

MODELY DYNAMIKY PŘIHŘÍVÁNÍ PÁRY V PRŮTOČNÉM KOTLI



Lukáš Hubka, Osvald Modrlák
Technická univerzita v Liberci
Ústav řízení systémů a spolehlivosti



Abstrakt: V tomto příspěvku je prezentována alternativní metoda popisu dynamických vlastností přehřáté páry v jednotlivých částech kotle a simulována dynamika kompletního technologického celku přehřívání páry od výstupu z vysokotlaké části turbíny po opětovný vstup do střednětlaké části. Jsou uvažovány tři základní technologické uzly: protiproudý/souproudý teplotní výměník, mezipřehřívák a vstřík. Systém je doplněn dynamickým modelem směšování a je též zahrnuta dynamika všech ventilů. Model je primárně vytvořen pro použití při ověření stávajících a vývoj nových algoritmů řízení elektrárenských bloků. Základní idea je popsat systém na svých okrajích pomocí rovnic globálních bilancí na hmotě a energii. Tato strategie vyúsťuje v nelineární stavový model. Prostorové rozložení teplot není v tomto případě vůbec významné. Základní principy tohoto přístupu k modelu jsou nejprve porovnány s výsledky z dostupné literatury.

Klíčová slova: mezipřehřívák, protiproudý výměník, modelování

1 Úvod

Modelování systémů je velmi důležitou součástí mnoha inženýrských aplikací. Tento jev je způsoben rychlým růstem a zvyšováním nároků na nově vyvíjené komponenty a celky a znalostí jejich statických a dynamických vlastností při standardních ale i velmi extrémních podmínkách. V mnoha případech tento proces probíhá ve fázi návrhu/projektování. Simulace mohou sehrát klíčovou roli při řešení otázek týkajících se použitelnosti, účinnosti či výskytu hazardů daného zařízení ještě před jeho fyzickou konstrukcí. Velmi významná je i role modelu při návrhu a verifikaci řídicích algoritmů.

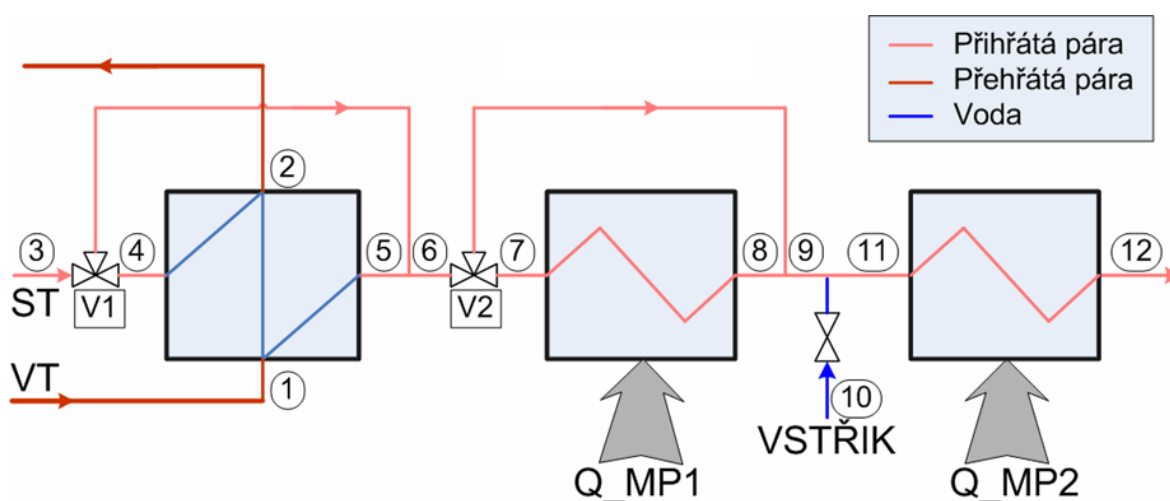
My se soustředíme na modelování dynamiky technologických komponent elektráren [4], [5], [6]. Aktuálnost a vývoj v této oblasti je úzce spojen s globálním trendem vývoje energetických a elektrárenských zařízení. Především v oblasti elektrické energie se situace stává kritickou, neboť i Česká republika se v krátkém časovém horizontu dostane z oblasti exportu do oblasti importu elektrické energie [7], [8]. Je tedy nezbytné, při zachování stávajících podílů zdrojů elektrické energie, nalézt nové možnosti ve využití fosilních paliv. V tomto příspěvku je prezentováno několik matematických modelů technologických částí elektrárny. Z hlediska zlepšení účinnosti se předpokládá, že nejvýznamnější progres bude v souvislosti s nasazením protiproudého výměníku na začátek okruhu přehřevu páry. Hlavním principem tohoto zařízení je předání energie z vysokotlaké přehřáté páry do střednětlaké přehřáté páry v maximálním možném množství, ovšem pouze při vhodném režimu provozu a zajištění minimálních vstříků. Teplotní ztráty tohoto zařízení, které nepřijímá žádnou vnější

energií ze spaliny, musejí být minimalizovány dokonalou izolací. Dále je diskutován standardní tepelný výměník spaliny – pára a též je nastíněna problematika vstříků jakožto jednoho z významných regulačních orgánů.

Pro vytvoření simulačních modelů je použita alternativní metoda řešení problému přenosu tepla mezi dvěma médii (spaliny/pára, pára/pára) založená na globálním pohledu na takovýto problém a definici okrajových podmínek. Jako standardní metodu řešení lze považovat přístup založený na šíření tepla ve směru proudění [9]. Tato metoda je výborná pro studium například tepelného namáhání komponent bez použití metody konečných prvků (FEM). V případě, že využití modelu je cíleno na řízení, je tento postup zbytečně podrobný a výpočetně náročný stejně jako samotná FEM, kde nadto je velmi obtížné až nemožné rozumně implementovat řídicí algoritmy a provádět jejich vývoj. Pro naše potřeby strategie vývoje modelu pro řízení je dostačující informace o výstupech na základě známých zadaných vstupů. Naše alternativní metoda a úvaha vychází z globálních bilancí. Tyto bilance jsou vyčíslovány na průtocích (zákon zachování hmoty) a na energiích (zákon zachování energie, termodynamické věty). Pro dosažení co nejreálnějších výsledků a zároveň nastolení jistého komfortu při tvorbě simulačních schémat i samotných rovnic, jsou implementovány vlastnosti přehřáté/přehřáté páry za standardních tabulek [2] do simulačního prostředí Matlab, v němž jsou všechny modely tvořeny.

2 Analýza problému

Celý technologický celek přehřívání sestává z několika oddělitelných subsystémů



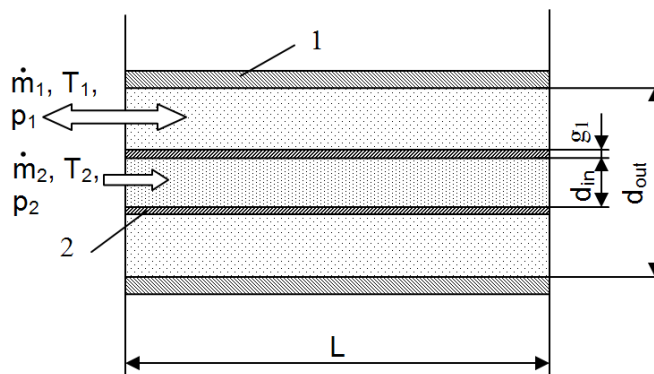
Obr. 1: Zjednodušené blokové schéma přehřívání páry

(Obr. 1). První částí je protiproudý výměník (biflux), druhou mezipřehříváky a poslední vstřík chladicí vody. Dále je zde několik samostatných funkčních celků jako je směšování páry za ochozy a třicestné regulační ventily na vstupu před bifluxem a vstupním mezipřehřívákem. Při tvorbě rovnic a dynamických modelů jsou na všechny tyto části aplikovány stejné principy globálních energetických bilancí. Tento princip je nejprve ověřen na výsledcích již publikovaného modelu, který se opírá o model s rozloženými parametry a uvažuje šíření tepla ve směru proudění.

2.1 Souproudý/protiproudý výměník – biflux

2.1.1 Šíření tepla ve směru proudění

V případě tohoto popisu je nezbytné při úvahách vzájemně oddělit souproudý a protiproudý výměník. Toto oddělení je v důsledku sice pouze symbolické nicméně nezbytné. Pro představu lze uvažovat zjednodušený popis bifluxu jako na Obr. 2.



Obr. 2: Zjednodušené schéma bifluxu

Rovnice, které popisují tento systém, lze napsat takto:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \pm \frac{\dot{m}_1}{S_1 \rho_1} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} + \frac{\alpha_1 \pi (d_{in} + 2 \cdot g_1)}{S_1 \rho_1 c_1} \cdot (T_{Fe} - T_1) \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial T_{Fe}}{\partial t} = \frac{\alpha_1 (d_{in} + 2 \cdot g_1)}{d_{Fe} g_1 \rho_{Fe} c_{Fe}} \cdot (T_1 - T_{Fe}) + \frac{\alpha_2 d_{in}}{d_{Fe} g_1 \rho_{Fe} c_{Fe}} \cdot (T_2 - T_{Fe}) \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = - \frac{\dot{m}_2}{S_2 \rho_2} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial z} + \frac{\alpha_2 \pi d_{in}}{S_2 \rho_2 c_2} \cdot (T_{Fe} - T_2) \quad (1.3)$$

kde: S_1 – vyhřívací plocha, S_2 – vyhřívaná plocha, \dot{m} – průtok, T – teplota, α – koeficient přestupu tepla, c – specifické teplo, ρ – hustota.

Tyto rovnice jsou založeny na předpokladu kruhové průřezu obou trubek. Znaménko „+“ v rovnici (1.1) vyjadřuje protiproudý, „-“ pak popisuje souproudý výměník. Dalšími předpoklady jsou zanedbatelné teplotní ztráty do okolí a konstantní vstupní tlak obou médií, stejně tak i konstantní výstupní tlak nebo konstantní definovaný tlakový spád.

2.1.2 Metoda globálních bilancí

Volba aplikované metody tvorby matematických modelů pro řízení a regulaci energetických bloků a uzlů pomocí globálních bilancí, využívá skutečnosti, že při řízení energetických bloků a uzlů se nevyužívá informací, které jsou dány prostorovým rozložením veličin uvnitř jednotlivých oddělených subsystému. Využívají se pouze informace o veličinách na vstupu a výstupu (výpočet výstupů z daného celku na základě známých vstupů) a není rozhodující vnitřní prostorové rozložení jednotlivých veličin. Samotná idea globálních bilancí je pak inspirována článkem popisující dynamiku bubnového kotle [1], kterou jsem již zpracovali a publikovali [3].

Dynamiku média protékajícího trubkou lze popsat globálními bilancemi. Lze uvažovat tři základní bilance. První je na hmotách, druhá na energiích a poslední na hybnostech. Bilance hybností je celkem specificky svázána s problematikou změny tlaku při průchodu daným technologickým celkem. Pro první náhled, vzhledem ke složitosti této bilance a velkému vlivu ztrát třením, jsou uvažovány pouze případy, kdy je tlak na vstupu i výstupu

stejný nebo je předem definovaný tlakový spád (ten lze získat měřením či výpočty). Tento předpoklad byl po konzultacích s odborníky z praxe shledán jako bezkonfliktní a umožní nám provést alespoň částečné zjednodušení celého problému. Implementace této hmotnostní bilance je nastíněna v samostatné kapitole.

Celý proces tvorby matematického a poté i simulačního modelu vyúsťuje v nelineární stavový popis (model). Pro úspěšnou simulaci je nezbytné vypočítat, v našem případě na základě implementace tabulek, některé významné parametry páry na základě známých teplot a tlaků tohoto média na obou koncích. Při globálním náhledu též není nutné oddělovat vzájemný směr proudění obou médií, neboť rovnice již neobsahují derivace podle směru. Základní rovnice jsou poté v tomto tvaru:

- Hmotnostní bilance média

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (1.4)$$

- Energetická bilance média

$$\frac{d(\rho V u)}{dt} = \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{out} h_{out} + \dot{Q} \quad (1.5)$$

kde: h – entalpie, u – vnitřní energie, \dot{Q} - dodaný tepelný výkon.

Dalším krokem je přidání relace mezi vnějším a vnitřním médiem. Toto je realizováno prostřednictvím společné kovové teplosměnné plochy s dvěma plochami. Zde se řeší teplotní dynamika kovové bariéry a upraví se energetická bilance média (1.5) na základě známého dodaného výkonu.

- Teplotní dynamika bariéry

$$m_{Fe} c \frac{dT_{Fe}}{dt} = \alpha_{out} S_{out} (T - T_{Fe}) - \alpha_{in} S_{in} (T_{Fe} - T) \quad (1.6)$$

- Upravená energetická bilance média

$$\frac{d(\rho V u)}{dt} = \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{out} h_{out} + \alpha S (T_{Fe} - T) \quad (1.7)$$

kde: index out – vnější část, in – vnitřní část bariéry.

Pro kompletní rozřešení bifluxu se sestaví soustava 6 takových rovnic. To jsou energetické bilance obou médií, hmotnostní bilance obou médií a dynamiky obou trubek (vnitřní a vnější). Všechny rovnice jsou v diferenciálním tvaru, což mimo jiné umožní jejich snadnou implementaci při tvorbě modelu. Pro jednoduchost se předpokládá, že uvažovaný objem páry je celý vnitřní objem celé trubky. Dalším krokem při řešení je implementace tabulek parametrů páry při daném tlaku a teplotě. Pro úspěšné řešení je nezbytné z těchto buď předem známých nebo v modelu počítaných parametrů určit další, na těchto přímo závislé, parametry jako je hustota či vnitřní energie. Tento předpoklad, či idea, použití tabulek je velmi užitečný i při samotné úpravě rovnic ((1.4), (1.7)), neboť všechny parametry páry jsou nyní fixovány pouze na tlak a teplotu.

Toto zároveň otevírá problém volby stavových proměnných v tomto, v případě bifluxu, rozsáhlého systému. Bylo zjištěno, že volba vhodných stavových proměnných je klíčovým faktorem při následné simulaci, protože ne všechny varianty a kombinace stavových proměnných, které lze získat, jsou použitelné. Speciálně jako zcela nevhodné se jeví použití průtoku jako jednu ze stavových veličin, i když matematická úprava soustavy rovnic vede

přímo k tomuto cíli. Jako nejvhodnější jsme našli, v případě již vyslovených předpokladů na tlak, volbu teploty všech látek (obě páry a kovové trubky).

Dále jsme při simulacích narazili na problém s volbou počátečních podmínek a některých důležitých konstant. Nejproblematictější je volba počáteční teploty kovových částí, která ani následně nebude měřená. Zde jsme použili předpoklad stejné teploty média a kovové části na začátku simulace, přičemž výsledný stav (teplota kovů, teplota páry) je možné uvažovat jako rovnovážný při daných podmínkách a tedy i jako počáteční pro další simulace. Dalším velkým problémem je koeficient přestupu tepla. Zde je naše strategie založená na předpokladu budoucí existence reálných dat, kdy bude provedena kalibrace celého modelu a přizpůsobení-adaptace důležitých parametru modelů. Pro možnost simulací již nyní, ve fázi neexistence reálných měření, jsme zvolili koeficient přestupu tepla na základě obvyklých hodnot tohoto koeficientu pro dané médium a rychlost proudění. Jeho velikost nemá podstatnější vliv na dynamiku teploty páry v bifluxu, spíše pak na jeho statické vlastnosti.

2.1.3 Implementace tlakových ztrát

Jak již bylo uvedeno, byl pro všechny simulace uvažován mírně idealizovaný případ stejného tlaku na vstupu i výstupu z trubky, případně o něco přesnější předpoklad, že je již předem znám nejen vstupní ale i výstupní tlak bifluxu. Tento předpoklad je ve velké většině případů použitelný. Pro kompletní znalost dynamických vlastností a kompletaci modelu jako takového je ovšem užitečné přidat i rovnici, která umožní zjistit buď staticky velikost tlaku na výstupu nebo ještě lépe dynamický průběh tlaku při přechodových jevech. Tento problém teoreticky popisuje hybnostní rovnováha:

$$\frac{d(\rho V v)}{dt} = \dot{m}_{in} v_{in} - \dot{m}_{out} v_{out} + S_{in} p_{in} - S_{out} p_{out} - F_w + S p_h \quad (1.8)$$

kde: v – rychlost, F_w – vliv tření, p_h – hydrostatický tlak závisící na rozdílných výškách vstupu a výstupu.

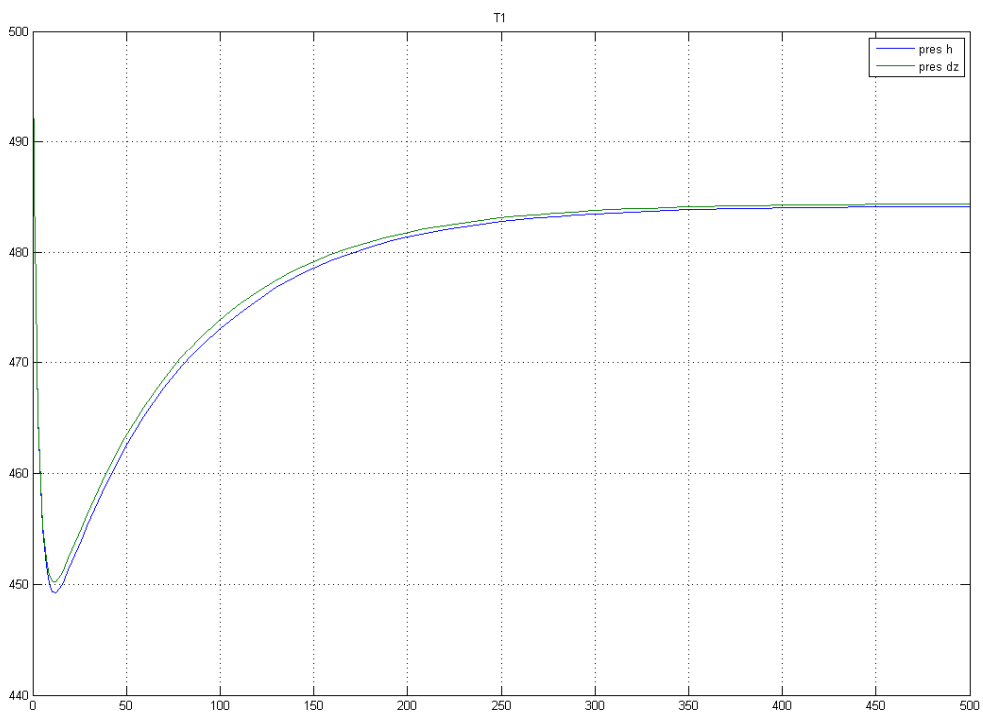
Tato rovnice však s sebou, v případě dynamického řešení, nese více negativ než pozitiv. První negativní stránka je vliv tření, který je čistě věcí tvaru potrubí a materiálu na něj použitého, případně se může měnit vlivem zanášení atd. Druhým problémem je pak samotná implementace této rovnice do již výše popsané soustavy 6 stavových rovnic. Problém tkví především v náročném rozhodování o volbě vhodných stavových proměnných a následně v náročnosti samotného simulačního výpočtu, nehledě na fakt, že vliv této rovnice na celý model je většinou velmi malý a lze jej případně nahradit čistě algebraickou rovnicí. Na druhou stranu množství neznámých koeficientů otevírá možnost začít uvažovat o nasazení principů robustního řízení, kde proměnlivost (přesněji ne zcela přesně známá hodnota) některých parametrů přímo implikuje způsob popisu pomocí neurčitostí.

2.1.4 Dynamické vlastnosti, ověření

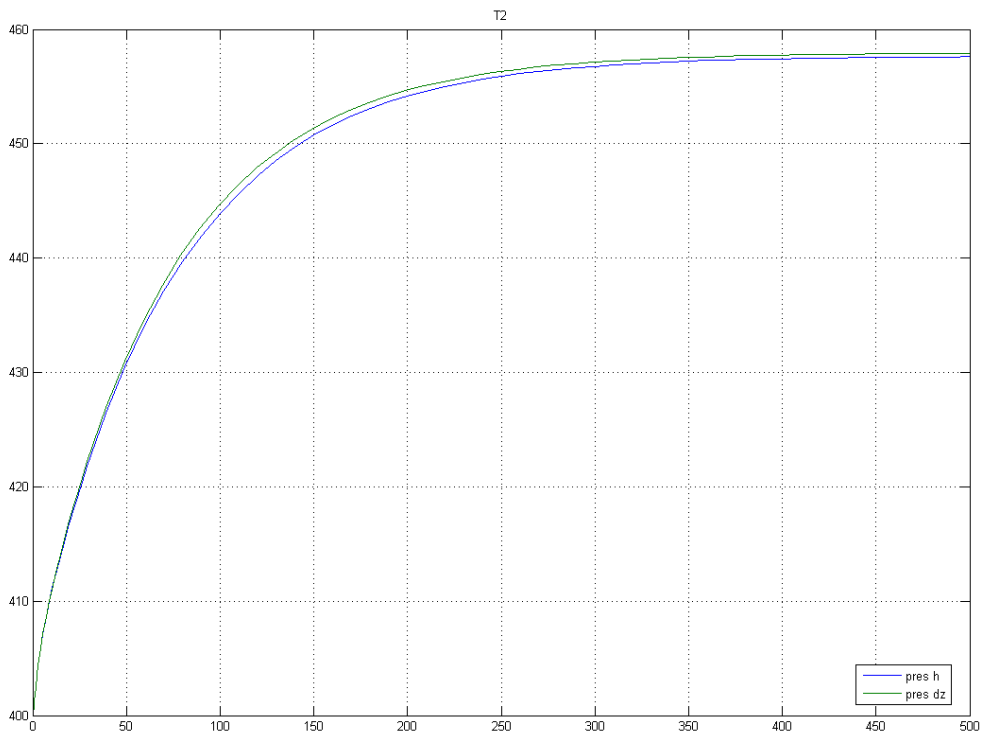
Celý námi sestavený model byl nejprve, vzhledem k tomu, že nemáme dostupná žádná data z reálných nasazení a měření, ověřen na základě porovnání výsledků s jiným v literatuře popsaným přístupem, který je doplněn měřením na reálném zařízení. Pro tento ověřovací experiment byly uvažovány tyto hypotetické parametry a vlastnosti bifluxu:

$$L = 32 \text{ m}, d_{in} = 0,0236 \text{ m}, d_{out} = 0,3 \text{ m}, g_1 = 0,0032 \text{ m}, \dot{m}_1 = 1 \text{ kg/s}, \dot{m}_2 = 0,3 \text{ kg/s}, \alpha_1 = \alpha_2 = 800 \text{ W/m}^2\text{K}, T_{1in} = 500^\circ\text{C}, T_{2in} = 400^\circ\text{C}, p_1 = 130 \text{ b}, p_2 = 35 \text{ b}, m_1 = 400 \text{ kg}, m_2 = 90 \text{ kg}.$$

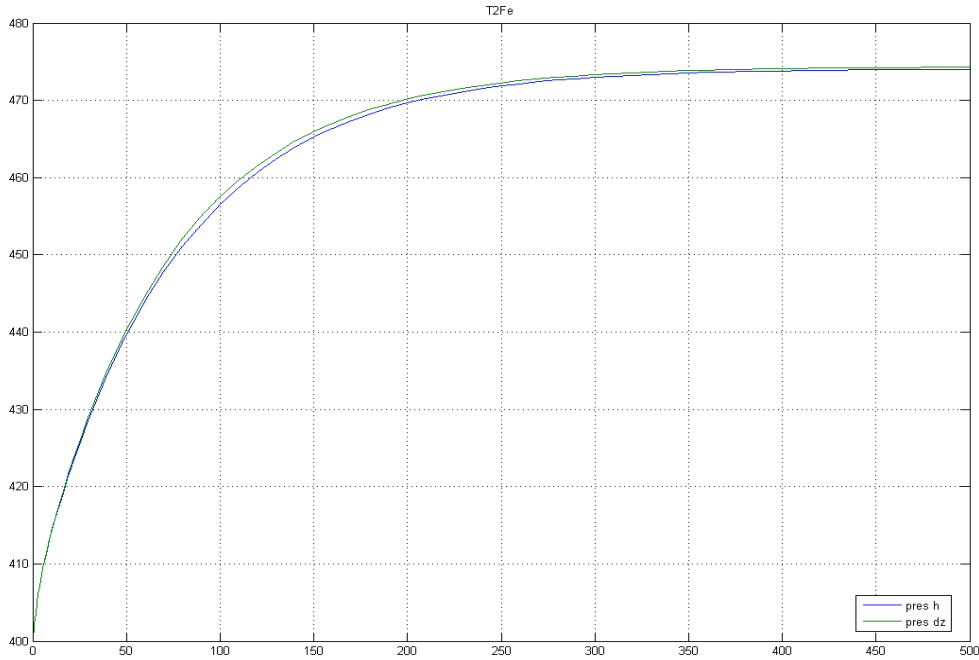
Byl uvažován nulový přestup tepla do vnější trubky a počáteční teplota bariéry rovna teplotě střednětlaké páry. Konstrukčně je předpokládáno, že vysokotlaká pára proudí vnějškem, střednětlaká vnitřní trubkou. Simulován byl děj vyrovnání nerovnovážného stavu. Následující grafy ze simulací poukazují na správnost našeho modelu.



Obr. 3: Teplota VT pára na výstupu z bifluxu - modelový případ



Obr. 4: Teplota ST na výstupu z bifluxu – modelový případ



Obr. 5: Teplota kovové bariéry - modelový případ

2.2 Mezipřihřívák

Dalším významným technologickým uzlem celé soustavy přihřívání páry jsou mezipřihříváky. V našem případě je fyzicky předpokládána instalace dvou, vstupního a výstupního, přičemž u vstupního je možno řízení teploty realizovat obtokem přes ohoz.

Po provedených verifikacích na bifluxu je možné konstatovat, že přístup přes globální bilance je správný a použitelný. Proto i v tomto případě jsme jej využili. Z hlediska tvorby samotných rovnic je v tomto případě mezipřihřívák postaven na stejném principu jako vnitřní část bifluxu, takže i rovnice je možné použít stejné ((1.4), (1.7), (1.6)), jen s malými změnami a úpravami. Při podrobnějším rozboru lze hmotnostní bilanci přepsat ve tvaru:

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}(t) = V \frac{\partial \rho(T_{out})}{\partial T_{out}} \frac{dT_{out}}{dt}, \quad (1.9)$$

kde je právě využit předpoklad konstantního tlaku na vstupu i výstupu případně pouze malé tlakové ztráty. To dovolí uvažovat hustotu při jejím derivování závislou pouze na dynamice teploty a upravit vztah tak, aby zde byla právě jedna stavová proměnná a to teplota. Parciální derivace hustoty podle teploty je na základě známého tlaku a vypočítávané teploty dohledána v každém výpočetním kroku z tabulky vlastností páry. Rovnice popisující energetickou bilanci páry lze zapsat ve tvaru:

$$\dot{Q}_{Fe} + \dot{Q}_s^{in} - \dot{Q}_s^{out}(t) = \frac{d}{dt}(\rho(t) \cdot u(t) \cdot V) \quad (1.10)$$

A následně pak upravit na tvar:

$$\begin{aligned} \alpha_1 S_{in} (T_{Fe}(t) - T_{out}(t)) + \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{out}(t) h_{out}(t) = \\ = V \frac{dT_{out}}{dt} \left(\rho_{out}(t) \frac{\partial h(T_{out})}{\partial T_{out}} + h_{out}(t) \frac{\partial \rho(T_{out})}{\partial T_{out}} \right) \end{aligned} \quad (1.11)$$

kde se opět úspěšně mohou využít tabulky páry při úpravách pravé strany. Ve všech těchto rovnicích je na pravé straně průměr z hodnot na vstupu a výstupu (např. hustota v (1.10)). V případě derivace podle času však lze předpokládat, že derivace tohoto průměru je rovna pouze změně výstupních parametrů:

$$\text{pokud } \bar{\rho} = \frac{\rho_{in} + \rho_{out}}{2}, \text{ pak } \frac{d\bar{\rho}}{dt} = \frac{d\rho_{out}}{dt}.$$

2.3 Vstřík

Proces vstřikování vody je nedílnou součástí základní sady regulačních smyček všech elektrárenských bloků. Obecně lze říci, že dynamika tohoto procesu je velmi rychlá a velký vliv mají především dynamiky čidel, dynamika servoventilu a dynamika samotné směšovací jímky. Přesto je pro kompletaci hlavních částí modelu užitečné pokusit se sestavit i model této části. Celkem standardním postupem je v tomto případě identifikovat dynamiku vstříků na základě reálných měření. My jsme se pokusili sestavit matematický model. Uvažovali jsme dvě základní možnosti, na jakých principech model postavit – slupkové bilance a využití globálních energetických a hmotnostních rovnováh.

2.3.1 Slupkový model

Naše úvahy nad slupkovým model byly založeny na rozložení děje do tří fází – ohřev vodní kapky, změna fáze na povrchu kapky a ohřev vzniklé páry. Toto vychází z předpokladu, že vstřík je realizován vstřikovacím ventilem, který páru dostatečně rozptýlí a vodu, která z trysky stříká, lze uvažovat jako množinu kulových kapek o známém objemu (na základě vlastností trysky a známém průtoku). Při změnách fáze za zvýšeného tlaku dojde nejprve k dosažení dané saturační teploty, která je spjata s tlakem. Toho lze velmi dobře využít pro rozhodnutí o okamžiku změny fáze kapky, přesněji začátku děje změny fáze a odpařování. Odpařování je uvažováno pouze z povrchu. Výsledkem všech těchto úvah je, že celý proces vstříku lze ze simulačního a matematického hlediska nahradit změnou skupenství jedné kapky vody o definovaném objemu a známém povrchu. Tím je dané, že je známá přesná hodnota plochy, na kterou působí teplo. Rovnice popisující tento děj mohou mít tvar:

$$\alpha S \Delta T = \alpha \cdot 4\pi r^2 \cdot \Delta T = \dot{Q} \quad (1.12)$$

$$\dot{Q} = \frac{d}{dt}(mc\Delta T) = \frac{d}{dt}(\rho V \cdot c \cdot \Delta T) = \rho c \Delta T \frac{dV}{dt} = \rho c \Delta T \frac{d}{dt}\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right) = \frac{4}{3}\pi \rho c \Delta T \frac{d}{dt}r^3 \quad (1.13)$$

Tyto rovnice popisují první fázi celého procesu. V této lze předpokládat konstantní hustotu, protože médium je neustále voda a teplotní rozdíl je také konstantní, protože je zde uvažován rozdíl mezi teplotou vody a saturační teplotou (konstantní a přesně definovaná pro daný tlak). Pokračovat dál tímto směrem však není možné, protože tento postup je použitelný pouze v případě dvou rozdílných médií, v tomto případě voda a pára. V dalších fázích už nelze použít žádné styčné plochy (kapka, či její část, se proměnila na páru) a je možné pouze počítat změnu objemů. Největší problém však je implementace času. Statické řešení problému je celkem jednoduché, protože celkové množství energie, která je nutná k vypaření vodní kapky lze spočítat na základě specifické tepelné kapacity vody, skupenského tepla vypařování a tepelné kapacity páry.

2.3.2 Globální bilance

Díky výše zmíněným problémům s časem (dynamika jevu) jsme se pokusili implementovat myšlenku globálních energetických a hmotnostních bilancí i na tento případ. Nejvýznamnějším předpokladem je specifikace objemu páry (úsek trubky), v němž se bude děj simulovat. Tady lze vycházet ze standardních principů z praxe a uvažovat objem trubky omezený z jedné strany vstřikovací tryskou a z druhé strany teplotním čidlem, které je v takové vzdálenosti, aby voda byla už s párou promísená. Základní rovnice pak mají tvar:

- Hmotnostní bilance vstřiku

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_s + \rho_w V_w - \rho_{out} V_{out}) = \dot{m}_s + \dot{m}_w - \dot{m}_{out} \quad (1.14)$$

- Energetická bilance vstřiku

$$\frac{d}{dt}(\rho_s u_s V_s + \rho_w u_w V_w - \rho_{out} u_{out} V_{out}) = \dot{m}_s h_s + \dot{m}_w h_w - \dot{m}_{out} h_{out} \quad (1.15)$$

- Algebraická rovnice celkových objemů

$$V_s + V_w = V_{out} \quad (1.16)$$

kde indexy: s – pára, w – voda, out – výsledná směs.

Rovnici (1.16) lze zkonstruovat díky základním vlastnostem plynů – rozpínavosti a úvaze, že pára zabere celý uvažovaný prostor trubky. Opět je zde nutný předpoklad na tlak a to nejlépe v podobě měřené, či předem známého výsledného tlaku a dále je zde učiněn pro zjednodušení předpoklad na průtocích (zjednodušení (1.14)):

$$\dot{m}_s + \dot{m}_w - \dot{m}_{out} = 0 \quad (1.17)$$

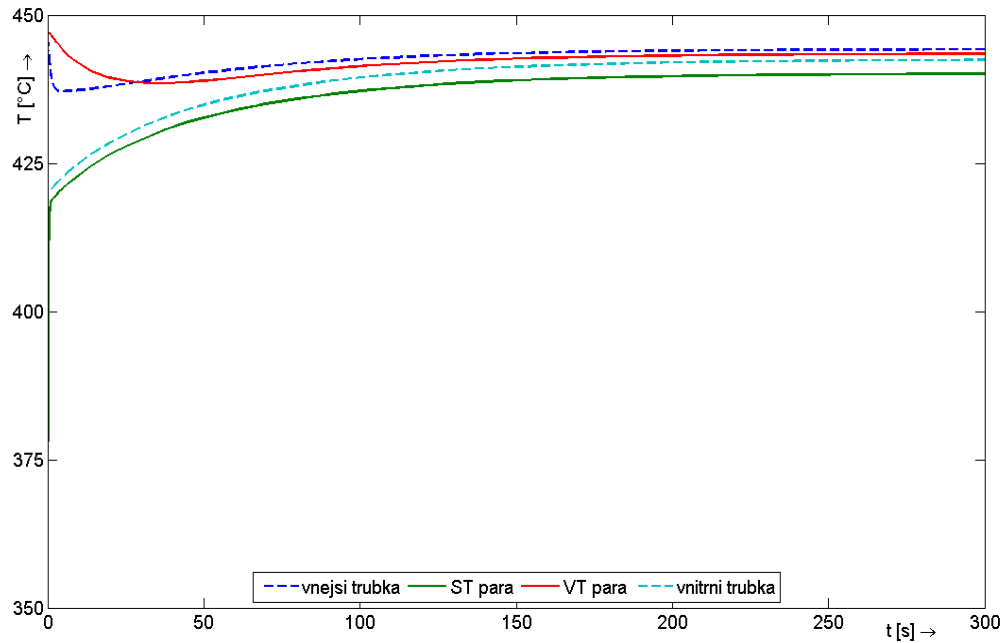
V tomto případě je uvažováno, že okolní prostředí, tedy kovová trubka, nemá na dynamiku rozhodující vliv. Stejný princip lze použít i při výpočtech slučování páry a páry při obtoku mezipřihříváku či bifluxu ochozem. V těchto případech se pro jednoduchost uvažují pouze statické tvary rovnic (1.14) a (1.15). Případná dynamika je dána směšovací komorou a lze ji nahradit dopravním zpožděním.

3 Simulační výsledky

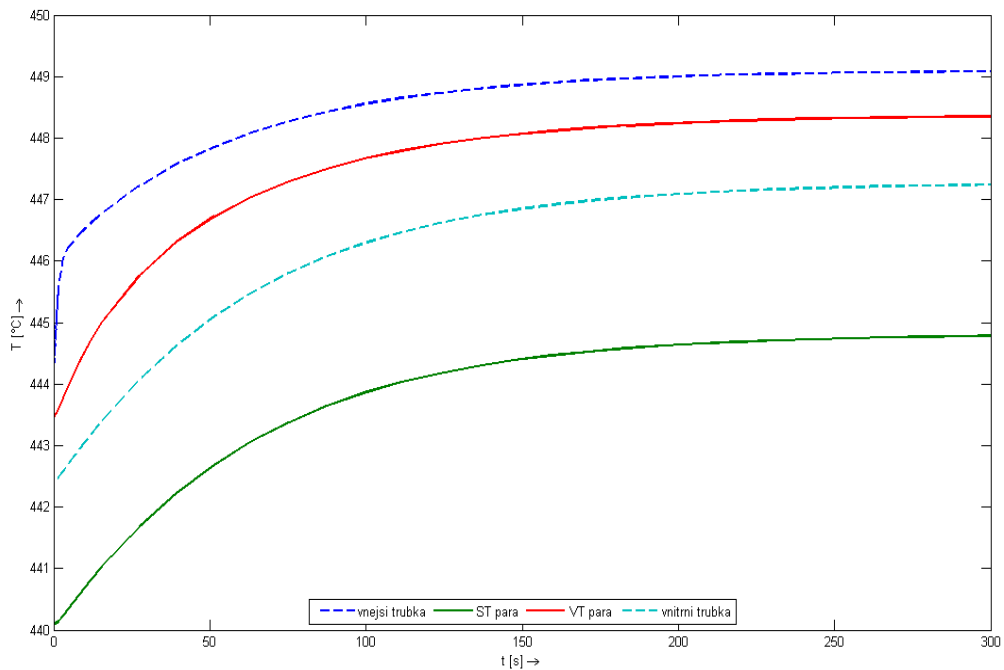
Všechny simulační experimenty byly provedeny na základě reálných vstupních parametrů páry (teplota, tlak, průtok) do jednotlivých technologických uzlů a na základě jejich plánovaných rozměrů a hmotností. Jsou prezentovány jak dynamické odezvy při simulaci jednotlivých uzlů, tak při simulaci celého zařízení.

3.1 Simulace jednotlivých komponent

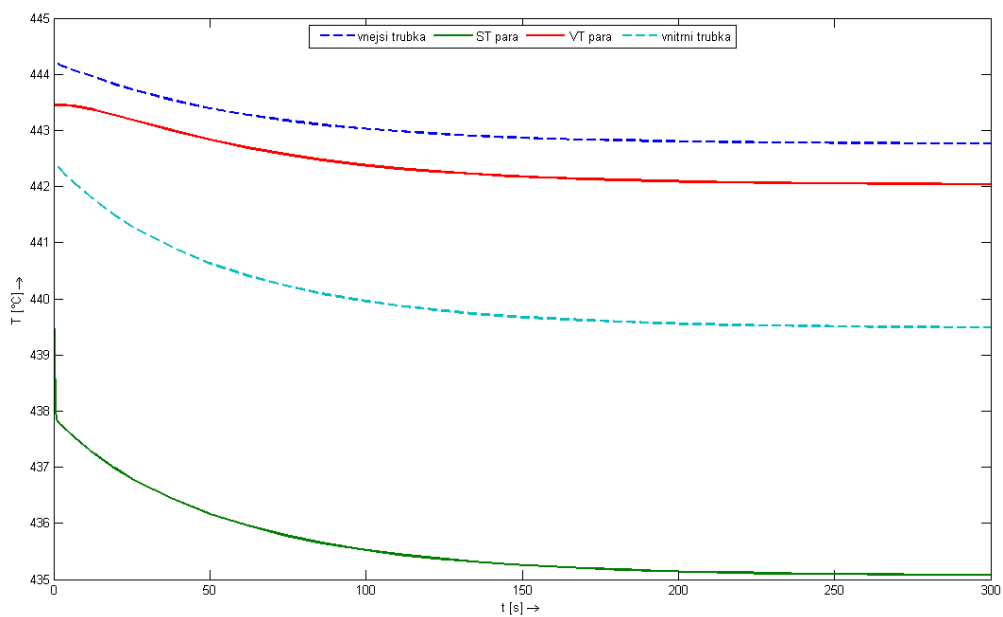
3.1.1 Biflux



Obr. 6: Biflux - uvedení do rovnováhy - skok na průtoku ST páry

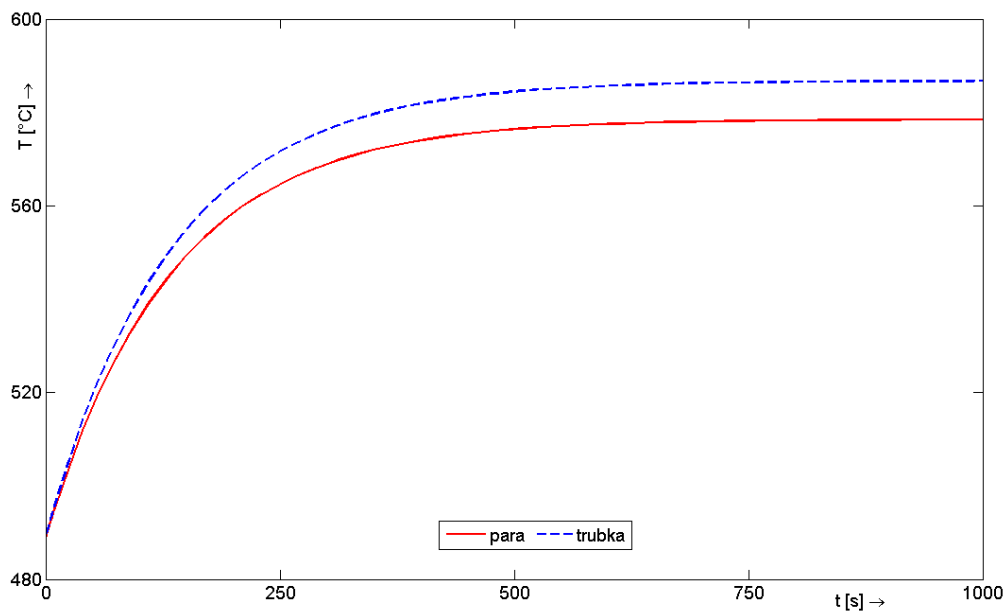


Obr. 7: Biflux - zvýšení teploty VT o 5°C

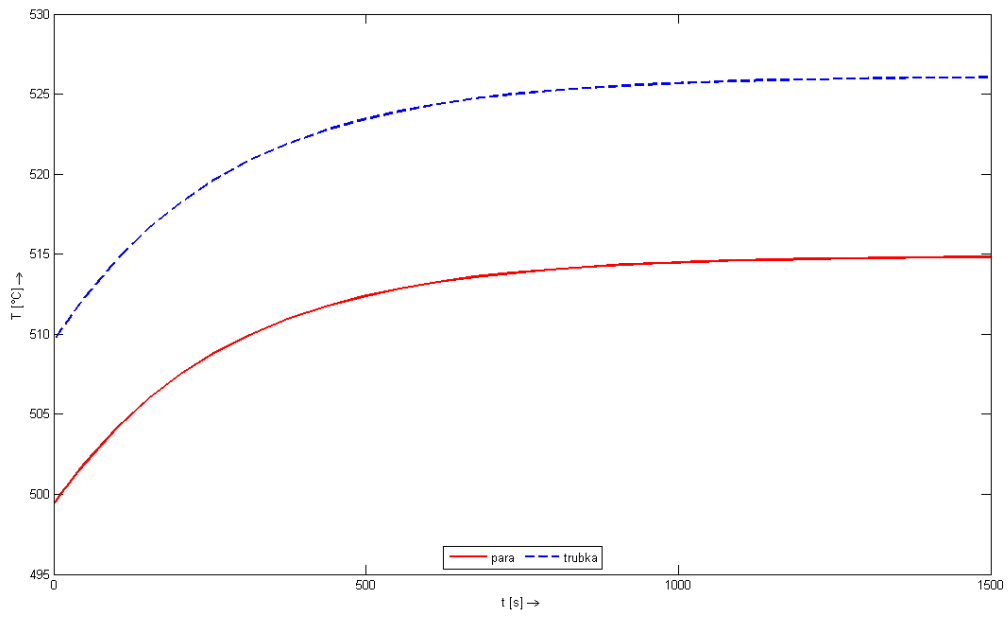


Obr. 8: Biflux - skoková změna (2x více) na průtoku ST páry

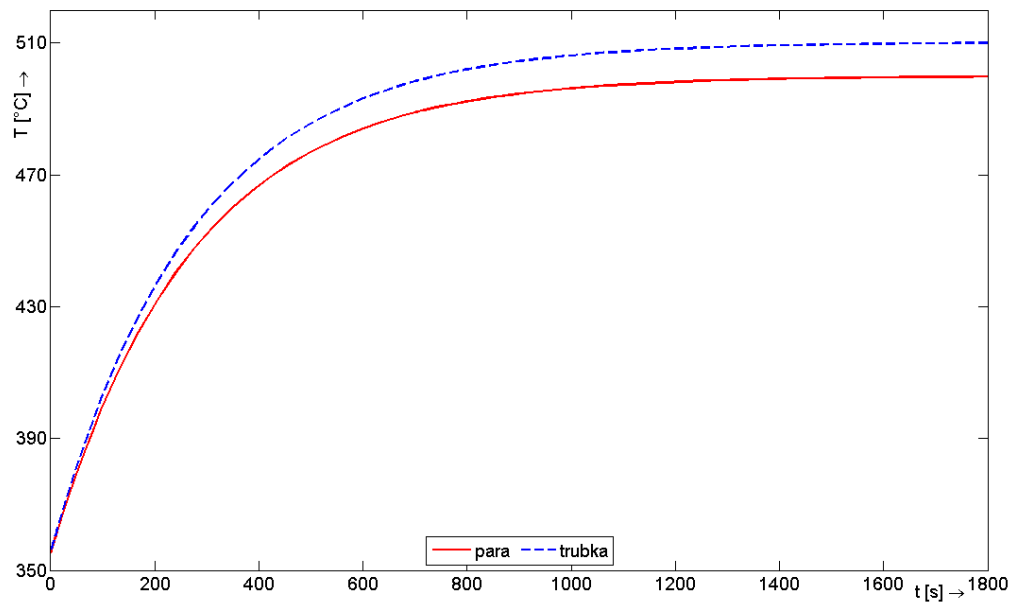
3.1.2 Mezipřihřívák



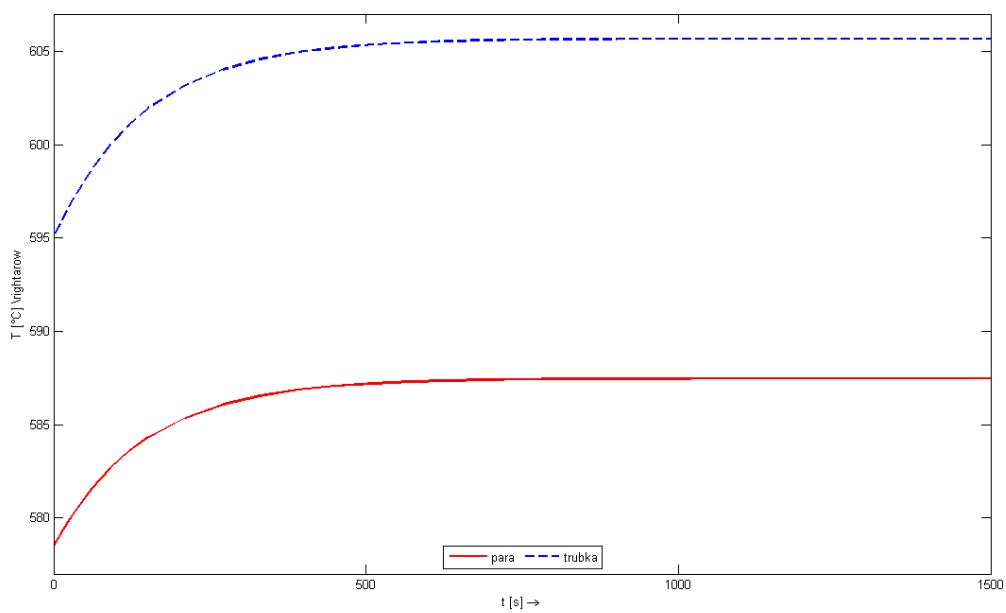
Obr. 9: MP1 - rovnovážný stav pro 100% příkon (skok na příkonu)



Obr. 10: MP1 - skok +10% na příkonu

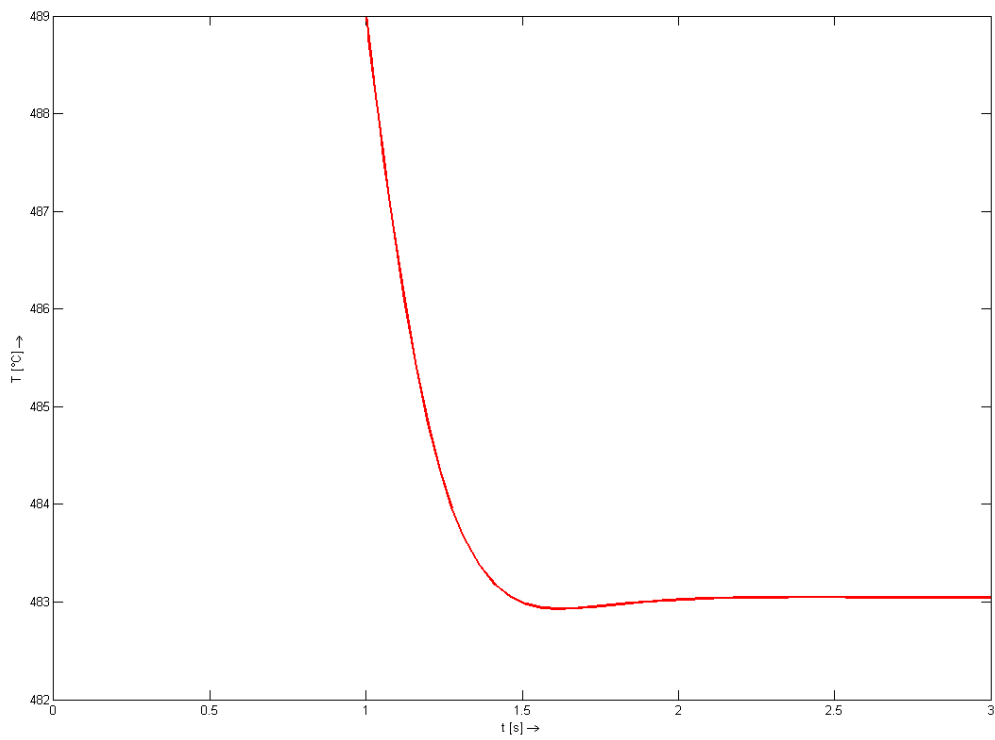


Obr. 11: MP2 - rovnovážný stav pro 100% příkon (skok na příkonu)

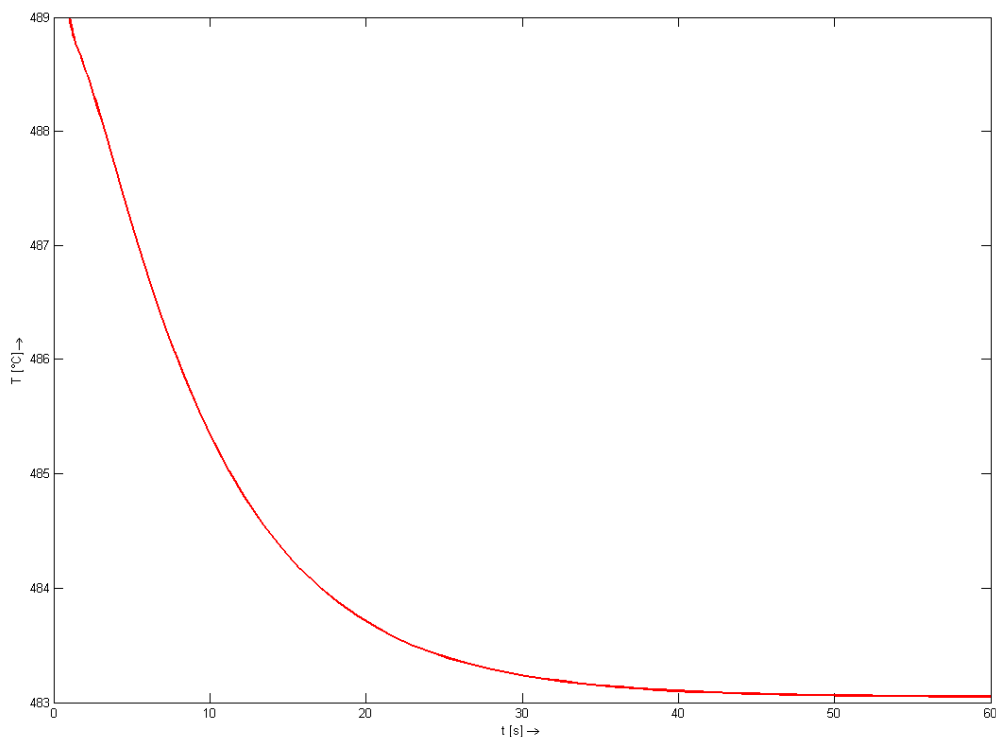


Obr. 12: MP2 - skok +10% na příkonu

3.1.3 Vstřik



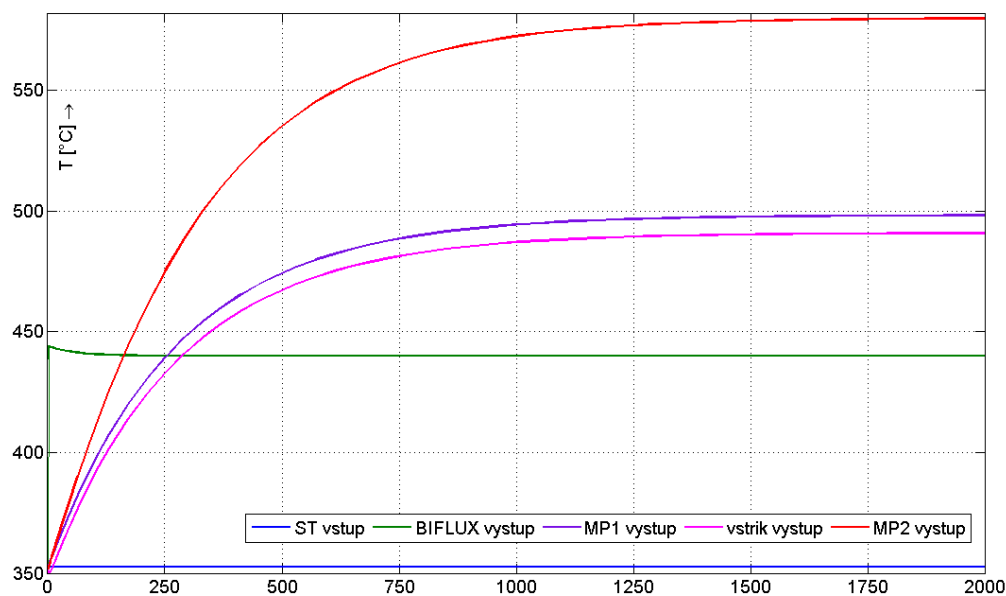
Obr. 13: Dynamika vstřiku bez zpoždění na ventilu a ve směšovací komoře



Obr. 14: Dynamika vstřiku při zahrnutí dynamiky ventilu a směšovací jímky

3.2 Simulace technologického celku přihrívání páry

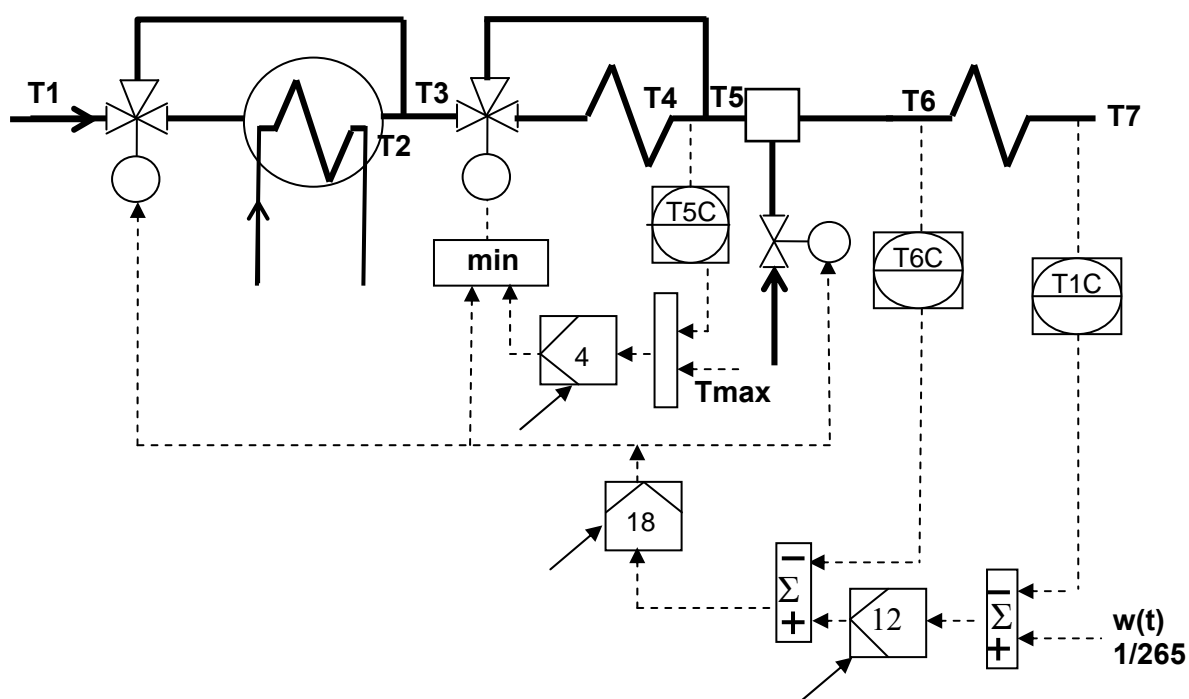
Tato simulace byla provedena za předpokladu stejných počátečních teplot ve všech uzlech i na všech trubkách. Tato simulace je pouze modelovým příkladem sloužícím pro zjištění a následné porovnání základních dynamických vlastností jednotlivých technologických uzlů. Výsledkem jsou počáteční podmínky pro simulační model na dané výkonové hladině (BMCR režim).



Obr. 15: Simulace celku - dynamika jednotlivých částí při cestě do rovnováhy (100% příkonu)

4 Základní analýza řídicího obvodu

Principem stávajícího regulačního obvodu celého celku přehřívání páry je kaskádní regulace. Smyčka obsahuje část, která zajišťuje náběh a odstavení (není zobrazena) a dále pak navazuje generátor akční veličiny a rozdělení akční veličiny na jednotlivé akční orgány bifluxu, obtoku MP1 a vstříku. Všechny realizované regulátory jsou typu PI(D) s omezením na integraci, s horními a dolními limity výstupu a proměnnými parametry. Parametry regulátorů (jak proporcionální zesílení, tak integrační popř. derivační časová konstanta) se v čase mění v závislosti na momentálním provozním stavu bloku – jsou dynamicky vypočítávány. Rozdělení vlivu akční veličiny, která je v základu normovaná do rozsahu 0 – 1, je provedeno s ohledem na rychlosti a vlivy jednotlivých subsystémů. Celý tento regulační obvod byl z projektové dokumentace převeden do simulačního prostředí pro možnost ověření vlivu jednotlivých veličin na regulační pochod. Dále bude použit pro simulaci provozu elektrárny (vybraná část přehřev) na různých výkonových hladinách.



Obr. 16: Zjednodušené blokové schéma přehřívání páry

5 Závěr

Byly sestaveny rovnice popisující všechny klíčové části okruhu přehřívání páry a zároveň zkompletovány veškerá simulační schémata. Nadto byla provedena úvodní analýza kompletace řídicího obvodu dle dokumentace. Na základě provedených prací (tvorba rovnic, simulace) lze konstatovat, že je možné modely popisovaných technologických celků považovat za použitelné pro další vývoj jak na stávajícím, tak případně i na inovovaném či dokonce principiálně odlišném způsobu řízení.

Literatura

- [1] Astöm, K., J., Bell, R., D. (2000): Drum-boiler dynamics. *Automatica* 36, 2000, s. 363-378, ISSN 0005-1098.
- [2] Colonna P., van der Stelt T. (2008): FluidProp v. 2.31: A program for the estimation of thermophysical properties of fluids, software, 2008. Available from: www.fluidprop.com.
- [3] Hubka, L., Menkina, M., Školník, P. (2007): Modelling of the drum-boiler in Matlab. ECMS 2007, Books of Abstracts + CD-ROM, Liberec, ISBN 978-80-7372-202-9.
- [4] Hubka, L., Modrlák, O. (2008): Model of dynamics of tubular heat exchanger. Proceedings of 9th ICCO 2008, s.239-242, Sinaia, ISBN 978973-746-897-0.
- [5] Hubka, L., Menkina, M. (2008): Control of tubular heat exchanger node in broad operation range. Control of Power Systems 2008 – Abstracts + CD-ROM, Štrbské Pleso, ISBN 978-80-227-2883-6.
- [6] Hubka, L., Modrlák, O. (2008): The problem of modeling the process water to steam injection. Control of Power Systems 2008 – Abstracts + CD-ROM, Štrbské Pleso, ISBN 978-80-227-2883-6.
- [7] Kovačovská, L. (2008): Zásadné otázky rozvoje a provozu elektroenergetiky ČR. Control of Power Systems 2008 – Abstracts + CD-ROM, Štrbské Pleso, ISBN 978-80-227-2883-6.
- [8] Jahnátek, L., Janíček, F., Smitková, M., Kubica, J. (2008): Trendy vývoja energetiky vo svete a na Slovensku. Control of Power Systems 2008 – Abstracts + CD-ROM, Štrbské Pleso, ISBN 978-80-227-2883-6.
- [9] Zima, W. (2006): Numerical modeling of dynamics of steam superheaters. *Energy* 26, pp. 1175-1184. Elsevier.