přenosu regulátoru v absolutní hodnotě je roven  $(s+1.995 \cdot 10^{-5}) \approx (s+0) = s$ . Jinými slovy, tento kořenový činitel se aproximuje činitelem „s“, tedy v přenosu regulátoru je obsažen integrátor. Po této jednoduché úpravě jmenovatele obrazového přenosu regulátoru pro nominální soustavu  $G_{nom}$  je přenos regulátoru roven

$$R_\infty(s) = \frac{-3521.0534(s+9.633)(s+5.411)(s+3.901)(s+0.1523)}{s(s+47.16)(s+9.639)(s+4.77)(s+3.575)(s+1.156)} \cdot \frac{(s+0.04008)(s^2+0.0964s+0.00251)(s^2+0.09991s+0.003272)}{(s+0.1464)(s+0.06847)(s^2+0.09757s+0.002561)} \cdot \frac{(s^2+0.75s+0.1656)(s^2+0.4747s+2.279)(s^2+9.209s+62.44)}{(s^2+0.3395s+0.03524)(s^2+0.4749s+2.28)(s^2+9.219s+62.31)} \quad (5.9)$$

Hodnota  $\gamma$  z (4.13) je  $\gamma=1.0104$ . Průběhy amplitudových frekvenčních charakteristik citlivostní funkce  $|S(j\omega)|$ , doplňkové citlivostní funkce  $|T(j\omega)|$ , přenos otevřené smyčky  $|L(j\omega)|$  a amplitud  $\gamma|W_p(j\omega)|$ ,  $\gamma|W_m(j\omega)|$  jsou na Obr. 5-11. Z obrázku je zřejmé, jak jsou podmínky z (4.12) splněny.

Robustní  $H_\infty$  regulátor vychází pro implementaci v simulačním modelu příliš vysokého řádu. Bylo vhodné i nutné provést jeho redukci. Z možností redukování řádu jsem zvolil postup minimalizující Hankelovu normu. Výsledný robustní regulátor má pak tvar

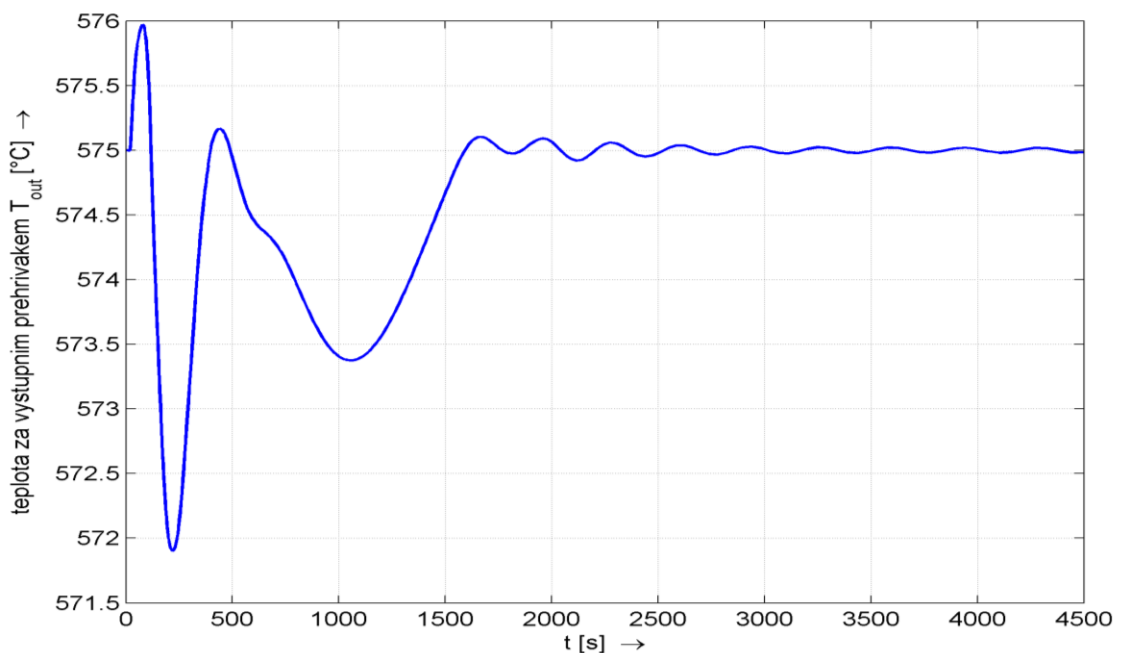
$$R_{\infty red}(s) = \frac{-2942.4854(s+0.4274)(s^2+0.04776s+0.001157)}{s(s+37.81)(s+0.8557)(s+0.06121)} \quad (5.10)$$



**Obr. 5-11: Singulární čísla pro  $S$ ,  $T$ ,  $L$ ,  $\gamma/W_p$ ,  $\gamma/W_m$**

Simulační experimenty, ověřující nastavení řídicího systému byly provedeny na stavovém nelineárním modelu vysokotlaké části výroby páry.

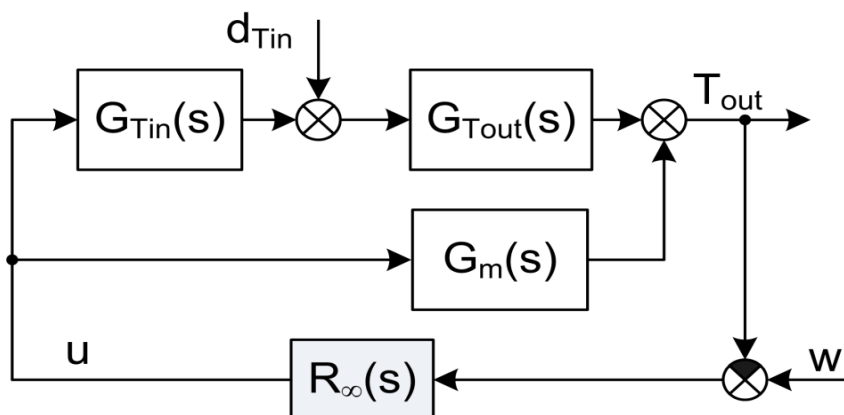
Technologicky je modelován poruchový stav-výpadek jednoho oběhového čerpadla, což technicky znamená, že průtok poklesne na 50% jmenovitého průtoku při výkonové hladině 100%. V rámci „Organizátoru řízení kotle“ musí se snížit tepelný příkon ze 100% na 50%. Snížení výkonu bylo provedeno jako skoková změna tepelného příkonu ze 100 % na 50 %, trend změny -50 % / 90s. Všechny změny byly provedeny v čase 20s a byla uvažována přestavná doba ventilu 30 sekund. Vlastní regulační proces teploty za výstupním přehřívákem je na Obr. 5-12.



**Obr. 5-12: Výstupní teplota za výstupním přehřívákem při skokové změně výkonové hladiny 100% na 50% pro kaskádní zapojení PID a  $H_\infty$  regulátoru**

### 5.3.3 Syntéza robustních $H_\infty$ regulátorů pro VT část

V rámci mé práce jsem také hledal možnosti zjednodušení regulační struktury procesu přehřívání páry, která by s robustním regulátorem dávala dobré výsledky. V podstatě je možné jediné zjednodušení a to vynechání malé regulační smyčky. Struktura zjednodušeného obvodu je na Obr. 5-13.



Obr. 5-13: Bloková struktura pro syntézu  $H_\infty$  regulátoru

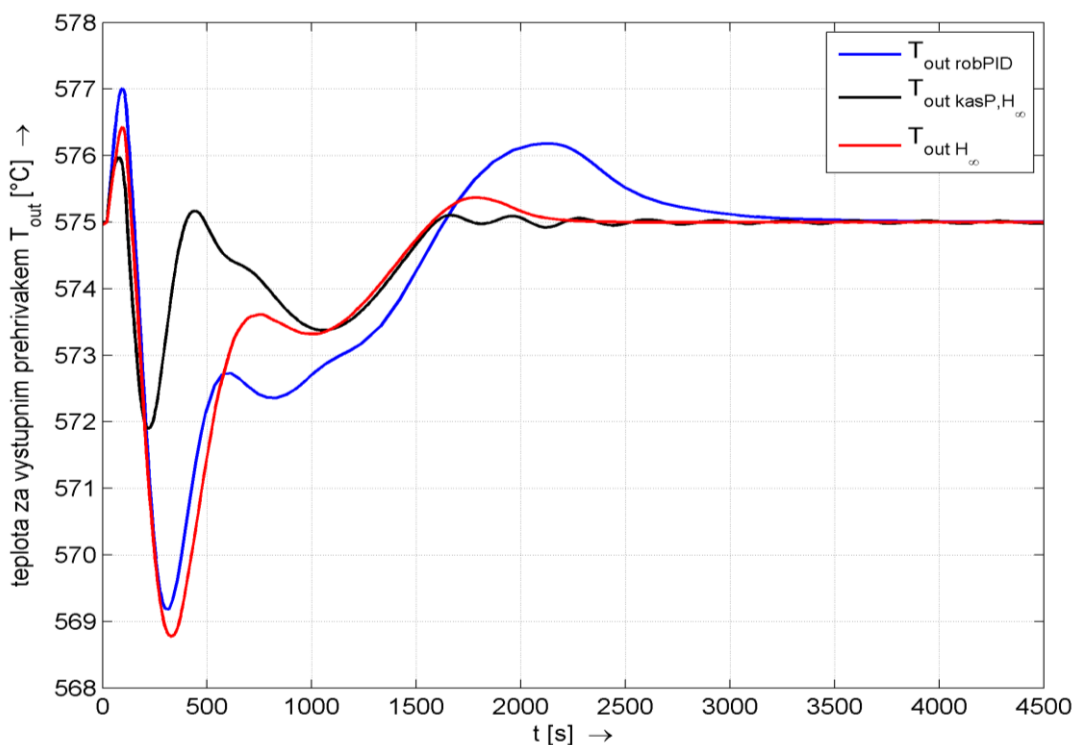
Z Obr. 5-13 si vyjádříme přenos  $G_{T_{out}u}$ , který bude potřebný pro syntézu robustního regulátoru  $R_\infty(s)$ . Přenos má tvar

$$G_{T_{out}u}(s) = G_{T_{in}}(s)G_{T_{out}}(s) + G_m(s). \quad (5.11)$$

Pro nalezení optimálního  $H_\infty$  regulátoru minimalizací smíšené citlivosti probrané v kapitole 4.2.3, řešíme (4.12) respektive (4.13). Chybí nám tedy určit jednotlivé váhové funkce  $W_p, W_u, W_m$ . Váhová funkce  $W_p$  nám udává požadavek na tvar citlivostní funkce  $S$ . Váhová funkce  $W_m$  tvoří obálku k amplitudovým charakteristikám relativních neurčitostí. Váhová funkce  $W_u$  penalizuje akční veličinu. Robustní  $H_\infty$  regulátor vychází pro implementaci v simulačním modelu příliš vysokého řádu. Bylo vhodné provést jeho redukci. Z možností redukování řádu jsem zvolil postup minimalizující Hankelovu normu.

Simulační experimenty, ověřující nastavení řídicího systému byly provedeny na stavovém nelineárním modelu vysokotlaké části výroby páry. Všechny změny byly provedeny v čase 20s a byla uvažována přestavná doba ventilu 30 sekund. Byl proveden experiment - skoková změna tepelného příkonu ze 100 % na 50 %, trend změny -50 % / 90s.

Při implementaci metod robustního decentralizovaného řízení při dané struktuře byly navrženy robustní PID regulátory a robustní  $H_\infty$  regulátory včetně robustních  $H_\infty$  regulátorů se změněnou strukturou – bez malých regulačních P smyček. Posoudíme-li vlastnosti decentralizovaného řízení regulačních pochodů přehřáté páry pro jednotlivé typy regulací (Obr. 5-14), pak z porovnání jednotlivých průběhů teplot plyne: charakter průběhu teplot se nemění, po skokové změně výkonu dochází ke zvýšení teploty cca o  $2^\circ\text{C}$ , následuje prudké ochlazení na cca  $569\text{-}572^\circ\text{C}$ . Domnívám se, že zlepšení průběhu teplot je možno dosáhnout lepší kooperací jednotlivých vstřikovacích ventilů (akčních veličin).



Obr. 5-14: Výstupní teplota za výstupním přehřívákem při skokové změně výkonové hladiny 100% na 50% pro navržené SISO robustní řídicí systémy

## 5.4 Syntéza centralizovaného robustního $H_\infty$ regulátoru pro VT část

V této části se budeme zabývat syntézou  $H_\infty$  regulátoru pro MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) systém tvořený třemi regulovatelnými tepelnými přehříváky vysokotlaké části výroby páry. Pro každý tepelný přehřívák **bude zachována vnitřní smyčka** tvořena robustním proporcionálním regulátorem  $R_{PID}$ , jehož parametry byly vypočteny v kapitole 5.3.1. Pomocí takto zavedeného lineárního MIMO systém bude zapojen s vícerozměrový robustní  $H_\infty$  regulátor  $R_\infty(s)$ .

Bloková struktura **linearizovaného procesu přehřívání páry** s centralizovaným regulátorem je na Obr. 5-15. Systém má tři vstupy  $u_{sI}$ ,  $u_{sII}$ ,  $u_{vp}$  a tři výstupy (teploty přehřáté páry za šotem I, šotem II a za výstupním přehřívákem)  $T_{sI}$ ,  $T_{sII}$ ,  $T_{out}$ . Z hlediska regulace vstupy-akční veličiny  $u_{sI}$ ,  $u_{sII}$ ,  $u_{vp}$  představují žádané hodnoty teplot, které jsou zadávány do malých regulačních smyček. Pro takto definované vstupy a výstupy je výstup systému (MIMO proces přehřívání páry) definován rovnicí (5.12)

$$\begin{bmatrix} T_{sI} \\ T_{sII} \\ T_{out} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} G_{T_{sI}/u_{sI}}(s) & 0 & 0 \\ G_{T_{sII}/u_{sI}}(s) & G_{T_{sII}/u_{sII}}(s) & 0 \\ G_{T_{out}/u_{sI}}(s) & G_{T_{out}/u_{sII}}(s) & G_{T_{out}/u_{vp}}(s) \end{bmatrix}}_{\mathbf{G}(s)} \begin{bmatrix} u_{sI} \\ u_{sII} \\ u_{vp} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Prvky přenosové matice systému  $\mathbf{G}(s)$  určíme ze schématu linearizovaného procesu přehřívání páry (Obr. 5-15). Pro dílčí přenos  $G_{T_{sI}/u_{sI}}$  podle blokové algebry plyne

$$G_{T_{sI}/u_{sI}}(s) = \frac{R_{PID_{sI}}(s)G_{T_{insI}}(s)G_{T_{outsI}}(s) + R_{PID_{sI}}(s)G_{msI}(s)}{1 + R_{PID_{sI}}(s)G_{T_{insI}}(s)}. \quad (5.13)$$

Pro dílčí přenos  $G_{T_{sII}/u_{sI}}$  můžeme odvodit

$$\begin{aligned} G_{T_{sII}/u_{sI}}(s) &= \frac{R_{PID_{sI}}(s)G_{T_{insI}}(s)G_{T_{outsI}}(s)G_{T_{outsII}}(s)}{1 - (R_{PID_{sI}}(s)G_{T_{insI}}(s) + R_{PID_{sII}}(s)G_{T_{insII}}(s))} \\ &+ \frac{R_{PID_{sI}}(s)G_{T_{insI}}(s)G_{T_{outsI}}(s)R_{PID_{sII}}(s)G_{msII}(s) + R_{PID_{sI}}(s)G_{msI}(s)G_{T_{outsII}}(s)}{(R_{PID_{sI}}(s)G_{T_{insI}}(s))} \\ &+ \frac{R_{PID_{sI}}(s)G_{msI}(s)R_{PID_{sII}}(s)G_{msII}(s)}{R_{PID_{sII}}(s)G_{T_{insII}}(s)}. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Postupným dosazením je možno získat výsledný přenos. Podobně je možno získat i zbývající dílčí přenosy  $G_{T_{out}/u_{sI}}$ ,  $G_{T_{sII}/u_{sII}}$ ,  $G_{T_{out}/u_{sII}}$  a  $G_{T_{out}/u_{vp}}$ . Pro kontrolu konkrétních prvků přenosové matice jsem využíval podpory Matlabu, kde jsem pracoval s funkcí „mason.m“. Využívání této funkce přináší na jedné straně nespornou úsporu času a garanci správnosti vypočteného přenosu na druhé straně však výsledek není nijak vhodně upravován ani krácen. Můžeme porovnat přenos  $G_{T_{sI}/u_{sI}}$ , který byl vypočten ve vzorci (5.13) a výsledek z funkce „mason.m“.

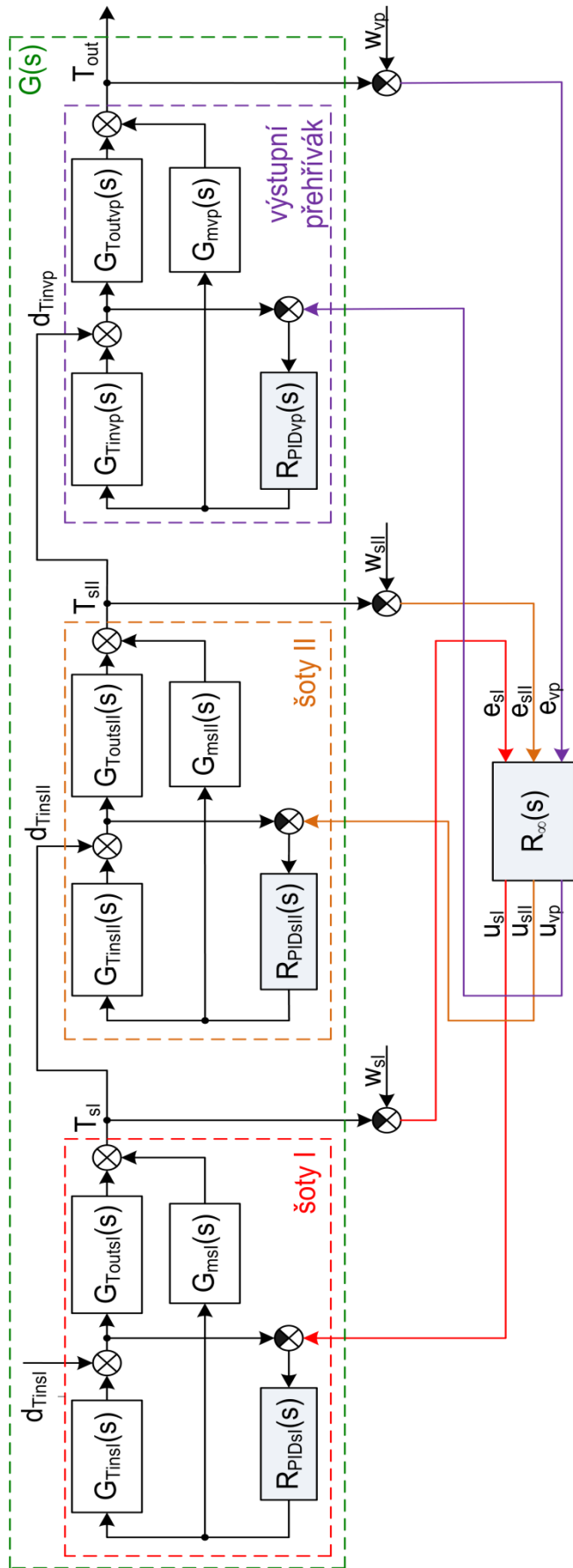
$$\begin{aligned} G_{T_{sI}/u_{sI}} &= \frac{R_{PID_{sI}}G_{T_{insI}}G_{T_{outsI}}(1 - (R_{PID_{sII}}G_{T_{insII}} + R_{PID_{vp}}G_{T_{invp}}))}{1 - (R_{PID_{sI}}G_{T_{insI}} + R_{PID_{sII}}G_{T_{insII}} + R_{PID_{vp}}G_{T_{invp}})} \\ &+ \frac{(R_{PID_{sII}}G_{T_{insII}}R_{PID_{vp}}G_{T_{invp}}) + R_{PID_{sI}}G_{msI}(1 - (R_{PID_{sII}}G_{T_{insII}} + R_{PID_{vp}}G_{T_{invp}}))}{(R_{PID_{sI}}G_{T_{insI}}R_{PID_{sII}}G_{T_{insII}} + R_{PID_{sI}}G_{T_{insI}}R_{PID_{vp}}G_{T_{invp}})} \\ &+ \frac{(R_{PID_{sII}}G_{T_{insII}}R_{PID_{vp}}G_{T_{invp}})}{(R_{PID_{sII}}G_{T_{insII}}R_{PID_{vp}}G_{T_{invp}}) - (R_{PID_{sI}}G_{T_{insI}}R_{PID_{sII}}G_{T_{insII}}R_{PID_{vp}}G_{T_{invp}})}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Podobně můžeme definovat výstup vícerozměrového robustního  $H_\infty$  regulátoru  $\mathbf{R}_\infty(s)$ . Vstupem regulátoru je trojice regulačních odchylek  $e_{sI}$ ,  $e_{sII}$ ,  $e_{vp}$  a výstupem je trojice akčních zásahů  $u_{sI}$ ,  $u_{sII}$ ,  $u_{vp}$ . Tyto akční zásahy ( $u_{sI}$ ,  $u_{sII}$ ,  $u_{vp}$ ) jsou **žádané hodnoty vnitřních smyček**. Výstup z MIMO regulátoru  $\mathbf{R}_\infty(s)$  je roven

$$\begin{bmatrix} u_{sI} \\ u_{sII} \\ u_{vp} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} R_{u_{sI}/e_{sI}}(s) & R_{u_{sI}/e_{sII}}(s) & R_{u_{sI}/e_{vp}}(s) \\ R_{u_{sII}/e_{sI}}(s) & R_{u_{sII}/e_{sII}}(s) & R_{u_{sII}/e_{vp}}(s) \\ R_{u_{vp}/e_{sI}}(s) & R_{u_{vp}/e_{sII}}(s) & R_{u_{vp}/e_{vp}}(s) \end{bmatrix}}_{\mathbf{R}_\infty(s)} \begin{bmatrix} e_{sI} \\ e_{sII} \\ e_{vp} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Podmíněnost systému je dána číslem podmíněnosti, které je definováno jako

$$\gamma(\mathbf{G}) = \frac{\bar{\sigma}(\mathbf{G})}{\underline{\sigma}(\mathbf{G})}. \quad (5.17)$$



Obr. 5-15: Bloková struktura MIMO systému a centralizovaného  $H_\infty$  regulátoru

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} G_{T_{sl}/u_{sl}}(s) & 0 & 0 \\ G_{T_{sII}/u_{sl}}(s) & G_{T_{sII}/u_{sII}}(s) & 0 \\ G_{T_{out}/u_{sl}}(s) & G_{T_{out}/u_{sII}}(s) & G_{T_{out}/u_{vp}}(s) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_\infty(s) = \begin{bmatrix} R_{u_{sl}/e_{sl}}(s) & R_{u_{sl}/e_{sII}}(s) & R_{u_{sl}/e_{vp}}(s) \\ R_{u_{sII}/e_{sl}}(s) & R_{u_{sII}/e_{sII}}(s) & R_{u_{sII}/e_{vp}}(s) \\ R_{u_{vp}/e_{sl}}(s) & R_{u_{vp}/e_{sII}}(s) & R_{u_{vp}/e_{vp}}(s) \end{bmatrix}$$

---

Tedy jako podíl největšího a nejmenšího singulárního čísla. Velký rozdíl mezi oběma singulárními čísly naznačuje problémy s řízením. Systém je špatně podmíněný, je-li číslo podmíněnosti velké (větší asi než 10). Nevýhodou však je, že číslo podmíněnosti je silně závislé na škálování modelu a může dojít k naprosto odlišným závěrům ohledně podmíněnosti systému.

Lepším ukazatelem než je číslo podmíněnosti je RGA (Relative Gain Array). Pro čtvercovou nesingulární matici systému  $\mathbf{G}$  je RGA definováno jako

$$RGA(\mathbf{G}) = \Lambda(\mathbf{G}) = \mathbf{G} \circ (\mathbf{G}^{-1})^T, \quad (5.18)$$

kde symbol  $\circ$  vyjadřuje součin po prvcích (tzv. Hadamardův, Schurův součin). Uvedeme si některé důležité vlastnosti RGA

- nezávisí na škálování vstupu i výstupu
- řádkové a sloupcové součty jsou rovny 1
- součet velikostí všech prvků je blízko číslu podmíněnosti, tedy velké prvky v RGA vždy znamenají špatnou podmíněnost (pozor opačně to neplatí)
- RGA pro trojúhelníkovou matici je jednotková matice

Pro nalezení optimálního  $H_\infty$  regulátoru minimalizací smíšené citlivosti řešíme minimalizační úlohu (4.12) respektive (4.13). Chybí nám opět určit jednotlivé váhové matice  $\mathbf{W}_p, \mathbf{W}_u, \mathbf{W}_m$ . Váhové matice jsou voleny diagonální.

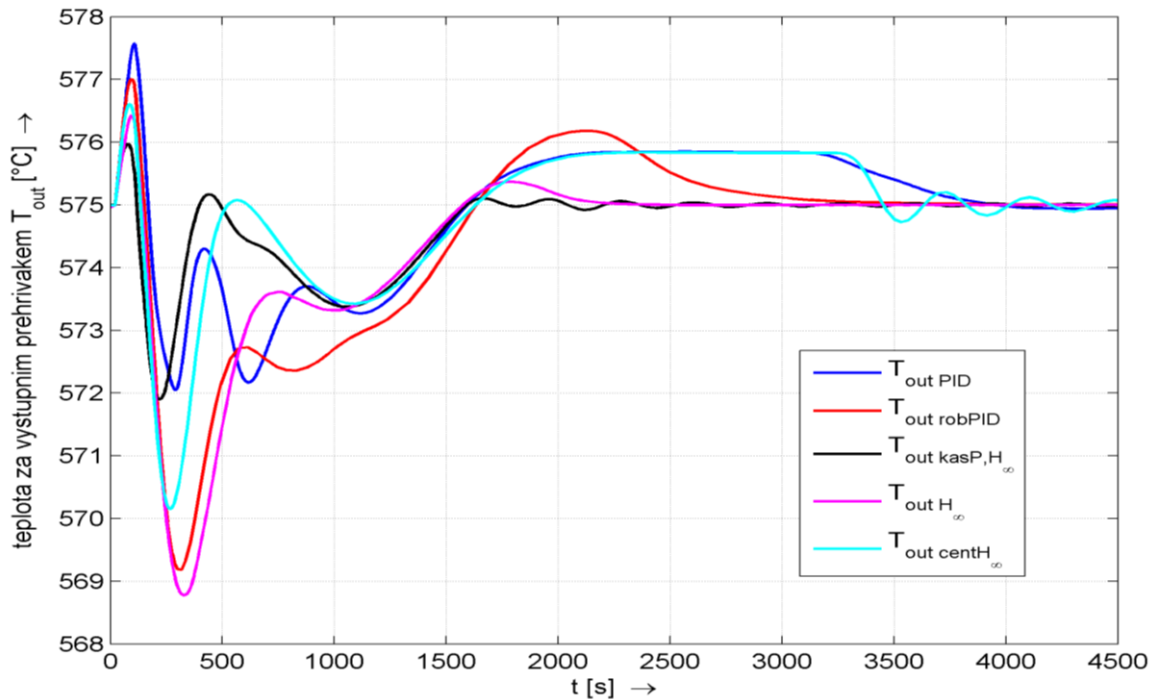
Výsledná přenosová matice vícerozměrového robustního  $H_\infty$  regulátoru  $\mathbf{R}_\infty(s)$  má jednotlivé přenosy matice vysokého řádu, proto byla provedena redukce řádu regulátoru minimalizující Hankelovu normu.

Simulační experimenty, ověřující nastavení řídicího systému byly provedeny na stavovém nelineárním modelu vysokotlaké části výroby páry. Všechny změny byly provedeny v čase 20s a byla uvažována přestavná doba ventilu 30 sekund. Byl proveden experiment - skoková změna tepelného příkonu ze 100 % na 50 %, trend změny -50 % / 90s.

## 5.5 Porovnání výsledků s projektovanou kaskádní PID regulací

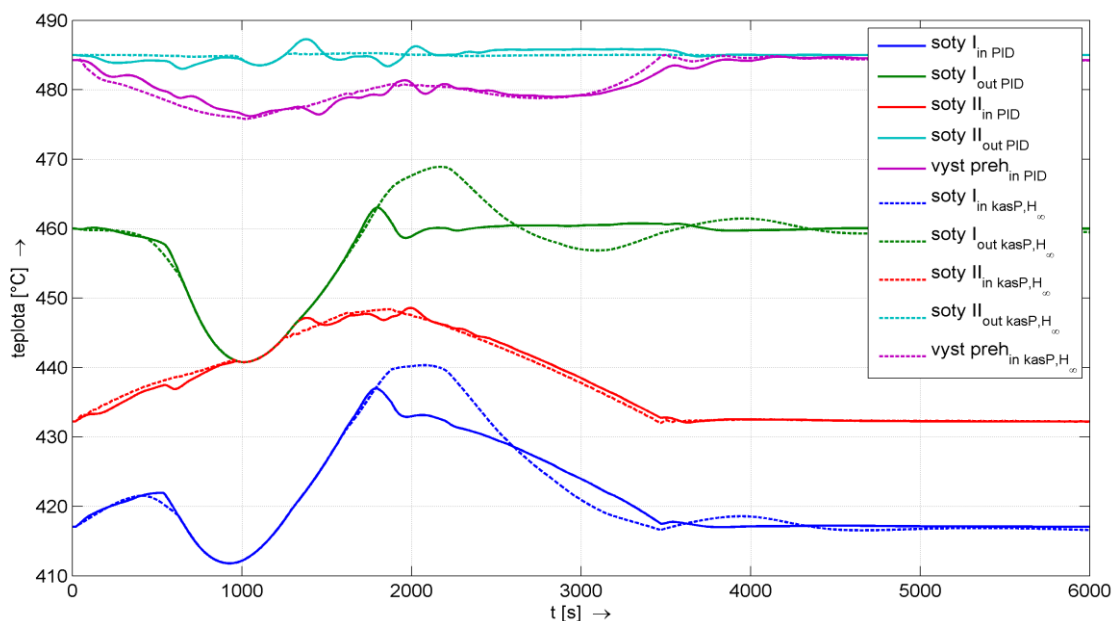
V souladu s požadavky na modelování technologických režimů z provozu, pokládáme z hlediska regulace za **nejobtížnější skokovou změnu z 100% na 50%** výkonu, která modeluje v provozu extrémní situaci – výpadek jednoho oběhového čerpadla - jedné napáječky. Regulátory navržené metodami robustní regulace a projektovaný řídicí systém bude porovnán právě na přechodu z těchto výkonových hladin. Skoková změna tepelného příkonu ze 100 % na 50 % je s trendem změny -50% výkonu za dobu 90s (-50%/90s). Simulační experimenty, porovnávající nastavení řídicího systému byly provedeny na stavovém nelineárním modelu vysokotlaké části výroby páry. Všechny změny byly provedeny v čase 20s a byla uvažována přestavná doba ventilu 30 sekund. Na Obr. 5-16 jsou zobrazeny průběhy výstupní teploty za výstupním přehřívákem pro projektovaný adaptivní řídicí systém  $T_{out\ PID}$  a všechny mnou navržené řídicí systémy.



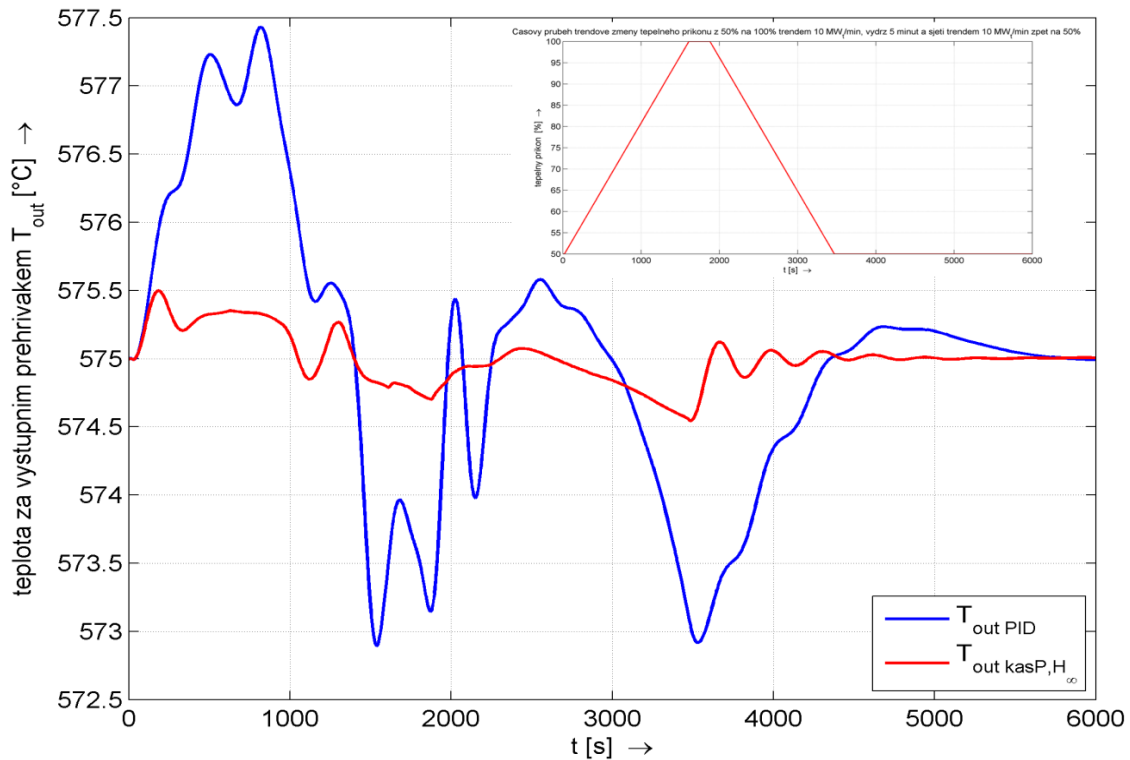


**Obr. 5-16: Porovnání výstupní teploty za výstupním prehrivákem při skokové změně výkonové hladiny 100% na 50% pro původní a všechny navržené řídicí systémy**

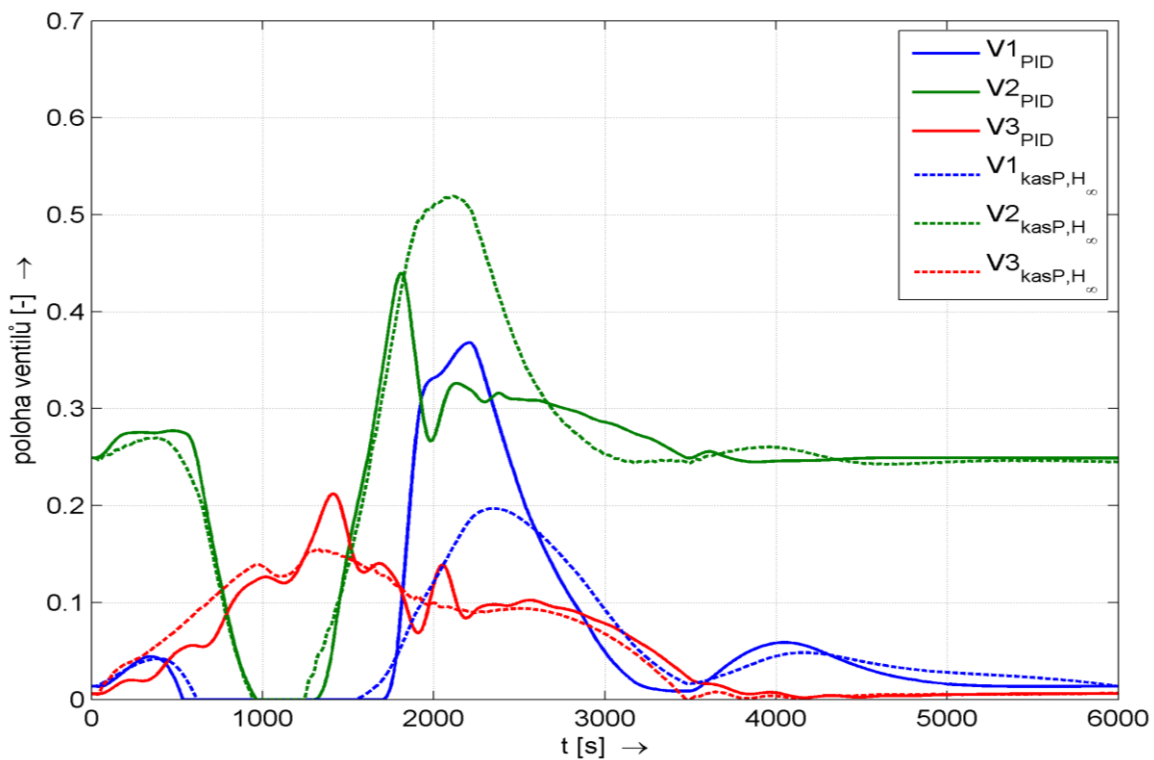
O vlastnosti robustní regulace se můžeme přesvědčit na **klasické situaci z elektrárenského provozu**. Jde o **trendovou změnu z 50% výkonu na 100% výkonu** s trendem  $10\text{MW}_t/\text{min}$  s výdrží 5 minut a sjetí s trendem  $10\text{MW}_t/\text{min}$  zpět na výkonovou hladinu 50% výkonu. Průběh regulovaných teplot  $T_{out\ PID}$  a  $T_{out\ kasP,H\infty}$  je na Obr. 5-18. Je zcela evidentní, že robustní regulátor dává výrazně lepší regulační pochody než AŘS. Podobně se domnívám, že průběh vstříků na Obr. 5-19 je s robustními regulátory výrazně klidnější. Podobné hodnocení si dovoluji i pro průběh vstupních a výstupních veličin do šotů I, šotů II a výstupního prehriváku (Obr. 5-17).



**Obr. 5-17: Porovnání vstupní a výstupní teploty jednotlivých bloků VT části při trendové změně výkonové hladiny pro původní a navržený kaskádní robustní řídicí systém**



Obr. 5-18: Porovnání výstupní teploty za výstupním přehřívákem při trendové změně výkonové hladiny pro původní a navržený kaskádní robustní řídicí systém



Obr. 5-19: Porovnání polohy jednotlivých vstřikovacích ventilů při trendové změně výkonové hladiny pro původní a navržený kaskádní robustní řídicí systém

---

## 6 Závěr

V závěru je možno konstatovat, že tato práce „Pokročilé algoritmy řízení prvků a skupin elektrárenských bloků“ byla vypracována v rámci projektu „Progresivní technologie a systémy pro energetiku“ 1M06059, dílčí cíl V302 „Pokročilé algoritmy řízení pro zvýšení efektivity provozu elektrárenského bloku“. Koncepce analýzy a syntézy systému řízení na základě znalosti nelineárního stavového modelu průtočného kotle nejen že navazuje na již získané výsledky řešení tohoto projektu, ale přímo je na sebe i váže. To vytváří na jedné straně tlak, aby model byl průběžně aktualizován a verifikován, na druhé straně však může způsobit zpoždění v části přípravy návrhu algoritmů řízení.

Samo využívání nelineárního stavového modelu průtočného kotle je již docela náročné, protože jeho obecnost umožňuje na jedné straně modelovat většinu technologických situací, na druhé straně bez znalosti struktury a fyzikálních dějů, které se modelují, nedosáhneme žádných rozumných výsledků.

Postupně se ukázalo, že snaha splnit globální cíle, které se nakonec podařilo naplnit, vedla k velkému nasazení jak simulačních výpočtů, tak aplikací teoretického základu robustní regulace na konkrétní úlohu regulace přehřáté páry. Regulační vlastnost implementované v distribuovaném systému řízení, jak již bylo řečeno, pokládám za velmi dobré. Vzhledem k přirozené odolnosti robustních algoritmů řízení vůči dynamickým změnám - neurčitosti soustavy, pokládám koncepci robustního za vhodnou k ověření experimenty v praktických aplikacích.

Zůstala otevřena celá řada otázek související s centralizovaným řízením. Domnívám se, jak jsem již uvedl, že toto je otázka dalšího výzkumu. Za daleko aktuálnější pokládám přípravu k implementaci těchto vyvinutých robustních algoritmů řízení. Týká se to otázek typu: na jakém řídicím systému je tyto algoritmy možno implementovat, jak ošetřit problematiku přepínání mezi řídicími systémy a řada dalších.

Přesto se domnívám, že v rámci této práce byla nalezena a propracována metodika návrhu robustních regulátorů zaměřena na problematiku regulace přehřáté páry včetně nutného vypracování a využívání vhodného software. Protože v rámci mých rešeršních prací na začátku mé práce a ani během řešení celé problematiky jsem se s využíváním nelineárního modelu průtočného kotle k syntéze robustních regulátorů přehřáté páry neseťkal, pokládám ji za novou a přínosnou. Vytváří podnět k další analýze možnosti robustní regulace přehřáté páry a následně pak k přípravě implementace a k praktickým experimentům.

Pokusím se shrnout nejvýznamnější přínosy této práce:

- 1) Přispívá k rozšíření teoretických poznatků v oboru zaměřeném na návrh systémů řízení přehřáté páry speciálně průtočných elektrárenských kotlů v těchto činnostech:
  - Vytvoření koncepce analýzy a syntézy systému řízení na základě znalosti nelineárního stavového modelu průtočného kotle. Tento model je třeba vždy parametrizovat podle aktuální konstrukční a výrobní dokumentace.

- 
- Metodika návrhu struktur lineárních modelů šotových přehříváků a výstupního přehříváku na zvolené výkonové hladině, které pak vstupují do syntézy
  - Metodika návrhu nestrukturované neurčitosti a určení jejich optimální struktury
  - Metodika návrhu struktur a syntézy SISO a MIMO robustní regulace teploty přehřáté páry na technologickém celku regulované vysokotlaké části průtočného kotle.
- 2) Domnívám se, že má i okamžitý přínos pro průmyslovou praxi. Spatřuji to v těchto bodech:
- V rámci projektové přípravy obnovy uhelných elektráren, dostávají projektanti významný impulz, aby nejen uvažovali o možnostech sofistikovaných metod řízení, ale vytvářeli již předpoklady pro odzkoušení nebo dokonce zavedení těchto metod do obnovované technologie.
  - Tento koncept už v rámci projekce, jsou-li známy konstrukční parametry kotle, umožňuje ověřovat regulační vlastnosti pomocí experimentálních simulačních výpočtů a s předstihem umožní výběr vhodného řízení.
- 3) Přináší nové zkušenosti a praktické poznatky, které jsou založeny na simulačních experimentech, prováděných během řešení tohoto tématu. Dovolím si je zde je formulovat v „nadsázce“ bez důkazů a týkají se robustních regulátorů ( $H_\infty$ ):
- Navržené robustní algoritmy pro regulaci přehřáté páry vykazují až „**neuvěřitelnou**“ robustnost vůči změnám systémů. (Například chyba v zadání přenosů se špatně hledala, protože regulace byla vždy stabilní a relativně dobrá)
  - **Vysoký řád.** Přírozená snaha o upřesňování modelu nevede k lehce získaným zlepšením. Naopak, čím větší řády soustavy vstupují do syntézy, o to více vzrostou řády regulátorů, což se projeví buď tak, že MatLab nevypočte robustní regulátor nebo nelze provést simulační výpočty regulace.
  - **Problém volby jmenovitého přenosu.** V řadě učebnic autoři vystačí s volbou nominálního modelu jako soustavou prvního řádu s dopravním zpožděním. Moje zkušenosti jsou odlišné. Dle mých poznatků je třeba řád modelu zvolit blízký ke skutečnému řádu soustavy, aby bylo dosaženo požadované jakosti regulace.

---

## Citovaná literatura

- [1] nazeleno. [cit. 2010-8-3] [online]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/print\\_1/lay\\_3/vyroba-elektriny-v-cr-era-uhli-konci-nahradi-jej-jadro.aspx](http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/print_1/lay_3/vyroba-elektriny-v-cr-era-uhli-konci-nahradi-jej-jadro.aspx)>
- [2] IBLER, Z. *Technický průvodce energetika: 1. díl*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 616 s. ISBN 8073000261.
- [3] HUBKA, L., Vybrané modely funkčních podsystémů parního kotle, Technická univerzita v Liberci, FM, RSS Disertační práce, 2010.
- [4] DOLEŽAL, R. *Průtočné kotle*. Praha: SNTL, 1960. 312 s.
- [5] ČERNÝ, V. *Parní kotle*. Praha: SNTL, 1975. 526 s.
- [6] VILIMEC, L. *Provoz a regulace energetických zařízení*. Ostrava: VŠB, 2007. 263 s.
- [7] HUBKA, L.; MODRLÁK, O.; TŮMA, L. *Simulační modul vysokotlakých přehříváků a jeho řízení. Etapa IV*. Liberec. 2009. 44 s.
- [8] KLEFENZ, G. *Automatic control of steam power plants*. Mannheim: Bibliographisches Institut, 1986. 286 s. ISBN 3411016990.
- [9] STREJČ, V. *O možnostech vyššího využití teorie regulace v praxi*. Praha: Práce, 1958.
- [10] SKOGESTAD, S. POSTLETHWAITE, I. *Multivariable Feedback Control Analysis and design*, 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons LTD., 2005. 574 s. ISBN 0470011688.
- [11] ZHOU, K. DOYL, J. *Essentials of Robust Control*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1998. 411 s. ISBN 0135258332.
- [12] DATTA, A.; HO, M.-T.; BHATTACHARYYA, S. *Structure and Synthesis of PID Controllers*. London: Springer, 2000. 235 s. ISBN 1852336145.
- [13] KUKLÍNKOVÁ, M., Robustní regulátory typu PID, Technická univerzita v Liberci, FM, KŘT Diplomová práce, 2006.

---

## Vlastní publikace

- MENKINA, M., HUBKA, L. The Application of H<sub>∞</sub> Controllers on the Model of Steam Superheaters. *9<sup>th</sup> International Conference of Control of Power Systems 2010*. Bratislava. ISBN 978-80-89402-20-5.
- HUBKA, L., MENKINA, M. The Control of Steam Generator's High Pressure Part via Robust PI Controllers. *9<sup>th</sup> International Conference of Control of Power Systems 2010*. Bratislava. ISBN: 978-80-89402-20-5.
- MENKINA, M., HUBKA, L. Simulation Experiments with Robust Controllers in the Cascade Control Structure, *Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference of Process Control 2010*. Brno. ISBN: 978-80-7399-951-3.
- HUBKA, L., MENKINA, M., NÁHLOVSKÝ, T. Possibilities of the control steam generator output temperature. *Proceedings of 10<sup>th</sup> International Carpathian Control Conference ICC'2009*, Zakopane. p. 467-470. ISBN: 83-89772-51-5.
- HLAVA, J., HUBKA, L., MENKINA, M., MODRLÁK, O. TŮMA, L. *Analýza parametrů a optimalizace řízení VT přehříváků páry. Etapa VI*. Liberec, 2009. 40 s.
- MENKINA, M. Řízení hladiny bubnového kotle robustním regulátorem. *8<sup>th</sup> International Conference of Control of Power Systems '08*. Bratislava. ISBN: 978-80-227-2883-6.
- MENKINA, M. Drum boiler level Control with robust PID controller. *Proceedings of 8<sup>th</sup> International Scientific-Technical Conference of Process Control 2008*. Pardubice. ISBN: 978-80-7395-077-4.
- HUBKA, L., MENKINA, M. Control Of Tubulat Heat Exchanger Node In Broad Operation Range. *8<sup>th</sup> International Conference of Control of Power Systems '08*. Bratislava. ISBN: 978-80-227-2883-6.
- MENKINA, M. Aplikace robustního regulátoru na řízení hladiny bubnového kotle. *AT&P JOURNAL plus2 2008*. 88-90p. ISSN: 1336-5010
- HUBKA, L., MENKINA, M., ŠKOLNÍK, P. Modelling of the drum-boiler in Matlab. *ECMS 2007*, s. 203-208, Liberec, ISBN 978-80-7372-202-9.
- HUBKA, L., MENKINA, M., PROSKE, D., State-space control of electric drive with DC motor. *Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference of Process Control 2007*, Bratislava, ISBN 978-80-227-2677-1.
- HUBKA, L., MENKINA, M., The implementation of a state space controller on the DC motor. *ECMS 2007*, s. 209-214, Liberec, ISBN 978-80-7372-202-9.
- MENKINA, M., MODRLAK, O. Rotation speed robust control of DC motor. *Proceedings of 8<sup>th</sup> International Scientific-Technical Conference of Process Control 2006*. Pardubice. ISBN: 80-7194-860-8.



# **POKROČILÉ ALGORITMY ŘÍZENÍ PRVKŮ A SKUPIN ELEKTRÁRENSKÝCH BLOKŮ**

*Autoreferát disertační práce*

Ing. Michal Menkina

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Rozsah: 38

Náklad: 12

Červen 2011