

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta strojního inženýrství  
Ústav automatizace a informatiky

**Ing. Michal Touš**

**VÝPOČTOVÝ SYSTÉM PRO VÝBĚR OPTIMÁLNÍHO ZPŮSOBU  
VYUŽITÍ ENERGIE GENEROVANÉ SPALOVACÍMI PROCESY**

COMPUTATIONAL SYSTEM FOR SELECTION OF OPTIMAL UTILIZATION  
OF ENERGY FROM COMBUSTION PROCESSES

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

Oponenti: prof. Ing. Jiří Klemeš, CSc.  
doc. RNDr. Tomáš Vaňek, CSc.

Datum obhajoby: 1. 6. 2012

## **Klíčová slova**

Energetické využití, odpad, biomasa, modelování, simulace, optimalizace.

## **Keywords**

Waste to energy, biomass energy utilization, modelling, simulation, optimization

## **Místo uložení dizertační práce**

Ústav procesního a ekologického inženýrství, FSI, VUT v Brně

© Michal Touš, 2012

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*

# OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V ŘEŠENÉ OBLASTI .....	5
2.1 Modelování energetických zdrojů.....	5
2.2 Simulace energetických zdrojů .....	7
2.3 Optimalizace energetických systémů .....	7
3 CÍLE PRÁCE .....	8
4 HLAVNÍ VÝSLEDKY A PŘÍNOS PRÁCE .....	10
4.1 TECHNICKO-EKONOMICKÝ SIMULAČNÍ MODEL ZAŘÍZENÍ NA ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADŮ .....	10
4.1.1 Popis zařízení na energetické využití odpadů .....	10
4.1.2 Identifikace stěžejních technologických bloků a jejich modelování.....	11
4.1.3 Sestavení simulačního modelu a jeho ověření .....	12
4.1.4 Technicko-ekonomický model a jeho využití.....	13
4.2 OPTIMALIZACE PALIVOVÉ ZÁKLADNY TEPLÁRENSKÉHO PROVOZU VYUŽÍVAJÍCÍHO UHLÍ A BIOMASOVÁ PALIVA .....	15
4.2.1 Popis modelové teplárny.....	15
4.2.2 Technicko-ekonomický model .....	16
4.2.3 Formulace optimalizační úlohy .....	19
4.2.4 Využití modelu.....	20
5 ZÁVĚR.....	21
LITERATURA .....	23
ŽIVOTOPIS.....	25
PŘEHLED VLASTNÍ LITERATURY .....	27
ABSTRACT .....	29



# 1 ÚVOD

V celosvětovém měřítku jsou dominantními zdroji energie fosilní paliva – uhlí, ropa, zemní plyn. Je však pouze otázkou času, kdy dojde k vyčerpání jejich zásob. Proto se hledají udržitelné způsoby výroby energie a stále více se diskutuje na téma využití obnovitelných zdrojů energie (OZE) a druhotných zdrojů energie (DZE).

Vysoce perspektivním OZE je biomasa. Její využití pro energetické účely, je jedním ze způsobů náhrady fosilních paliv. V případě velkých energetických zdrojů jde obvykle o částečnou, nikoliv úplnou, náhradu fosilních paliv, tzv. spoluspalování. Spoluspalování biomasy a fosilních paliv, nejčastěji uhlí, představuje časově nenáročný a levný způsob jak zvýšit podíl obnovitelných zdrojů energie [1], [2]. Při spoluspalování se totiž využívá stávajícího zařízení, na kterém stačí provést minimální úpravy jako zbudování dopravní cesty, apod.

Přímé spoluspalování představuje nejlevnější a nejpoužívanější způsob, kdy je biomasa přidávána do kotle spalujícího uhlí. Většina běžně používaných typů kotlů (granulační, fluidní, roštové) je pro tyto účely vhodná.

Do energetického mixu ČR začínají promlouvat také odpady, které jsou jedním z DZE. Zařízení pro energetické využití odpadů se, v důsledku zavádění nových pravidel v nakládání s odpady, jeví jako nedílná součást odpadového hospodářství. U komunálního odpadu tvoří 50 až 65 % hmotnosti biologicky rozložitelné složky (biologicky rozložitelný komunální odpad – BRKO) [3], které se považují rovněž za obnovitelný zdroj. Jedná se o jakýkoli odpad, který podléhá aerobnímu nebo anaerobnímu rozkladu [4].

Dizertační práce reaguje na tyto aktuální trendy a přináší progresivní nástroje k jejich rozvoji. Využívá přitom simulačních a optimalizačních výpočtů, které mohou výrazně napomoci efektivním řešením v předmětné oblasti. Základem k těmto výpočtům je matematický popis systému, tedy jeho matematický model. Stručně jsou popsány metody a přístupy matematického modelování, simulace a optimalizace používané v předmětné oblasti. Dále je navržena metodika postupu vytváření simulačních a optimalizačních modelů, která je detailněji rozebrána a prezentována na dvou případových studiích.

## 2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V ŘEŠENÉ OBLASTI

### 2.1 MODELOVÁNÍ ENERGETICKÝCH ZDROJŮ

V práci [5] je popsán model jako reprezentant nějakého konkrétního systému nebo objektu. Zůstávají zachovány pouze důležité vlastnosti originálu, které jsou vhodně popsány. Pro účely počítačové simulace a optimalizace jsou důležité především matematické modely.

Ze zkušeností autora vyplývá, že k modelování energetických systémů lze přistoupit dvěma způsoby:

- modelování na základě bilancí a jednoduchých termodynamických modelů
- modelování na základě provozních dat.

Bilance představují jednu z nejdůležitějších aktivit při návrhu procesu. Modely vycházejí především z energetických a hmotnostních bilancí. Bilanční uzly, které se používají v předmětné oblasti předkládané práce, lze rozdělit do dvou skupin (výčty nejsou úplné) [6]:

- Základní operace
  - směšování plynu
  - spalování tuhého paliva
  - ohřev resp. chlazení
- Jednoduché termodynamické modely energetických zařízení a tepelných strojů
  - parní kotel
  - parní turbína

Technologické uzly jsou vzájemně propojeny technologickými proudy, čímž vzniká model celého systému. V systémech využití energie spalin lze identifikovat následující hlavní technologické proudy:

- voda resp. pára (chladicí voda, napájecí voda, sytá kapalina, mokrá a přehřátá pára)
- plynná směs (vzduch, spaliny, plynná paliva, odpadní plyny z výroby)
- tuhá látka (pevný odpad, struska, popel, biomasa, sorbenty).

V literatuře lze nalézt některé pokročilé modely energetických zařízení, které lépe popisují jejich účinnost. Modelem parního kotle se zabývají práce [7] a [8]. Různé modely parních turbín jsou prezentovány v pracích [9],[10],[11] a [12].

Při tvorbě modelu na základě provozních dat je důležitou fází jejich důkladná analýza. Podle potřeby je použito jednorozměrných nebo vícerozměrných statistických metod.

Model je tak kvalitní, jak kvalitní jsou data, na kterých je postaven. Ověření správnosti dat, tj. ověření zda odpovídají přírodním zákonům, provozní zkušenosti, apod., je tedy velice důležité. Pokud data vykazují v tomto směru chyby, je možné použít metodu vyrovnání dat, jejímž cílem je úprava naměřených dat tak, aby se co nejvíce blížila správným hodnotám. Při použití těchto metod lze také detekovat hrubé chyby v měření.

K posuzování dat se často používají diagnostické grafy, s jejichž pomocí lze získat základní informace o povaze dat. Na jejich základě pak rozhodujeme o dalším postupu, použití metod, atd.

Při modelování na základě provozních dat se často využívá regresní analýza. Regresní analýza je soubor technik matematické statistiky, jejichž účelem je zjistit, jak kvantitativní závislá veličina (závislá proměnná) závisí na jedné nebo více kvantitativních nezávislých veličinách (nezávislé proměnné).

Sestavení modelu pak probíhá stejným způsobem jako u bilančního modelování s tím rozdílem, že uzly nejsou popsány rovnicemi hmotnostních a energetických bilancí, ale funkcemi, které jsou výsledkem regresní analýzy.

Modelování na základě provozních dat je možné jen v případě již existujících provozů. Pokud jsou data z provozu nedostupná, nebo jde-li o modelování neexistujícího energetického zdroje, použije se přístup založený na termodynamických modelech. Většinou platí, že modely, vycházející z provozních dat, jsou přesnější než obecné modely. A proto, pokud je to možné, je jejich použití vhodnější. Oba dva přístupy lze samozřejmě kombinovat; např. při modelování existujícího energetického zdroje (provozní data k dispozici), ve kterém je instalováno nové zařízení (žádná provozní data).

## 2.2 SIMULACE ENERGETICKÝCH ZDROJŮ

Pro simulaci procesů se využívá hlavně těchto dvou přístupů [13]:

- sekvenčně modulární
- rovnicově-orientovaný

Sekvenčně modulární simulace je jednodušší z obou metod pro řešení simulačních úloh. Je intuitivní a jednodušeji implementovatelná do softwarových aplikací. Jejím základním principem je sestavení rovnic, popisujících transformaci vstupů na výstupy pro každý uzel, a jejich vyřešení. Výpočet probíhá postupně na každém uzlu ve stanoveném pořadí.

Nevýhodou tohoto přístupu je, že umožňuje výpočet pouze ve směru procesu, což má za následek obtížné hledání hodnot vstupních parametrů (ve smyslu směru reálného procesu) pro požadované hodnoty výstupních parametrů.

Tuto nevýhodu odstraňuje rovnicově orientovaný přístup, který neřeší každý uzel zvlášť v určeném pořadí, ale všechny uzly jsou řešeny zároveň. Modelové rovnice ve tvaru nelineárních algebraických rovnic pak tvoří soustavu, která se řeší vhodnými numerickými metodami. Implementace rovnicového přístupu do softwarových aplikací je však náročnější.

## 2.3 OPTIMALIZACE ENERGETICKÝCH SYSTÉMŮ

Další oblastí, na kterou je dizertační práce zaměřena, jsou technicko-ekonomické optimalizace energetických provozů využívajících jako palivo (nejen) biomasu a odpad. Cílem optimalizace je efektivním a rychlým způsobem najít nejlepší řešení vzhledem k nějakému kritériu z množiny tisíců až milionů přípustných řešení. Typicky jde o minimalizaci nákladů nebo maximalizaci zisku, apod.

Technicko-ekonomickou optimalizací jak návrhu energetických zdrojů, tak jejich provozu, se zabývá řada prací. V pracích [14],[15] a [16] jsou pro optimalizaci použity jednoduché lineární modely. Složitější, ale stále lineární modely jsou využity v pracích [17] a [18]. Aplikace nelineárních modelů je demonstrována v pracích [19] s [20], kde je řešen návrh a provoz kogeneračních jednotek. V práci [21] je optimalizace řešena pomocí genetických algoritmů. Srovnání několika optimalizačních řešičů použitých při maximalizaci zisků kogenerační jednotky je prezentováno v práci [22].

Na základě rešerše odborné literatury lze konstatovat, že technicko-ekonomická optimalizace v oblasti energetického využití biomasy je řešena jen zřídka. V práci [23] jsou optimalizovány dávky uhlí a alternativních paliv s různými vlastnostmi při minimálních nákladech na provoz zařízení s kapacitou 68 MWe.

Další práci na téma využití biomasy je [24]. Článek se zabývá ekonomickým vyhodnocením spalování biomasy a uhlí. Zde jde však spíše o citlivostní analýzu parametrů.

Přehled výpočtových nástrojů pro analýzu zařízení na využití obnovitelných zdrojů je uveden v práci [25].

Z oblasti energetického využití odpadů prakticky nelze nalézt žádné práce, řešící technicko-ekonomickou optimalizaci nebo simulaci. Jedním z důvodů může být problematický popis silně náhodného parametru – výhřevnosti odpadu. To představuje výzvu pro výzkum. Proto bylo snahou autora dizertační práce přispět k řešení úloh z dané oblasti, zejména vytvořením modelu zařízení na energetické využití odpadů a využitím výhřevnosti jako vstupního parametru modelu.

### **3 CÍLE PRÁCE**

Cílem této práce je návrh systematického využití metod modelování, simulace a optimalizace pro řešení praktických úloh z oblasti energetického využití odpadů a biomasy. Navržená metodika se zaměřuje na postup při vytváření matematického modelu, který je pak využit buď pro simulaci nebo pro optimalizaci na krátkodobém či dlouhodobém časovém horizontu. Metodika je aplikována na dvou reálných provozech. V prvním případě jde o vytvoření technicko-ekonomického simulačního modelu zařízení na energetické využití odpadů na základě provozních dat. Ve druhém případě jde o návrh optimálního využití více druhů paliv v teplárenském provozu. Struktura postupu řešení obou úloh je shrnuta v tab. 1 a tab. 2. Tento postup je možné využít také v dalších příbuzných oblastech, což je demonstrováno na vytvoření technicko-ekonomického modelu energetického zdroje komplexu budov (není součástí zkrácené verze doktorské práce).



	<b>Dílčí cíl</b>	<b>Způsob řešení</b>
<b>1</b>	Seznámení se s modelovaným systémem	Prostudování podkladů k modelovanému systému
<b>2</b>	Topologie procesu a identifikace stěžejních aparátů	Rozvaha nad důležitostí technologických bloků vzhledem k použití modelu, sestavení blokového schématu
<b>3</b>	Koncepce simulačního modelu systému	Návrh modelu jednotlivých bloků a analýza stupňů volnosti
<b>4</b>	Posouzení charakteru a vlastností provozních dat	Použití diagnostických grafů, základních statistik a statistických testů
<b>5</b>	Modelování stěžejních aparátů na základě provozních dat	Použití regresní analýzy
<b>6</b>	Sestavení simulačního modelu celého systému	V případě sekvenčně-modulární simulace nastavení jednotlivých kroků výpočtu. V případě rovnicově orientované simulace implementace řešitele soustavy rovnic.
<b>7</b>	Ověření modelu systému	Porovnání výsledků simulace s provozními daty a ověření pomocí hmotnostní a energetických bilancí
<b>8</b>	Vytvoření technickoekonomického modelu	Doplnění výpočtu ekonomických efektů provozu systému (náklady na palivo, zisk z prodeje tepla a elektřiny)
<p><b>HLAVNÍ CÍL:</b>  <b><i>Metodika tvorby technicko-ekonomického simulačního modelu zařízení na energetické využití odpadů</i></b></p>		

**Tab. 1** Přehled cílů v oblasti tvorby technicko-ekonomických modelů zařízení EVO

	<b>Dílčí cíl</b>	<b>Způsob řešení</b>
<b>1</b>	Seznámení se s modelovaným systémem	Prostudování podkladů k modelovanému systému
<b>2</b>	Topologie procesu a identifikace stěžejních aparátů	Rozvaha nad důležitostmi technologických bloků vzhledem k použití modelu, sestavení blokového schématu
<b>3</b>	Koncepce optimalizačního modelu	Návrh funkčních závislostí u jednotlivých aparátů a analýza stupňů volnosti
<b>4</b>	Modelování stěžejních aparátů na základě provozních dat	Použití regresní analýzy
<b>5</b>	Formulace optimalizační úlohy a prostoru přípustných řešení	Určení optimalizačního kritéria a sestavení účelové funkce, doplnění o omezující podmínky
<b>HLAVNÍ CÍL:</b> <i>Metodika tvorby technicko-ekonomického optimalizačního modelu teplárenského provozu</i>		

**Tab. 2** Metodika tvorby technicko-ekonomických optimalizačních modelů  
teplárenského provozu

## **4 Hlavní výsledky a přínos práce**

### **4.1 TECHNICKO-EKONOMICKÝ SIMULAČNÍ MODEL ZAŘÍZENÍ NA ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADŮ**

Obsahem této kapitoly je popis postupu při vytváření technicko-ekonomického simulačního modelu zařízení na energetické využití odpadů. Metodika je prezentována na případové studii reálného zařízení TERMIZO, a.s. v Liberci. Na základě vstupních parametrů model provádí výpočet všech parametrů, které významněji ovlivňují ekonomiku provozu.

#### **4.1.1 Popis zařízení na energetické využití odpadů**

Zařízení pro energetické využívání živnostenského a komunálního odpadu TERMIZO je trvale v provozu od roku 2000. Zařízení sestává z jedné technologické linky s roční zpracovatelskou kapacitou 96 000 t odpadu (12 t/h). Návrhový fond pracovní doby činí 8000 h/rok. Zařízení je umístěno v těsném sousedství Teplárny

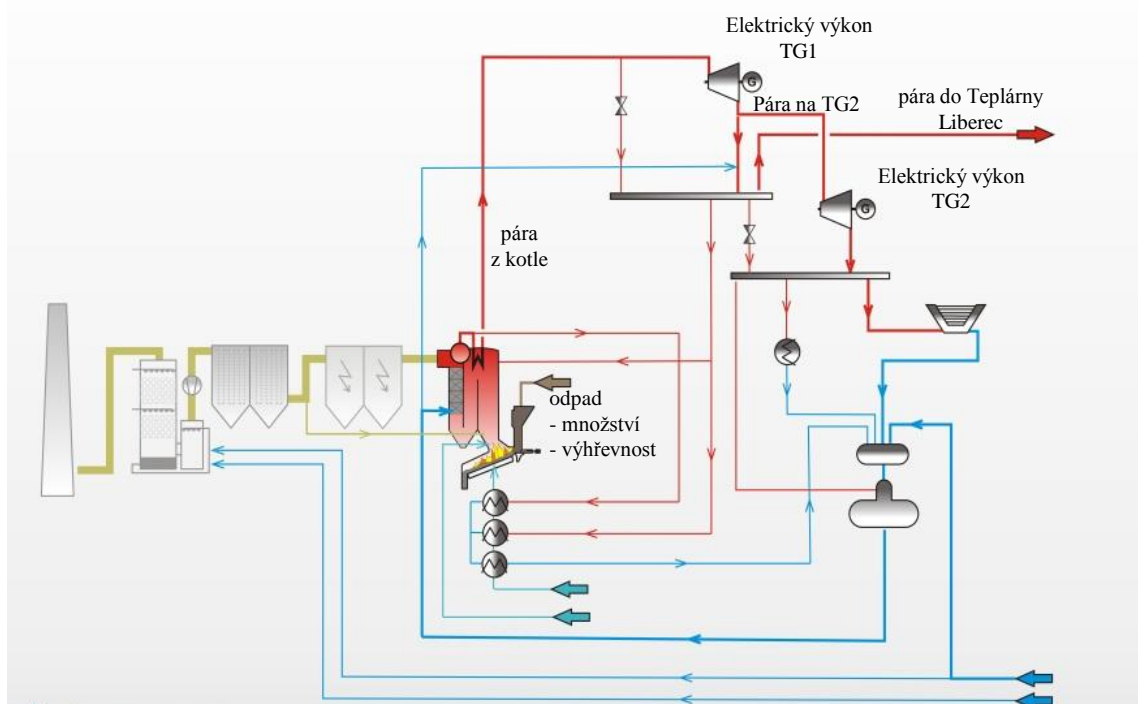
Liberec, která zajišťuje odběr vyrobené tepelné a elektrické energie. Základní výkonové parametry provozu TERMIZO uvádí tab. 3 (množství elektrické energie vyrobené na turbogenerátoru TG2 závisí na průtoku páry turbínou; ten je tím vyšší, čím nižší je export páry (tepla) do Teplárny Liberec).

Veličina	jednotka	
Maximální trvalý tepelný výkon kotle	(MW)	30,7
Jmenovité množství vyrobené páry	(t/h)	35
Výroba tepelné energie	(MW)	24,1
Výroba elektrické energie na turbogenerátoru TG1	(MW)	2,5
Výroba elektrické energie turbogenerátoru TG2	(kW)	125 – 985

**Tab. 3** Výkonové parametry TERMIZO.

#### 4.1.2 Identifikace stěžejních technologických bloků a jejich modelování

Technologické schéma provozu s podstatnými technologickými uzly a proudy je znázorněno na obr. 1.



**Obr. 1** Stěžejní bloky a proudy v provozu TERMIZO zahrnuté do modelu

Z hlediska účelu modelu (technicko-ekonomická simulace) je nejpodstatnější parní cyklus, protože kromě likvidace odpadu má TERMIZO hlavní příjmy z prodeje tepla a elektřiny. Nejdůležitější technologické uzly, resp. proudy, jsou tedy parní kotel (výroba páry), turbogenerátor TG1 (výroba elektřiny), turbogenerátor

TG2 (výroba elektřiny), export elektřiny a export tepla (ve formě páry). Zbylé uzly, resp. proudy, do ekonomiky zařízení nepromlouvají tak výrazně, a proto jim nebude v popisu vytváření modelu věnována pozornost, ačkoliv jsou součástí modelu.

Podle topologie, znalostí technologie a toho, zda jsou parametry měřeny, lze odhadnout pravděpodobné empirické závislosti. Konkrétní funkce navržených závislostí jsou pak nalezeny a ověřeny pomocí regresní analýzy:

- množství vyrobené páry  $m_{ST}$  závisí na množství dávkovaného odpadu  $m_w$  a jeho výhřevnosti  $LHV_w$

$$m_{ST} = 0,29 \cdot m_w \cdot LHV_w + 1,64 \quad (\text{t/h}) \quad (1)$$

- výroba elektřiny na TG1  $P_{TG1}$  závisí na množství páry vedené na TG1  $m_{ST,TG1}$

$$P_{TG1} = 84,78 \cdot m_{ST,TG1} + 809,25 \quad (\text{kW}) \quad (2)$$

- výroba elektřiny na TG2  $P_{TG2}$  závisí na množství páry vedené na TG2  $m_{ST,TG2}$

$$P_{TG2} = 44,71 \cdot m_{ST,TG2} - 85,84 \quad (\text{kW}) \quad (3)$$

- export elektřiny  $P_{ELE,EXP}$  závisí na součtu vyrobené elektřiny na TG1 a TG 2

$$P_{ELE,EXP} = 0,68 \cdot 10^{-4} \cdot (P_{TG1} + P_{TG2})^2 + 0,38 \cdot (P_{TG1} + P_{TG2}) - 331,98 \quad (\text{kW}) \quad (4)$$

- export tepla - export tepla (formou množství exportované páry) nelze pro letní měsíce predikovat kvůli variabilní poptávce po teple, a proto je zadáván jako vstupní parametr modelu.

Vstupními parametry jsou dále množství dávkovaného odpadu a výhřevnost odpadu.

### 4.1.3 Sestavení simulačního modelu a jeho ověření

Díky charakteru soustavy rovnic a topologii systému lze systém simulovat sekvenčně-modulárním přístupem.

Ověření modelu proběhlo dvojím způsobem, jednak ověřením pomocí provozních dat, jednak ověřením platnosti bilancí v softwaru W2E, což je softwarový produkt pro výpočet hmotnostních a energetických bilancí vyvíjený na pracovišti Ústavu procesního a ekologického inženýrství, FSI, VUT v Brně.

Pro testování na provozních datech, byly identifikovány datové sady s ustálenými výkony v delším časovém intervalu (12 až 48 hodin). Srovnání s jednou z datových sad je v tab. 4.

Validace modelu potvrdila, že ve většině provozních ukazatelů je dosahováno velmi dobré shody mezi naměřenými daty a simulačním modelem. Pomocí modelu sestaveného v softwaru W2E bylo ověřeno, že i po bilanční stránce je simulační model platný.

parametr	jednotka	Datová sada pro střední výkon			poznámka
		modelová hodnota	provozní hodnota	odchylka [%]	
Dávkování odpadu	(t/h)	11,5		-	VSTUPNÍ HODNOTY
Výhřevnost	(GJ/t)	10,3		-	
Export páry do Teplárny Liberec	(t/h)	29,5		-	
Vyrobena pára	(t/h)	36,0	35,3	<b>2,0</b>	
Výkon TG1	(kW)	2216,6	2160,1	<b>2,6</b>	
Dodávka el. do Teplárny Liberec	(kW)	800,6	861,5	<b>-7,1</b>	

**Tab. 4** Výsledky srovnání modelu s provozními daty

#### 4.1.4 Technicko-ekonomický model a jeho využití

Účelem vytvořeného modelu je na základě předchozího vyčíslení bilance zařízení vyhodnotit vliv různých provozních režimů na ekonomiku provozu.

Vzhledem k vytyčenému účelu byly v modelu zahrnuty následující položky (příjmy a variabilní náklady), které jsou více či méně závislé na způsobu využití tepla:

- příjem za zpracování odpadu
- příjem za prodej tepla
- příjem za prodej silové elektřiny
- příjem za uplatnění příspěvků k ceně elektřiny (KVET- kombinovaná výroba tepla a elektřiny, DZE - spalování druhotných zdrojů energie)
- náklady na demi-vodu.

Dále jsou zahrnuty rovněž některé variabilní položky, které nejsou přímo závislé na způsobu využití tepla, ale více na zpracovatelské kapacitě, resp. výrobě tepla v kotli. Jedná se zejména o:

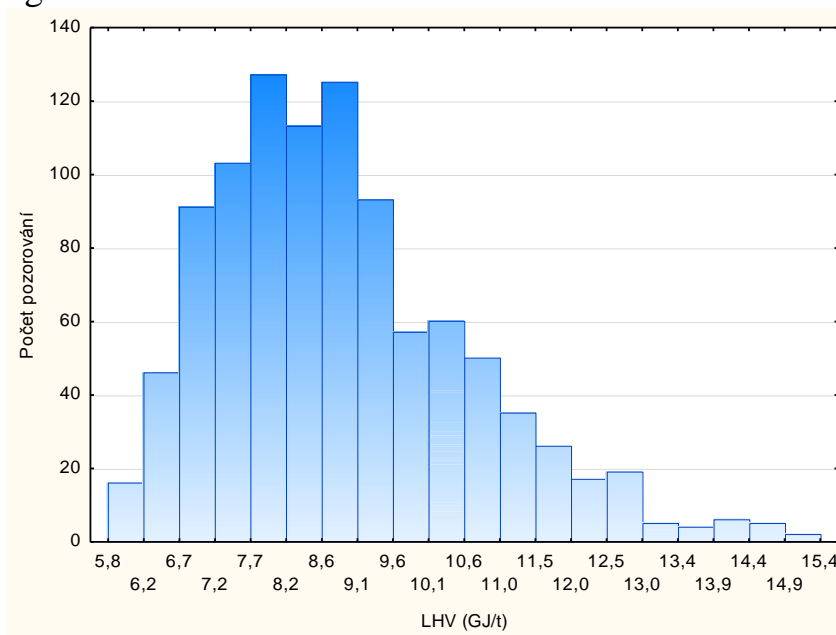
- náklady na čiřenou vodu
- náklady na chemické látky.

V modelu je vstupním parametrem výhřevnost, která má náhodný charakter. Při simulaci systémů s náhodnými veličinami lze použít např. metodu *Monte Carlo*.

Použití tohoto přístupu bude demonstrováno na příkladu, kdy chce provozovatel znát, s jakou pravděpodobností budou tržby vyšší než 25 tis Kč/h v průměrném lednovém dnu, bude-li spalovat průměrně 11,8 t/h odpadu.

Provozní stav je dán množstvím dávkovaného odpadu (11,8 t/h) a jeho výhřevností. Výhřevnost zde ale není určena jedinou hodnotou, nýbrž

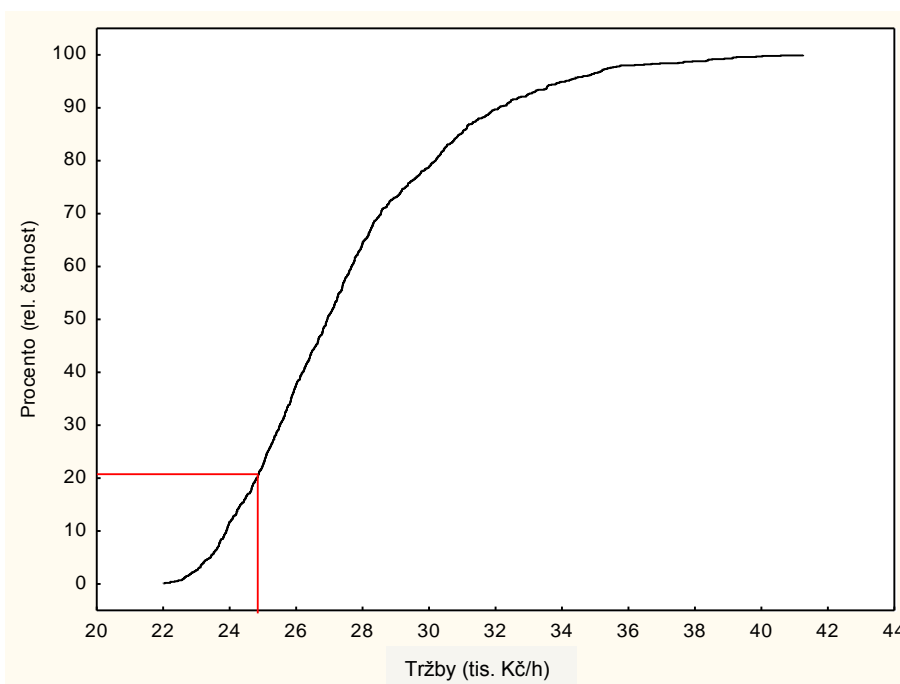
pravděpodobnostním rozdělením. To je znázorněno na obr. 2. Toto rozdělení lze aproximovat log-normálním rozdělením.



**Obr. 2** Histogram výhřevnosti v měsíci lednu

Pro simulaci bylo vygenerováno tisíc hodnot výhřevnosti právě z tohoto aproximovaného rozdělení. Vygenerované hodnoty pak byly použity jako vstupní parametr k výpočtům. Tím bylo získáno tisíc hodnot pro tržby.

Na základě výsledků lze spočítat pravděpodobnost, se kterou budou tržby vyšší než 25 tis. Kč/h. Názorně je to zřejmé z grafu distribuční funkce tržeb (obr. 3), kde je vidět, že výše tržeb do hodnoty 25 tis. Kč/h má asi 20 % pravděpodobnost. Jinak řečeno s pravděpodobností 80 % budou tržby vyšší než 25 tis. Kč/h.



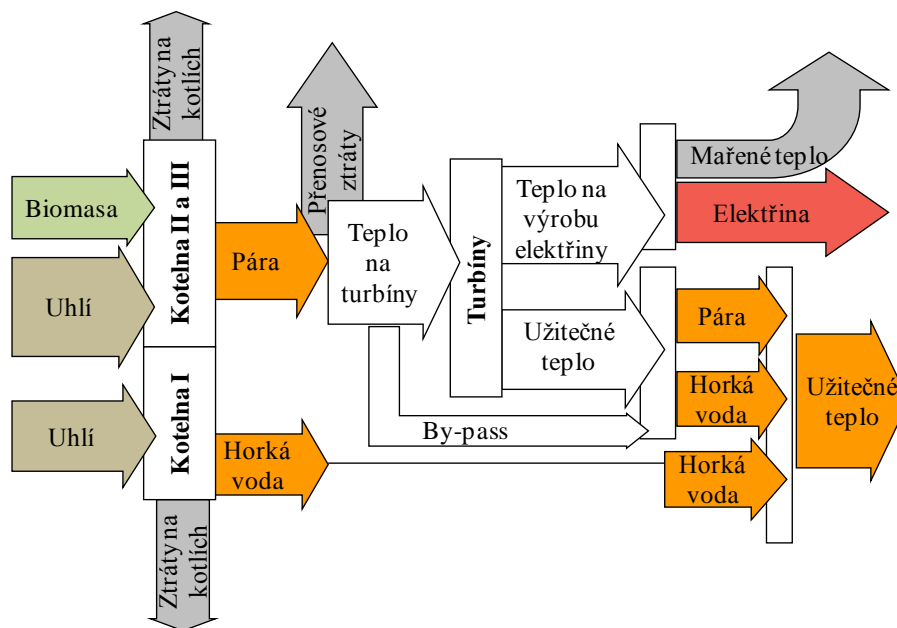
**Obr. 3** Distribuční funkce tržeb

## 4.2 OPTIMALIZACE PALIVOVÉ ZÁKLADNY TEPLÁRENSKÉHO PROVOZU VYUŽÍVAJÍCÍHO UHLÍ A BIOMASOVÁ PALIVA

Postup při využití matematické optimalizace bude prezentován na případové studii plánování provozu teplárny využívající více typů paliv. Formulaci optimalizační úlohy předchází vytvoření technicko-ekonomického optimalizačního modelu zařízení. Kroky při vytváření modelu teplárny, který je založen na kombinaci bilančních a empirických modelů, jsou analogické s těmi, které byly popsány v předchozí kapitole. Proto zde budou uvedeny pouze nejdůležitější závěry této fáze. Hlavní pozornost bude věnována následné optimalizaci. Případová studie má za cíl přispět k finančně přijatelné integraci biomasových paliv v teplárenském provozu.

### 4.2.1 Popis modelové teplárny

Předmětem případové studie je reálná teplárna, která současně vyrábí teplo a elektřinu (tzv. kogenerace). Primárním palivem je hnědé uhlí a dále se spolu s uhlím spaluje v kotlích také biomasa. Teplárna má tři kotelny. V kotelně I jsou instalovány dva horkovodní kotle každý o výkonu 34,8 MW<sub>t</sub>. V kotelně II jsou instalovány dva granulační parní kotle pro spalování hnědého uhlí, každý o výkonu 128 MW<sub>t</sub>. V kotelně III je instalován jeden fluidní kotel o výkonu 128 MW<sub>t</sub>. Kotle v kotelnách II a III umožňují spoluspalování biomasy a uhlí. Pára vyrobená v kotelně II a III je vedena do strojovny, kde se na parních turbínách generuje elektřina. Ve strojovně je instalována jedna protitlaká turbína o jmenovitém výkonu 67 MW<sub>e</sub> a jedna kondenzační odběrová turbína o jmenovitém výkonu 50 MW<sub>e</sub>. Blokové schéma s toky energie je znázorněno na obr. 4.



Obr. 4 Blokové schéma modelového teplárenského provozu

## 4.2.2 Technicko-ekonomický model

Při popisu modelu je využit algebraický zápis, proto jsou pro model definovány množiny klíčových prvků.

První množinou je množina časových období  $T$ , která obsahuje měsíce v roce, tedy prvky  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{12}\}$ .

Další množinou je množina paliv  $J$ . Palivový mix teplárny se skládá z uhlí (ozn.  $ju$ ), dřevní štěpky (ozn.  $jds$ ) a dalších paliv na bázi odpadní biomasy z různých průmyslových procesů, která nejsou na základě dohody s poskytovatelem údajů blíže specifikována (ozn.  $jpm, jcr, jv, jp, jpf$ ). Množina paliv je tedy  $J = \{ju, jds, jpm, jcr, jv, jp, jpf\}$ .

Dále jsou zde množiny kotlů a turbín. Ačkoliv mají kotelny I a II více kotlů, provozní data nerozlišují jednotlivé kotle, a proto jsou kotelny uvažovány jako jeden kotol. Kotelny I, II a III jsou označeny jako  $k_1, k_2, k_3$  a množina kotlů je tedy  $K = \{k_1, k_2, k_3\}$ .

Podobná situace je i v případě množiny turbín. Ačkoliv jsou instalovány dvě turbíny, provozní data opět nerozlišují mezi jednotlivými turbínami (jsou k dispozici pouze údaje o výrobě elektřiny a tepla ve strojně), proto jsou obě turbíny uvažovány jako celek. Množina turbín  $P$  má tedy pouze jeden prvek  $P = \{p_1\}$ . Vzhledem k tomuto je zbytečné, aby byl tento index při dalším zápisu uváděn, a proto je dále vynecháván.

Poslední množinou je množina energií, která má vždy dva prvky, teplo  $mh$  a elektřinu  $me$ , tedy  $M = \{mh, me\}$ . S využitím těchto pěti množin je sestaven model.

Z pohledu samotné technologie má model tři hlavní části: parní a horkovodní kotle, parní turbíny a využití vyrobené energie

### **Horkovodní a parní Kotle**

Jako první je standardním způsobem vypočítána energie vnesená palivy  $u_{j,k,t}$ :

$$u_{j,k,t} = x_{j,k,t} \cdot \xi_j, \quad (5)$$

kde  $x_{j,k,t}$  je množství paliva typu  $j$  dávkovaného do kotle  $k$  v měsíci  $t$  a  $\xi_j$  je výhřevnost paliva  $j$ .

Dále teplo předané vodě/páře je vypočítáno pomocí účinnosti kotlů. Na účinnost kotle má vliv mnoho faktorů jako zatížení, podíl spoluspalované biomasy, atd. Pro regresní analýzu však nebylo k dispozici dostatek dat. Proto se jsou použity průměrné hodnoty účinnosti.

$$\eta_{k1} = 67\%$$

$$\eta_{k2} = 84\%$$

$$\eta_{k3} = 89\%$$



Pomocí standardní rovnice je pak vypočítána energie předaná vodě/páře  $v_{j,k,t}$ :

$$v_{j,k,t} = u_{j,k,t} \cdot \eta_k \quad (6)$$

Kotle jsou samozřejmě omezeny svou kapacitou:

$$\sum_{j \in J} u_{j,k,t} \leq b_{k,t}, \quad (7)$$

kde  $b_{k,t}$  je maximální měsíční kapacita kotlů daná nominálním výkonem násobeným počtem disponibilních provozních hodin v daném měsíci. Kromě toho jsou zde i další omezení a to na podíl spoluspalované biomasy. Tato omezení jsou vyjádřena buď energetickým poměrem nebo hmotnostním poměrem biomasy ku uhlí. V případě kotelny II je to maximálně 10 % množství uhlí, v případě kotelny III je to maximálně 40 % energie vnesené uhlím.

Za účelem formulace těchto omezení je zavedena podmnožina množiny paliv obsahující pouze biomasová paliva  $JB = \{jdu, jpm, jcr, jv, jp, jpf\}$ ,  $JB \subset J$ . Omezení jsou pak ve tvaru:

$$0.1 \cdot \sum_{j \in JB} x_{j,k2,t} \leq x_{ju,k2,t}, \quad (8)$$

$$0.4 \cdot \sum_{j \in JB} x_{j,k3,t} \cdot \xi_j \leq x_{ju,k3,t} \cdot \xi_{ju}. \quad (9)$$

U modelu kotlů uvedeme omezení, které zohledňuje roční dostupné množství paliv  $a_j$ . Toto omezení propojuje jednotlivé měsíce a z toho důvodu je nutné řešit úlohu jako celek pro všechny měsíce, nikoliv pro každý měsíc zvlášť.

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} x_{j,k,t} \leq a_j. \quad (10)$$

### ***Parní turbíny***

Vzhledem k tomu, že kotle v kotelně I nevyrábí páru ale pouze horkou vodu, je nezbytné pro další popis definovat množinu kotlů, které vyrábí páru využitou ve strojovně. To jsou kotle z kotelen II a III, množina má tedy dva prvky  $KT = \{k_2, k_3\}$ ,  $KT \subset K$ . Nyní lze formulovat vztah pro výpočet množství energie obsažené v páře vedené do strojovny  $w_t$ :

$$w_t = \sum_{j \in J} \sum_{k \in KT} v_{j,k,t}. \quad (11)$$

Tato energie je přeměněna na elektřinu a teplo. Vztah mezi energií přivedenou na turbíny a výrobou tepla a elektřiny lze vyjádřit pomocí funkce dvou proměnných.

Pomocí regresní analýzy byl nalezen model ve tvaru:

$$w_t = 0.26 \cdot y_{m=mh,t} + 9.73 \cdot y_{m=me,t} + 61.44 \text{ (TJ)}, \quad (12)$$

kde  $y_{m=mh,t}$  je množství vyrobeného tepla a  $y_{m=me,t}$  je množství vyrobené elektřiny.

Jednoduše pak lze vypočítat množství mařeného tepla a ztráty  $y_t^-$ :

$$w_t = \sum_{m \in M} y_{m,t} + y_t^-. \quad (13)$$

Zbývá už jen omezení na kapacitu turbín dané maximálním zatížením, které je 800 TJ. Omezení je tedy ve tvaru:

$$w_t \leq 800. \quad (14)$$

### ***Využití vyrobeného tepla a elektřiny***

Vyrobené teplo a elektřina jsou z části využity pro vlastní spotřebu a zbytek je exportován do sítě. Vlastní spotřebu elektřiny  $y_{me,t}^{sc}$  lze dobře odhadnout na základě celkové výroby tepla:

$$y_{me,t}^{sc} = 0.01 \cdot \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} v_{j,k,t} + 1.52 \text{ (GWh)}. \quad (15)$$

Odhad vlastní spotřeby tepla  $y_{mh,t}^{sc}$  vychází z množství exportovaného tepla  $y_{mh,t}^{ex}$ , protože poptávka po teple reflektuje topné období:

$$y_{mh,t}^{sc} = 0.02 \cdot y_{mh,t}^{ex} - 1.16 \text{ (TJ)}. \quad (16)$$

Pro teplo, resp. elektřinu, musí platit energetická bilance. Tedy součet exportované elektřiny, resp. tepla, a vlastní spotřeby elektřiny, resp. tepla, se rovná vyrobené elektřině, resp. teplu. Vzhledem k tomu, že kotle v kotelně I nepřispívají k výrobě páry, je potřeba pro formulaci energetické bilance zavést jednotkový vektor  $\mathbf{e} = (e_m)_{m \in M}$ , který rozlišuje mezi teplem a elektřinou  $\mathbf{e} = (1,0)$ . Bilance je pak dána rovnicí:

$$e_m \cdot v_{j,c,k1,t} + y_{m,t} = y_{m,t}^{sc} + y_{m,t}^{exp}. \quad (17)$$

Tímto je popsána technická část modelu. Dále je pozornost věnována ekonomické části.

### ***Ekonomické parametry provozu***

V ekonomickém modelu se budeme zabývat pouze variabilními příjmy a náklady. Fixní položky nejsou ovlivněny provozem a jsou z hlediska řešeného problému nepodstatné. Příjmy teplárny se skládají z:

- prodeje tepla a elektřiny  $I_E$
- příplatku k elektřině z KVET  $I_{KVET}$
- příplatku k elektřině z OZE (zelené bonusy)  $I_{RES-E}$
- obchodu s emisními povolenkami CO<sub>2</sub>  $I_{CO_2}$ .

Náklady teplárny se skládají z:

- nákladů na nákup paliv  $C_F$
- nákladů na likvidaci popela  $C_A$
- nákladů na odsíření spalín  $C_S$ .

### 4.2.3 Formulace optimalizační úlohy

Cílem je nalézt optimální plán využití palivového mixu a optimální plán provozu ve smyslu výroby tepla a elektřiny tak, aby byl generován maximální zisk. Uvažovaným časovým horizontem je jeden rok s časovým krokem jeden měsíc. Konkrétně budeme hledat optimální dávku každého paliva do každého kotle v každém měsíci. Hodnotícím kritériem je tedy zisk teplárny daný vztahem:

$$z = I_E + I_{KVET} + I_{RES-E} + I_{CO2} - C_F - C_A - C_S \quad (18)$$

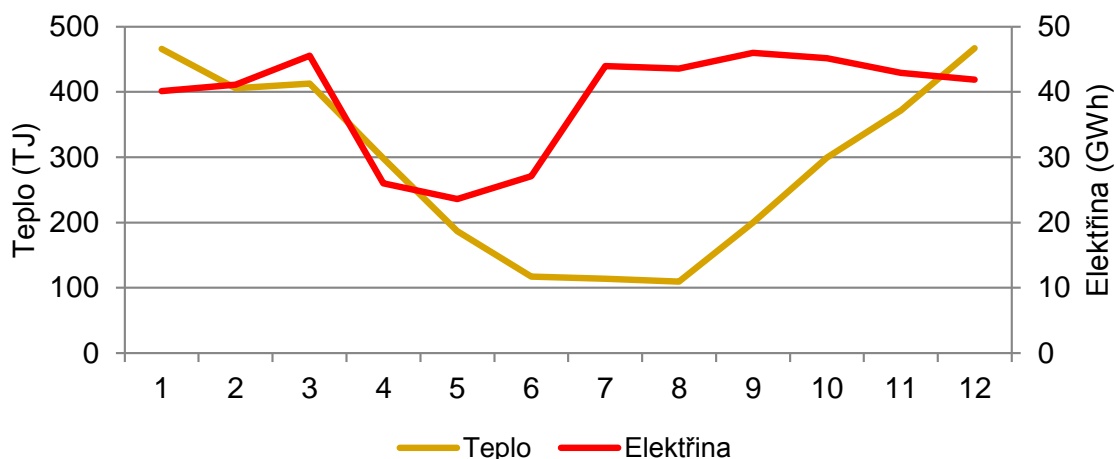
Ekonomická bilance je uváděna v EUR.

Jak již bylo zmíněno v části popisující technicko-ekonomický model teplárny, k dispozici je celkem sedm typů paliv. Hodnoty parametrů podstatných pro optimalizaci jsou uvedeny v tab. 5. Cena paliv není dána konkrétní hodnotou, ale pouze poměrnou cenou vztaženou na cenu uhlí. Je to z důvodu zachování obchodního tajemství teplárny.

palivo	cena (-)	výhřevnost (GJ/t)	dostupnost (kt/rok)	bonus (€/MWh)	popeloviny (% hm.)	síra (% hm.)
<i>jc</i>	1	13.8	bez limitu	0	11.5	0.6
<i>jwc</i>	2.7	12.1	70.0	27	1.0	0
<i>jsg</i>	1.4	13.6	26.6	27	2.3	0.1
<i>jsbp</i>	5.2	13.4	44.0	27	11.1	0
<i>jrc</i>	4.7	16.6	25.0	27	6.4	0.4
<i>jsc</i>	3.5	16.5	25.0	27	6.5	0.4
<i>jfb</i>	1.6	14.1	7.7	2	6.9	0.5

**Tab. 5** Parametry paliv

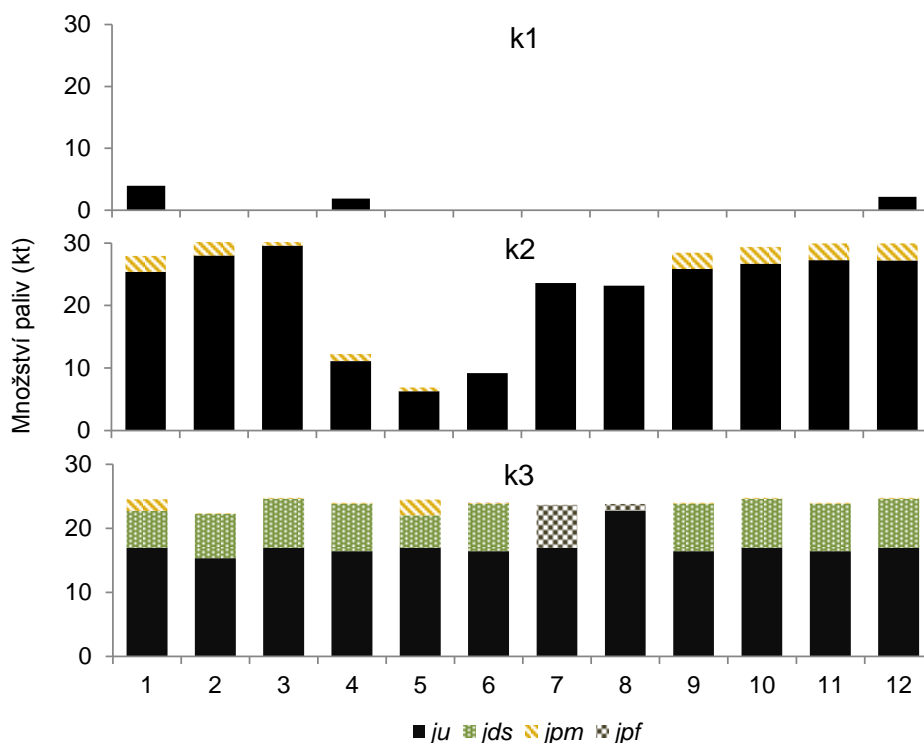
Dále je nutné určit poptávku po teple a elektrické energii. Roční průběh poptávky je zobrazen v grafu na obr. 5. Tyto hodnoty jsou opět získány z provozních dat modelové teplárny. Splnění poptávky je v úloze zajištěno omezením na exportovanou elektřinu a teplo.



Obr. 5 Poptávka po teple a elektřině

#### 4.2.4 Využití modelu

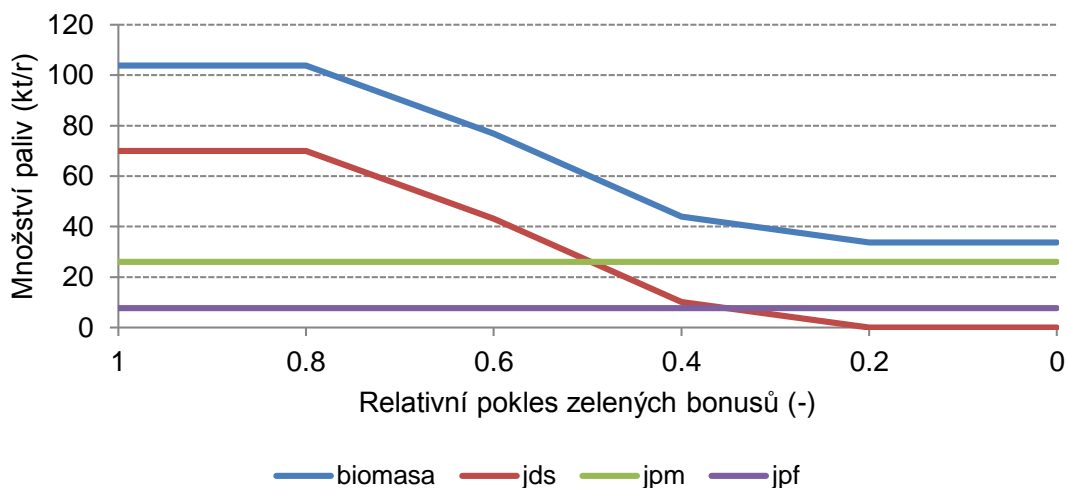
Optimální plán ročního dávkování paliv doporučuje (kromě uhlí) využití dřevní štěpky, *jds*, a dále biomasových paliv označených jako *jpm* a *jpf* (viz obr. 6). U všech těchto paliv je využito celého dostupného množství. Ale celkově není vždy dosaženo technologického limitu kotlů. Cena nevyužitých paliv je tedy natolik vysoká, že ani zelené bonusy nezaručují ekonomickou výhodnost jejich využití.



Obr. 6 Optimální plán dávkování paliv

Optimalizační model lze využít k analýze citlivosti na různé vstupní parametry modelu. Lze například zjistit vliv výše zelených bonusů. Analýza byla provedena

tak, že výše zelených bonusů se v každém kroku snižuje o 20 %. Vliv výše zelených bonusů zobrazuje graf na obr. 7. Biomasová paliva jsou využita na limitu dostupnosti až do 20% poklesu zelených bonusů. Další pokles pak má vliv pouze na využití dřevní štěpky. Paliva *jpm* a *jpf* jsou výhodná i při nulové výši zelených bonusů, což může být překvapující, protože jsou cca o 50 % dražší než uhlí. Důvodem výhodnosti je příjem z prodeje emisních povolenek, který převažuje nad zvýšeným nákladem na nákup paliv.



**Obr. 7** Citlivost využití biomasových paliv na pokles zelených bonusů

## 5 ZÁVĚR

Energetické využití odpadů představuje v současnosti jeden z hlavních směrů v odpadovém hospodářství. Zejména ve vyspělých státech EU, kde téměř neexistuje skládkování, je toto nakládání s odpady velmi rozšířené. V České republice se zatím většina odpadů skládkuje, ale v důsledku přijatých směrnic EU se dá předpokládat, že dojde k odklonu od skládkování a ke zvýšení kapacity (výstavbou nových zařízení) pro energetické využití odpadů.

Podobná situace je v oblasti využití obnovitelných zdrojů energie, kde se ČR vůči EU zavázala významně navýšit podíl vyrobené energie z těchto zdrojů. Dá se předpokládat, že stěžejní zdroj pro naplnění tohoto závazku bude biomasa. Ta se dnes hojně využívá ve velkých energetických zdrojích při takzvaném spluspalování uhlí a biomasy a do budoucna se dá očekávat, že tento trend bude pokračovat.

Jako podpůrný prostředek pro zefektivnění provozů nebo jako podpora při rozhodování např. o investicích, mohou sloužit simulační a optimalizační nástroje. Pomocí nich lze odhadovat chování systému za různých provozních podmínek a případně najít optimální nastavení.

V dizertační práci je navržen systematický přístup pro vytváření modelů pro účely simulace a optimalizace. Tento přístup je demonstrován na několika případových studiích založených na řešení konkrétních inženýrských problémů z praxe. V oblasti simulace byl detailně popsán postup vytvoření technicko-ekonomického modelu

existujícího zařízení pro energetické využití odpadů. Přínosem je aplikace stochastických metod použitých k modelování a simulaci těchto zařízení. Tento přístup reflektuje charakter výhřevnosti odpadu coby náhodné veličiny. Analogickým způsobem byl zpracován simulační model energetického systému zajišťujícího dodávku tepla a chladu pro komplex budov (není součástí zkrácené verze dizertační práce). Přestože obě případové studie jsou na první pohled svým charakterem podobné, liší se svou komplexností a použitým simulačním přístupem.

Využití optimalizačních metod je prezentováno v úloze z oblasti dlouhodobého plánování investic, která opět vychází z konkrétního zadání a požadavků průmyslové sféry. Jedná se o optimální využití palivové základny teplárenského provozu spalujícího uhlí a různá paliva na bázi biomasy. Vzhledem ke specifickým podmínkám, které se váží na biomasová paliva (zelené bonusy, omezená dostupnost), je tato úloha přínosem pro řadu praktických aplikací. Vzhledem k postupnému omezování dostupnosti a zvyšování ceny biomasy se dá předpokládat široké uplatnění vytvořeného systému.

Vedle biomasy je velmi perspektivní aplikace optimalizačních metod také na úlohy z oblasti energetického využití odpadů. V tomto směru budou probíhat další výzkumné práce, které mají napomoci k efektivnímu energetickému využití odpadů s důrazem na využití vyrobeného tepla v rámci teplárenských soustav. Konkrétně se jedná např. o následující úlohy:

- optimální plánování investic do zařízení pro spalování odpadů – určení kapacity a způsobu využití tepla
- integrace zařízení na energetické využití odpadů do existujících teplárenských provozů.

## LITERATURA

- [1] Baxter, L.: Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy. *Fuel*, 2005, vol. 84, no. 10, pp. 1295-1302. ISSN 0016-2361
- [2] Karafiát, J. Biomasa v energetice - podpora udržitelného rozvoje, nebo další průšvih? In *Teplárenské dny 2011*, sekce II. , Ostrava, 2011
- [3] Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. Obnovitelné zdroje energie v roce 2010 [online]. 2011, [cit. 16. března 2012]. Dostupné z <<http://www.tretiruka.cz/news/obnovitelne-zdroje-energie-v-roce-20101/>>
- [4] Zákon ze dne 15. května o odpadech a o změně některých dalších zákonů. In *Sbírka předpisů České republiky*. 2001, částka 71/2001 sbírky, s. 4074-4259
- [5] Poživil, J., Vaněk, T., Bernauer, B.: *Procesní systémové inženýrství*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1997. 220 s. ISBN 80-7080-311-8.
- [6] Pavlas, M.: *Výpočtový systém pro analýzu využití energie u technologických linek*. Brno 2004. 50 s. Diplomová práce na FSI VUT v Brně. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [7] Shang, Z., Kokossis, A.: A transshipment model for the optimisation of steam levels of total site utility system for multiperiod operation. *Comput Chem Eng*, 2004, vol. 28, no. 9, pp. 1673-1688. ISSN 0098-1354
- [8] Varbanov, P.S.: *Optimisation and synthesis of process utility systems*. Manchester 2004. PhD Thesis, UMIST. Supervisor prof. Robin Smith.
- [9] Varbanov, P.,S., Doyle, S., Smith, R.: Modelling and Optimization of Utility Systems. *Chem Eng Res Design*, 2004, vol. 82, no. 5, pp. 561-578. ISSN 0263-8762
- [10] Varbanov, P., Perry, S., Klemeš, J., Smith, R.: Synthesis of industrial utility systems: cost-effective de-carbonisation. *Appl Therm Eng*, 2005, vol. 25, no. 7, pp. 985-1001. ISSN 1359-4311
- [11] Medina-Flores, J.,M., Picón-Núñez, M.: Modelling the power production of single and multiple extraction steam turbines. *Chemical Engineering Science*, 2010, vol. 65, no. 9, pp. 2811-2820. ISSN 0009-2509
- [12] Luo, X., Zhang, B., Chen, Y., Mo, S.: Modeling and optimization of a utility system containing multiple extractions steam turbines. *Energy*, 2011, vol. 36, no. 5, pp. 3501-3512. ISSN 0360-5442
- [13] Felder, R.,M., Rousseau, R.,W.: *Elementary Principles of Chemical Processes*. 3rd edition. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 675 p. ISBN 0-471-68757-X

- [14] Oh S.-D., Lee, H.-J., Jung, J.-Y., Kwak, H.-Y.: Optimal planning and economic evaluation of cogeneration system. *Energy*, 2007, vol. 32, no. 5, pp. 760-771. ISSN 0360-5442
- [15] Casisi, M., Pinamonti, P., Reini, M.: Optimal lay-out and operation of combined heat & power (CHP) distributed generation systems. *Energy*, 2009, vol. 34, no. 12, pp. 2175-83. ISSN 0360-5442
- [16] Lozano, M.,A., Ramos, J.,C., Serra, L.,M.: Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints. *Energy*, 2010, vol. 35, no. 2, pp. 794-805. ISSN 0360-5442
- [17] Aguilar, O., Perry, S.,J., Kim, J.-K., Smith, R.: Design and Optimization of Flexible Utility Systems Subject to Variable Conditions: Part 1: Modelling Framework. *Chem Eng Res Design*, 2007, vol. 85. no. 8, pp. 1136-1148. ISSN 0263-8762
- [18] Aguilar, O., Perry, S.,J., Kim, J.-K., Smith, R.: Design and Optimization of Flexible Utility Systems Subject to Variable Conditions: Part 2: Methodology and Applications. *Chem Eng Res Design*, 2007, vol. 85, no. 8, pp. 1149-68. ISSN 0263-8762
- [19] Beihong, Z., Weiding, L.: An optimal sizing method for cogeneration plants. *Energy Build*, 2006, vol. 38, no. 3, pp. 189-195. ISSN 0378-7788
- [20] Savola, T., Tveit, T., Fogelholm, C.: A MINLP model including the pressure levels and multiperiods for CHP process optimisation. *Appl Therm Eng*, 2007, vol. 27, no. 11-12, pp. 1857-1867. ISSN 1359-4311
- [21] Su, C.-T., Chiang, C.-L.: An incorporated algorithm for combined heat and power economic dispatch. *Electr Power Syst Res*, 2004, vol. 69, no. 2-3, pp. 187-195. ISSN 0378-7796
- [22] Kallrath, J., Pardalos, P.M., Rebennack, S., Scheidt, M. (Eds.): *Optimization in the Energy Industry*. 1st ed. Springer, 2009. 533 p. ISBN 978-3-540-88964-9
- [23] Ko, A.,S., Chang, N.: Optimal planning of co-firing alternative fuels with coal in a power plant by grey nonlinear mixed integer programming model. *J Environ Manage*, 2008, vol. 88, no. 1, pp. 11-27. ISSN 0301-4797
- [24] De, S., Assadi, M.: Impact of cofiring biomass with coal in power plants – A techno-economic assessment. *Biomass Bioenergy*, 2009, vol. 33, no. 2, pp. 283-293. ISSN 0961-9534
- [25] Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B.,V., Leahy, M.: A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Appl Energy*, 2010, vol. 87, no. 4, pp. 1059-1082. ISSN 0306-2619



# ŽIVOTOPIS

## Osobní informace

Příjmení, jméno    Touš, Michal  
Datum narození    6. října 1982  
Stav                svobodný  
Adresa             Tábor 61, 612 00 Brno

## Kontakt

Mobilní telefon    +420 605784020  
E-mail              tous.michal@seznam.cz

## Vzdělání

08-11/2006        University of Malta, Studijní pobyt v rámci programu ERASMUS  
  
2007 – dosud      Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně,  
Procesní a ekologické inženýrství, Ph.D. student  
  
2002 – 2007        Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně,  
Matematické inženýrství, Ing.  
Diplomová práce: Simulace výtahového systému  
  
1998 – 2002        Gymnázium Řečkovice, Brno,  
všeobecné gymnázium, maturita

## Pracovní zkušenosti

2008 – dosud      Ústav procesního a ekologického inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně  
*Technický pracovník*

## Znalosti a dovednosti

### *Jazykové znalosti*

anglický jazyk aktivně

### *Počítačová gramotnost*

programovací jazyky JAVA, VBA  
práce v programech Maple, Statistica, GAMS, MS Office

*Další dovednosti*

Řidičský průkaz sk. B

**Zájmy**

Cestování, sporty (cyklistika, plavání, badminton), hra na kytaru

## PŘEHLED VLASTNÍ LITERATURY

- [1] Houdková, L., Bébar, L., Kutil, J., Touš, M.: Efektivní energetické využití kalů z ÚČOV Praha. In *Zborník konferencie Ochrana ovzdušia 2008*. 1. Bratislava: Kongres management, s.r.o., 2008. s. 35-39. ISBN 978-80-89275-14-4
- [2] Touš, M., Houdková, L., Bébar, L., Pavlas, M., Stehlík, P.: Waste-to-energy (W2E) software - a support tool for decision making process. *Chemical Engineering Transactions*, 2009, vol. 18, pp. 971-976. ISSN 1974- 9791
- [3] Pavlas, M., Touš, M.: Efficient waste-to- energy system as a contribution to clean technologies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2009, vol. 11, no. 1, s. 19-29. ISSN 1618- 954X.
- [4] Bébar, L., Touš, M., Kropáč, J., Stehlík, P.: Současný stav a očekávané vývojové trendy termického zpracování odpadů. In *56. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2009*. 1. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2009. s. A1. 1 ( s.)ISBN 978-80-86059-51- 8.
- [5] Pavlas, M., Touš, M., Bébar, L.: Energeticky efektivní zpracování komunálních odpadů. In *Plné texty přednášek, 56. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2009*, CD- ROM. Praha: ČSCHI, 2009. s. A1. 2 ( s.)ISBN 978-80-86059-51- 8.
- [6] Popela, P., Drápela, T., Pavlas, M., Touš, M.: Energy conception of an integrated system - II. Alternative solutions and optimization. *Chemical Engineering Transactions*, 2009, vol. 18, pp. 689-694. ISSN 1974- 9791.
- [7] Touš, M., Pavlas, M., Stehlík, P., Popela, P.: Technical Economic Optimization of Existing Combustion Plant Utilizing Coal and Biomass. In *Book of abstracts*. Lausanne, Switzerland: EPFL, 2010. pp. 1999-2006.
- [8] Touš, M., Popela, P., Pavlas, M., Stehlík, P., Drápela, T.: A stochastic programming approach to optimization of combustion plant utilizing coal and biomass. In *MENDEL 2010*. Brno: Brno University of technology, 2010. pp. 584-589. ISBN 978-80-214-4120- 0.
- [9] Touš, M., Pavlas, M., Stehlík, P., Popela, P.: Effective biomass integration into existing combustion plant. *Chemical Engineering Transactions*, 2010, vol. 21, pp. 403-408. ISSN 1974- 9791.
- [10] Pavlas, M., Touš, M., Bébar, L.: Energy efficient processing of waste. *Chemical Engineering Transactions*, 2010, vol. 21, pp. 841-846. ISSN 1974- 9791.
- [11] Pavlas, M., Touš, M., Bébar, L., Stehlík, P.: Waste to Energy - An Evaluation of the Environmental Impact. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30, no. 16, pp. 2326-2332. ISSN 1359- 4311.

- [12] Touš, M., Ferdan, T., Pavlas, M., Ucekaj, V., Popela, P.: Waste-to-energy plant integrated into existing energy producing system. *Chemical Engineering Transactions*, 2011, vol. 25, s. 501-506. ISSN 1974- 9791.
- [13] Pavlas, M.; Touš, M.; Benáčeková, J.; Hejl, M. Určení výhřevnosti směsného komunálního odpadu statistickou analýzou výrobních ukazatelů ze zařízení EVO. In *58. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2011*. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2011. s. 139-150. ISBN 978-80-905035-0- 2.
- [14] Kropáč, J., Pavlas, M., Fusek, M., Klimek, P., Touš, M.: Waste-to-Energy Systems Modelling Using In- House Developed Software. *Chemical Engineering Transactions*, 2011, vol. 25, pp. 533-538. ISSN 1974- 9791.
- [15] Touš, M., Pavlas, M., Stehlík, P., Popela, P.: Effective biomass integration into existing combustion plant. *Energy*, 2011, vol. 36, no. 8, pp. 4654-4662. ISSN 0360- 5442.
- [16] Šomplák, R., Popela, P., Touš, M., Pavlas, M., Ucekaj, V.: Aplikace stochastického programování při plánování zařízení pro energetické využití odpadů. In *58. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2011*. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2011. s. 85-100. ISBN 978-80-905035-0- 2.
- [17] Pavlas, M., Touš, M., Klimek, P., Bébar, L.: Waste incineration with production of clean and reliable energy. *Journal of Cleaner Production*, 2011, vol. 13, no. 4, pp. 595-605. ISSN 0959- 6526.

## **ABSTRACT**

PhD thesis deals with application of simulation and optimization methods in the field of waste and biomass utilization for energy purposes.

Current situation in this field is described in the introductory. Following chapters deal with approaches of creating mathematical models of apparatus and processes used in the field of interest for simulation and optimization purposes. Stochastic methods, which are widely applied for real problems solution, are mentioned as well.

The core of the thesis consists in proposal of systematic approach and its application for simulation and optimization model building used in the field of interest. The application is demonstrated through two case studies. The first one deals with the building of simulation model of an existing waste-to-energy plant using its operation data. The second study deals with optimization model building and its application for a problem regarding utilization of biomass in an existing energy system.

## **ABSTRAKT**

Disertační práce se zabývá aplikací simulačních a optimalizačních metod v oblasti energetického využití odpadů a biomasy.

V úvodu práce je popsán současný stav v oblasti energetického využívání odpadů a biomasy v ČR i v EU. Další kapitoly pojednávají o přístupu k vytváření matematických modelů zařízení využívaných v předmětné oblasti a jejich aplikaci pro účely simulace a optimalizace. Je poukázáno rovněž na využitelnost stochastických přístupů, které nacházejí své uplatnění při řešení mnoha reálných problémů.

Jádro práce spočívá v návrhu systematického přístupu a jeho aplikaci při vytváření simulačních a optimalizačních modelů technologických jednotek z předmětné oblasti. Přístup je demonstrováno na dvou případových studiích. První studie pojednává o tvorbě simulačního modelu s využitím provozních dat reálného zařízení na energetické využití odpadu. Obsahem druhé studie je tvorba optimalizačního modelu a jeho využití při řešení úlohy z oblasti energetického využití biomasy v reálném provozu.