



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

ODBOR INŽENÝRSTVÍ RIZIK

DEPARTMENT OF RISK ENGINEERING

OPTIMALIZAČNÍ MODELY RIZIK V ENERGETICKÝCH SYSTÉMECH

OPTIMIZATION MODELS OF RISK IN ENERGY SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Tetour

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

RNDr. Pavel Popela, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Student:	Bc. Daniel Tetour
Studijní program:	Řízení rizik technických a ekonomických systémů
Studijní obor:	Řízení rizik technických systémů
Vedoucí práce:	RNDr. Pavel Popela, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20
Ústav:	Odbor inženýrství rizik

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizační modely rizik v energetických systémech

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student se bude zabývat problematikou optimalizace pro vybranou aplikační oblast energetických systémů. Student využije osvojené poznatky matematické analýzy, lineární algebry a diskrétní matematiky a bude je aplikovat na vybraný inženýrský proces transformující vstupy na cílové výstupy při dodržení technických omezení a minimalizaci vybrané účelové funkce. Při řešení budou dále využity poznatky z oblasti operačního výzkumu a vhodný matematický software. Vytvořený matematický model bude implementován a řešen pro testovací data. Související aplikační problematika řízení virtuálního energetického systému bude konzultována s prof. Štětinou z FSI.

Cíle diplomové práce:

- Student si prohloubí znalosti z oblasti optimalizačních modelů a metod.
- Vytvoření matematického I/O modelu vybraného inženýrského problému řízení činnosti energetického systému
- Analýza vlastností matematického modelu a jejich využití pro volbu řešícího algoritmu.
- Softwarová implementace a řešení pro testovací data, interpretace výsledků.

Seznam doporučené literatury:

Williams, H.P: Model Building for Mathematical Programming, Wiley and Sons, 1993.

Nash, S. et al. (1995): Linear and nonlinear programming. McGraw-Hill.

Klapka a kol. Metody operačního výzkumu, Brno 2001.

Bazaraa M., Shetty, M., Sherali H. Nonlinear Programming, Wiley and Sons, 2006.

Birge, J., Louveaux F.: Introduction to Stochastic Programming. 2nd edition, Springer Verlag, 2011.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Vladimír Adamec, CSc.
vedoucí odboru

doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D.
ředitel

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá matematickým modelováním problému alokace výrobních zdrojů v energetickém systému s ohledem na technické parametry zdrojů. Model zahrnuje náhodné vstupní parametry ovlivňující velikost poptávky a omezení zohledňující přidružená rizika. Práce řeší řízení provozu kotlů různých typů a rovněž systém rozšiřuje o tepelný zásobník a zkoumá jeho vliv na chování systému a dosažené výsledky. Optimalizační model vychází z víceperiodického dvojstupňového scénářového modelu stochastického programování a pracuje se simulovanými daty, která jsou založena na reálných datech, statisticky stanovených odhadech a využití logistické regrese. Pro softwarovou implementaci modelu byl použit software GAMS. Porovnáním dosažených výsledků se současným stavem bylo zjištěno, že tepelný zásobník má na celý systém kladný vliv, neboť skladováním nadbytku umožňuje vyšší využití levnějších neregulovatelných zdrojů a tím napomáhá ke snížení celkových nákladů systému.

Abstract

The diploma thesis deals with mathematical modeling of the resource allocation problem in an energy system with respect to technical parameters of the used resources. The model includes random input variables affecting the amount of demand and constraints related to associated risks. The thesis addresses control of the operation of various types of boilers and also extends the system with a heat storage tank examining its impact on the behavior of the system and achieved results. The optimization model is based on a multi-period two-stage scenario model of stochastic programming and works with simulated data, which combines real data, statistically determined estimates, and the use of logistic regression. The implementation utilizes GAMS software. When comparing the achieved results with the current state, it was found that the heat storage tank has a positive effect on the function of the system as it allows for extended usage of the cheaper unregulated sources by storing surplus heat, and thus helps to reduce the overall costs of the system.

Klíčová slova

Matematické modelování, optimalizace, stochastické programování, řízení rizik, alokace zdrojů, energetický systém, predikce teplot, predikce spotřeby, GAMS.

Keywords (example)

Mathematical modeling, optimization, stochastic programming, risk management, resource allocation, energy system, temperature forecast, consumption prediction, GAMS.

Bibliografická citace

TETOUR, Daniel. *Optimalizační modely rizik v energetických systémech*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, Odbor inženýrství rizik. Vedoucí práce RNDr. Pavel Popela, PhD.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Optimalizační modely rizik v energetických systémech“ jsem vypracoval/a samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil/a autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl/a nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom/a následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu RNDr. Pavlu Popelovi, Ph.D. za čas, který mi věnoval, a odborné vedení, které mi pomohlo při řešení této práce. Dále bych rád poděkoval panu prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za uvedení do aplikační problematiky.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	DEFINICE PROBLÉMU A VYMEZENÍ CÍLŮ	13
2.1	Současný stav	13
2.1.1	<i>Technické parametry kotlů na biomasu</i>	<i>13</i>
2.1.2	<i>Technické parametry kotlů na zemní plyn.....</i>	<i>14</i>
2.2	Definice optimalizačního problému	14
2.2.1	<i>Výše poptávané energie.....</i>	<i>15</i>
2.2.2	<i>Vývoj cen.....</i>	<i>15</i>
2.3	Cíle řešení.....	16
3	ÚVOD DO POUŽITÝCH METOD A NÁSTROJŮ.....	17
3.1	Pojem optimalizace.....	17
3.2	Matematické modelování v optimalizaci.....	17
3.3	Matematické programování	19
3.3.1	<i>Lineární programování.....</i>	<i>19</i>
3.3.2	<i>Nelineární programování.....</i>	<i>21</i>
3.3.3	<i>Celočíselné programování</i>	<i>22</i>
3.3.4	<i>Alokace zdrojů</i>	<i>22</i>
3.3.5	<i>Stochastické programování</i>	<i>23</i>
3.4	Počítačové programování	26
3.4.1	<i>Modelovací nástroj GAMS.....</i>	<i>26</i>
4	VLASTNÍ ŘEŠENÍ.....	33
4.1	Predikce výše potřebné energie.....	33
4.1.1	<i>Vytvoření dat pro simulační výpočty</i>	<i>34</i>
4.1.2	<i>Logistická regrese</i>	<i>37</i>
4.2	Predikce denního vývoje teplot	41
4.3	Návrh modelu	43
4.3.1	<i>Generátor spotřeby teplé vody.....</i>	<i>43</i>
4.3.2	<i>Generátor teplot.....</i>	<i>44</i>
4.3.3	<i>Implementace predikce denního vývoje teplot</i>	<i>44</i>
4.3.4	<i>Optimalizace – matematický model</i>	<i>46</i>
5	ANALÝZA VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ.....	55
5.1	Jaro	55
5.2	Léto	56

5.3 Podzim.....	56
5.4 Zima	57
6 ZÁVĚR	59
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	60
SEZNAM TABULEK.....	62
SEZNAM GRAFŮ.....	63
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	64
SEZNAM PŘÍLOH.....	65

1 ÚVOD

Pokrok je nevyhnutelný ve všech oblastech našeho každodenního života. Neustále se objevují nové postupy, jak zdokonalit výrobní procesy a nasycit čím dál tím vyšší poptávku. Zvyšující se nároky se promítají i do oblasti energetických systémů, jejichž optimalizace je předmětem této diplomové práce. Nejen že optimalizace energetického systému, potažmo procesu výroby energie, pomáhá pokrýt narůstající poptávku, ale také přispívá k odhalení nedostatků a zdokonalení procesu v oblastech úspory času a zdrojů, což vede ke snížení jeho celkových nákladů a zvýšení potenciálního zisku.

Problémům zvyšující poptávky čelilo na počátku 20. století i Brno, které bylo významným střediskem textilního průmyslu a továrny ke své výrobě potřebovaly velké množství tepla a elektřiny. Spotřeba páry v té době dokonce převyšovala spotřebu tehdejšího amerického New Yorku a její neustálý růst dal továrnám podnět k výstavbě vlastních závodních elektráren. Vladimír List, tehdejší profesor na České vysoké škole technické v Brně, dnes VUT, však přišel na základě své návštěvy New Yorku s daleko efektivnějším řešením. Vůbec první teplárna, která kombinovala výrobu tepla a elektřiny, byla spuštěna 4. prosince 1930 a díky důkladnému návrhu poskytovala výkon, jež dokázal výše zmíněný problém pokrytí poptávky po energiích vyřešit [1].

V dnešní době optimalizace spočívá i v jiných řešeních, než je mechanická konstrukce, popřípadě rozvržení prostor. Technický pokrok, především na poli robotiky a informatiky, přispěl k tomu, že ve většině výrobních procesů začali být lidé nahrazováni efektivnějšími stroji a je všeobecná snaha celý proces co do nejvyšší možné míry automatizovat [2] [3] [4]. Nástroje optimalizace, potažmo obecně matematického modelování [5], se poté využívají při automatizaci k identifikaci a vymezení rozsahu vztahů mezi dílčími prvky procesu za účelem dosažení co nejvyšší efektivity procesu, což může vést k nižším nákladům a potenciálně vyšším ziskům. To platí i na poli energetiky, kde je snaha nahradit řídicího pracovníka algoritmem schopným, na základě dostupných dat, co nejefektivněji řídit energetický systém nebo mu nabídnout nástroj pro podporu jeho rozhodování.

U energetických procesů není, na rozdíl od procesů vytvářejících hmotné statky, důležitá optimalizace z hlediska časové náročnosti – vyrobit co největší množství v co nejkratším čase. V porovnání s hmotnými statky, energie se těžko skladuje a při jejím skladování dochází ke ztrátám. Cílem optimalizace těchto procesů je snaha predikovat hodnoty poptávaného množství na základě statistických dat a těmto predikcím následně přizpůsobit výrobu, aby nedocházelo k výrobě velkého nadbytku, jehož hodnota časem klesá a má za následek snížení efektivity celého

procesu. Z toho vyplývá, že velkou roli při optimalizaci výrobních procesů energie hraje náhodnost, která je zároveň zdrojem rizik.

Nutnost predikce a přítomnost náhodnosti v kombinaci s riziky dělá z výše popsaného problému vhodnou úlohu stochastického programování, které umožňuje problém popsat matematickým modelem se všemi vstupními náhodnými proměnnými, závislostmi a omezeními [6]. Vyřešením této úlohy se dosáhne nejen optimalizace výrobního procesu energie, ale dojde i ke snížení hodnot přidružených rizik.

2 DEFINICE PROBLÉMU A VYMEZENÍ CÍLŮ

V úvodu této kapitoly je představen současný stav a definován problém, jehož řešení je předmětem diplomové práce. Druhá část kapitoly je poté věnována vymezení cílů práce.

2.1 SOUČASNÝ STAV

Jak bylo naznačeno v úvodu, diplomová práce se zabývá optimalizací procesu výroby energie energetickým systémem, konkrétně teplárnou. V současné době uvažovaná teplárna kombinuje výrobu z obnovitelných a fosilních zdrojů. K výrobě jsou využívány dva kotle na biomasu a čtyři kotle na zemní plyn, které jsou zapojené v kaskádě. Kombinovaný výkon všech šesti kotlů činí 21.2 MW_t. [7] a mají na starost vytápění obytné oblasti o rozloze cca 30 km².

2.1.1 Technické parametry kotlů na biomasu

Jako palivo kotlů na biomasu je využívána dřevní štěpka. Oba kotle jsou neregulovatelné, mají tedy pouze dva stavy operace – vypnutý nebo v provozu na plný výkon.

Mezi těmito módy operace nelze přepínat v rámci několika sekund. Po sepnutí jsou kotle schopny pracovat na plný výkon asi po 30 minutách. Tomuto času se říká náběh a během něj kotel postupně začíná vyrábět tepelnou energii. To stejné platí při vypnutí kotlů, kde trvá asi dalších 30 minut, než kotle zchladnou. V době chladnutí v kotlech dohořívají zbytky paliva, kotle tedy vyrábějí tepelnou energii i nějakou dobu po vypnutí. Doby náběhu a chladnutí je důležité zohlednit při optimalizaci, jelikož oba tyto časy korelují s výší poptávané energie a to tak, že při očekávání rapidního nárůstu je efektivnější kotle sepnout s předstihem, naopak při očekávání poklesu je efektivnější kotle vypnout dříve, než k němu reálně dojde. Řešení této problematiky je uvedeno v kapitole 4.3.4.

Častým sepínáním a vypínáním kotlů dochází k jejich nadměrnému opotřebení a zvyšuje se riziko porušení kotle. K nadměrnému opotřebování dochází i v případě, že jeden kotel vyrábí nepřetržitě na plný výkon, zatímco druhý většinu času stojí. Z těchto důvodů je při optimalizaci výrobního procesu dále důležité zohlednit tuto skutečnost a alternovat mezi kotli ve vhodných časových intervalech.

Tabulka 1: Technické parametry 1. uvažovaného kotle na biomasu

Nominální výkon	1100 kW
Teplota vody vstupní	70 °C
Teplota vody výstupní	105 °C

Účinnost	85 %
Čas náběhu	asi 30 minut

Tabulka 2: Technické parametry 2. uvažovaného kotle na biomasu

Nominální výkon	1500 kW
Teplota vody vstupní	75 °C
Teplota vody výstupní	110 °C
Účinnost	85 %
Čas náběhu	asi 30 minut

2.1.2 Technické parametry kotlů na zemní plyn

Teplárna má k dispozici čtyři kotle na zemní plyn zapojené v kaskádě. Zemní plyn je dodáván plynárně plynovodem od smlouvaného dodavatele.

Výhodou kaskády je regulovatelnost, která, v kombinaci s krátkou dobou náběhu, umožňuje operaci na plný výkon v rámci několika sekund. Díky těmto parametrům je kaskáda ideální pro pokrývání nečekaných nárůstů poptávek po energii nebo v situacích, kdy by bylo neekonomické spínat druhý kotel na biomasu.

Nevýhodou je naopak, v porovnání s kotli na biomasu, dražší provoz, který je podmíněný vyšší cenou paliva.

Tabulka 3: Technické parametry uvažované kaskády kotlů na zemní plyn

Nominální výkon 4 kotlů	4 x 4 650 kW
Účinnost	85 %
Čas náběhu	desítky sekund

2.2 DEFINICE OPTIMALIZAČNÍHO PROBLÉMU

Předmětem práce je optimalizovat výrobní proces tepla s ohledem na technické parametry uvažované teplárny. Optimalizace je realizována řešením matematického modelu za účelem maximalizace zisku. Při sestavování matematického modelu je potřeba uvažovat všechny faktory, tedy technické parametry současně využívaných prvků v systému, vazby mezi těmito prvky a jejich omezení, potažmo omezení systému jako takového. Důležitou roli při optimalizaci hrají také rizika, která jsou v práci modelována náhodnými parametry. Kromě výše specifikovaných technických parametrů je dále třeba uvažovat tyto faktory:

- výše energie potřebné pro výrobu poptávaného tepla

- vývoj cen biomasy (dřevní štěrky), zemního plynu a prodávané energie,

2.2.1 Výše poptávané energie

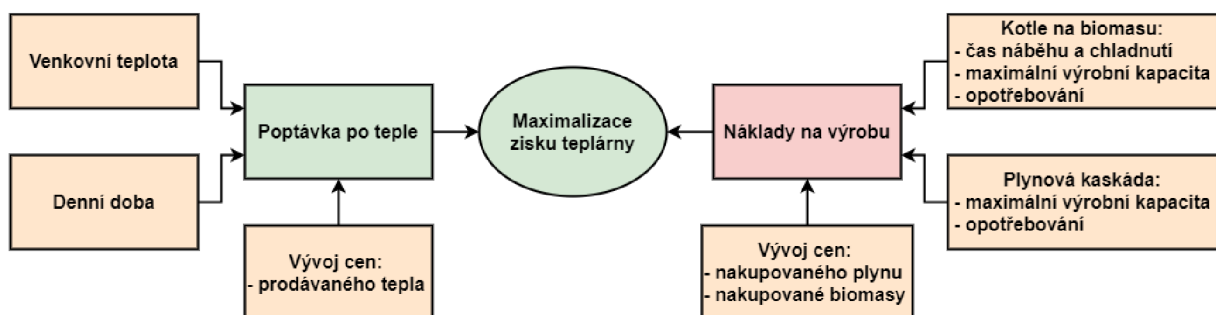
Výše poptávané energie pro výrobu tepla úzce souvisí s venkovní teplotou a denní dobou. Pro účely modelování je tedy vhodné predikovat tyto hodnoty za účelem zaručení jisté míry reálnosti matematického modelu. Výši poptávky pak lze predikovat na základě historických dat o množství vyrobené energie a venkovní teplotě v kombinaci s prognózami počasí hydrometeorologickým ústavem. Přesto mohou být tyto predikce nepřesné a tím ovlivnit model a kvalitu výsledku. Proto je nutné výsledky optimalizace důkladně ověřovat a nepovažovat je za finální řešení, neboť největším rizikem, které může být realizováno, je nepokrytí skutečné hodnoty poptávky. Predikci množství poptávané energie je věnována kapitola 4.1.

2.2.2 Vývoj cen

Z dlouhodobého hlediska je třeba uvažovat vývoj cen. Vývoj cen se netýká pouze zdrojů, tedy biomasy a plynu, ale také vyráběného tepla. Za současné situace lze predikovat vývoj cen jen velmi obtížně, neboť stav ekonomiky, výše inflace nebo třeba síla koruny zůstávají po jejím skončení velkou neznámou.

Z výše uvedených důvodů byly výše cen – jak obou typů paliv, tak prodejní cena energie – uvažovány jako konstantní. Hodnoty cenových konstant byly vypočítány na základě dostupných dat [8] [9].

Systém se všemi vstupními prvky a vazbami a závislostmi mezi nimi je vyobrazen na obrázku 1.



Obrázek 1: Vyobrazení systému se vstupy, vazbami a omezeními [vlastní]

2.3 CÍLE ŘEŠENÍ

Hlavním cílem práce je na základě současných technických parametrů teplárny a výše popsaných faktorů sestavit matematický model, a ten následně optimalizovat z hlediska maximalizace zisku uvažované teplárny. Stručně řečeno, cílem práce je predikovat hodnoty poptávky po energii a pokrýt tyto hodnoty výrobou při co nejmenších nákladech s ohledem na omezení systému. Takto optimalizovaný proces by měl dosahovat i potenciálně nejvyššího zisku.

Dílčím cílem práce je na základě poznatků získaných během modelování a optimalizace současného systému, systém rozšířit o tepelný zásobník a zkoumat jeho vliv na funkci systému a dosažené výsledky.

3 ÚVOD DO POUŽITÝCH METOD A NÁSTROJŮ

Od nepaměti lidstvo čelí matematicky modelovaným problémům, které je pak potřeba nějakým způsobem vyřešit. Tyto problémy pokrývají široké spektrum od návrhu optimálního aerodynamického designu, přes alokaci zdrojů až k optimalizaci výrobních procesů. Dnešní trh je založen na střetu nabídky s poptávkou. Konkurenceschopnost tedy hraje na trhu důležitou roli a optimalizace výroby za účelem snížení nákladu, potažmo zvýšení zisku, je neoddělitelnou součástí každého většího podniku.

Cílem této kapitoly je uvést čtenáře do problematiky modelů a metod této diplomové práce a přiblížit základní principy a pojmy optimalizace, matematického modelování a lineárního, celočíselného, nelineárního a stochastického programování.

3.1 POJEM OPTIMALIZACE

Jak bylo popsáno v kapitole 1, cílem této práce je maximalizace zisku dosažitelného výrobou tepla energetickým systémem s ohledem na technické parametry systému, vztahy v systému a omezení, která se s nimi pojí. Jedná se tedy o optimalizační úlohu, jejíž podstatou je výběr řady vzájemně souvisejících proměnných s ohledem na stanovený cíl, který slouží jako ukazatel pro posouzení kvality výsledku optimalizace. Stanoveným cílem, v matematickém jazyce řečeno účelovou funkcí [2], je v tomto případě maximalizace zisku.

Stejně jako u jiných kvantitativních technik, i u získaných výsledků optimalizace platí, že by měly být považovány za přibližné. Na kvalitu řešení má dopad znalost matematického modelování a dobrý úsudek při interpretaci dosažených výsledků. Právě kvůli těmto důvodům by optimalizace měla být vždy považována spíše za nástroj konceptualizace – způsob vymezení konceptů, strategií, scénářů a vztahů – a analýzy než za nástroj poskytující správné a v praxi realizovatelné řešení [10].

Pojem matematický model, proces jeho tvorby, výhody a nevýhody jeho použití a způsob interpretace díky němu získaných výsledků jsou popsány v následujících podkapitolách.

3.2 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ V OPTIMALIZACI

Modelování má v dnešní době široké využití a v nějaké formě figuruje téměř ve všech aplikačních oblastech. Termín model se používá k označení struktury, která je záměrně vytvořena tak, aby reprezentovala vlastnosti jiného zvoleného objektu. Model lze tedy chápat jako zjednodušení reality a míra jeho podrobnosti závisí na aplikační oblasti [2].

Oblast operačního výzkumu nejčastěji pracuje s modely abstraktními. Vlastnosti reálných prvků jsou v abstraktním modelu ve většině případů popsány matematickými vztahy – rovnicemi, nerovnicemi, závislostmi atd. – mezi jednotlivými prvky modelu. Do těchto vztahů vstupují různé proměnné. Vazby mezi těmito proměnnými jsou poté reprezentovány algebraickými výrazy. Výsledný matematický optimalizační model je tedy tvořen účelovou funkcí a množinou omezení, která zahrnují uvedené výrazy. Jeho aplikace na modelovaný reálný problém může pomoci s řešením [5].

Model nemusí být vždy vyřešen, aby se ukázal jako užitečný. Při jeho sestavování se používá systematický přístup, který pomáhá systém rozčlenit na dílčí komponenty, a díky tomu může být i samotná tvorba modelu (viz [4]) nápomocná při:

- Obecném porozumění reálného objektu. Během modelování může dojít k odhalení vztahů mezi prvky, které nebyly na první pohled patrné.
- Návrhu řešení, která by nebyla zřejmá bez matematické reprezentace reálného objektu.
- Experimentování. Provádění experimentů na reálném objektu je nežádoucí. Neznalost dopadů by se mohla ukázat ekonomicky velmi nákladná a experimenty by ve většině případů mohly skončit selháním. Naopak, flexibilní matematický model poskytuje ideální základ pro experimentování, jelikož všechny dopady zůstávají v rovině výpočtů [5].

Matematické modely především zahrnují vztahy s obecnými parametry a jsou tedy do jisté míry nezávislé na konkrétních vstupních datech. Díky tomu může být jeden matematický model použit při řešení různých problémů, aniž by se musel výrazněji měnit. Jinými slovy, matematické modely by měly být škálovatelné, tzn. měly by být schopny vyřešit problém pro široké spektrum dat bez ohledu na jejich rozsah nebo povahu omezení. Není tedy podstatné, zda se data týkají nákladů nebo dostupnosti zdrojů. Důležité je, aby platily modelem popsané matematické vztahy. Radikální kvalitativní změna v datech by se poté do modelu musela promítnout jako změna matematických vztahů [4].

Kvalita výsledku poskytnutého matematickým modelem je závislá na přesnosti a výstižnosti struktury modelu a vstupních dat. Proto je myšlenka, že výsledek matematického modelu lze vždy okamžitě použít v praxi, mylná a matematické modelování by nemělo být chápáno jen jako konkrétní řešení daného problému. Ve skutečnosti se jedná pouze o jeden z nástrojů poskytující podklady k rozhodovacímu procesu. Dosažený výsledek je tedy potřeba podrobit důkladné kontrole a dodatečné analýze. Pokud se po provedení těchto kroků dospěje k závěru, že výsledek

modelu je nepřijatelný, je důležité upřesnit důvody, proč se tak stalo, a pokud možno, zohlednit tyto důvody při úpravě původního modelu. V případě, že se výsledek ukáže jako přijatelný, neměl by být považován za jediné definitivní řešení problému, ale spíš jako jedno z možných řešení. Pozměnění účelové funkce popisující řešený problém může mít totiž za následek jiné řešení. Opakované analyzování dosažených výsledků s následnými změnami modelu nebo účelové funkce vede k vymezení více alternativ řešení, které pomohou k celkovému pochopení problému a poskytnou důležité informace při finálním rozhodnutí jeho řešení [5].

3.3 MATEMATICKÉ PROGRAMOVÁNÍ

Sestavování matematického optimalizačního modelu se dá považovat za matematické programování [2]. Kvůli termínu programování je matematické programování často zaměňováno za počítačové programování. Tato záměna je o to víc umocněna v češtině, kde se slovní spojení počítačové programování téměř nevyskytuje a jako programování se obecně označuje jakýkoli proces, kde se pro řešení problému používají prostředky výpočetní techniky [5].

Matematické a počítačové programování spolu mají hodně společného. Oba procesy zahrnují analýzu problému, jeho pochopení a následnou interpretaci identifikovaných souvislostí. Při matematickém modelování jsou pro interpretaci použity nástroje matematiky, především algebry, a výpočetní technika není vyžadována. V počítačovém programování jsou identifikované souvislosti interpretovány ve zvoleném programovacím jazyce. Ten je poté spuštěn pomocí zjednodušené kompilace a napsané příkazy jsou vykonány hardwarem. Proces tedy nelze vykonat bez výpočetní techniky [11].

Rozmach výpočetní techniky a dnešní doba plná dat, která lze jen obtížně zpracovat bez značného výpočetního výkonu, se zasloužily o to, že v praxi se oba typy programování do značné míry užitečně propojily.

Předmětem této práce je hlavně matematické, potažmo počítačové, programování lineárních a stochastických modelů, proto jsou jim věnovány následující podkapitoly.

3.3.1 Lineární programování

Úlohou lineárního programování je optimalizace, tedy nalezení maxima nebo minima, lineární účelové funkce neznámých ve tvaru lineárních rovnic a nerovnic [10]. Pokud se v účelové funkci objevují výrazy jako například x^2 nebo e^x , linearita funkce je porušena a úloha musí být řešena s využitím metod nelineárního programování [4].

V průběhu posledních let bylo vyvinuto několik vysoce účinných a robustních algoritmů a softwarů, např. GAMS [12], které se v kombinaci s již zmíněným rozmachem výpočetní techniky a vzděláváním odborníků v oblasti matematického modelování a analýzy, zasloužily o to, že lineární programování je důležitým nástrojem pro řešení problémů napříč různými obory. Tato skutečnost je způsobena faktem, že mnoho reálných problémů může být reprezentováno nebo aproximováno lineárním modelem [5]. Je však důležité podotknout, že tenhle výrok neplatí obecně pro všechny problémy a nelineární programování je v praxi neméně důležitým nástrojem [2]. Důvod, proč se v práci lineárnímu programování věnuje více pozornosti než nelineárnímu, je ten, že nástroje lineárního programování jsou použity pro návrh a řešení optimalizačního modelu popsaného v kapitole 4. Nástroje nelineárního programování jsou v práci také použity, a to při odhadech predikcí. Všeobecně také platí, že vyřešení lineárních problémů zabere podstatně méně času a není tak náročné na výpočetní výkon, neboť lineární modely jsou méně komplexní v porovnání s modely nelineárními. Nalezení jejich řešení je tedy podstatně jednodušší [4] [5].

Tvorba lineárního modelu

Jak bylo uvedeno výše, lineární model vyžaduje lineární účelovou funkci a omezení ve formě lineárních rovnic a nerovnic. Je důležité zajistit, že lineární model bude sestavován pouze v situaci, kdy je validní reprezentací řešeného problému nebo je jeho aproximace odůvodněná [2]. Záměrně problém zjednodušovat a snažit se jej upravit takovým způsobem, aby na něj mohly být aplikovány nástroje lineárního programování má za následek, že výsledné řešení má nízkou kvalitu a nulovou výpovědní hodnotou. Použití takového řešení v praxi může mít katastrofální dopady [6].

Přesná podoba účelové funkce a omezení se liší problém od problému. Všechny lineární úlohy lze však převést do následující standardní formy [10]:

$$\begin{aligned}
 &\text{minimalizace } c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\
 &\text{za podmíněk } a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\
 &\qquad\qquad\qquad a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\
 &\qquad\qquad\qquad \cdot \qquad\qquad\qquad \qquad\qquad\qquad \cdot \\
 &\qquad\qquad\qquad \cdot \qquad\qquad\qquad \qquad\qquad\qquad \cdot \\
 &\qquad\qquad\qquad \cdot \qquad\qquad\qquad \qquad\qquad\qquad \cdot \\
 &\qquad\qquad\qquad a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{kde } x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0,$$

kde b_i, c_i a a_{ij} jsou pevně dané konstanty a x_i jsou rozhodovací proměnné [10].

Ve vektorové formě pak standardní zápis vypadá následovně [4]:

$$\begin{aligned} & \text{minimalizace } \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ & \text{za podmínek } \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad \text{a} \quad \mathbf{x} \geq \mathbf{0}. \end{aligned} \tag{2}$$

V tomto zápisu \mathbf{x} a \mathbf{c} představují n -dimenzionální sloupcové vektory, \mathbf{A} matici o velikosti $m \times n$ a \mathbf{b} m -dimenzionální sloupcový vektor. Soustava $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ pro $\mathbf{x} \geq \mathbf{0}$ reprezentuje množinu přípustných řešení [4].

Množina přípustných řešení zahrnuje všechna možná řešení lineární úlohy splňující specifikovaná omezení. Optimálním řešením lineární úlohy je poté takové řešení, které se nachází v množině přípustných řešení a zároveň minimalizuje definovanou účelovou funkci (1) [2]. Jak již bylo zmíněno, v práci je pro řešení lineární úlohy použit software GAMS a řešitel CPLEX implementující simplexovou metodu [12].

3.3.2 Nelineární programování

Stejně jako v případě lineárního programování, i nelineární programování se zabývá problémem nalezení minima nebo maxima účelové funkce ve tvaru rovnic a nerovnic. Rozdíl je v zápisu účelové funkce, která je v tomto případě nelineárního charakteru.

Standardní zápis nelineárního úlohy vypadá následovně [4]:

$$\begin{aligned} & \text{minimalizace } f(\mathbf{x}) \\ & \text{za podmínek } g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \text{ pro } i = 1, \dots, m \\ & h_i(\mathbf{x}) = 0 \text{ pro } i = 1, \dots, l \\ & \mathbf{x} \in X, \end{aligned} \tag{3}$$

kde $f, g_1, \dots, g_m, h_1, \dots, h_l$ jsou funkce z R^n , X je podmnožinou R^n a \mathbf{x} je vektor o složkách x_1, \dots, x_n . Při řešení problému se poté hledají takové hodnoty proměnných x_1, \dots, x_n , které splňují stanovené podmínky a zároveň minimalizují účelovou funkci f . Popis množiny X může zahrnout horní a dolní meze proměnných, které ač vyplývají z ostatních omezení, mohou hrát důležitou roli při použití některých algoritmů. Tato množina může v některých případech reprezentovat i další omezení, kterým je potřeba věnovat speciální pozornost při implementaci problému. Vektor \mathbf{x} , pro který platí, že náleží do množiny X a zároveň splňuje všechna omezení, je považován za přípustné řešení problému. Soubor těchto vektorů poté tvoří množinu přípustných řešení. Úkolem nelineárního

programování je najít přípustný bod $\bar{\mathbf{x}}$ pro který platí $f(\mathbf{x}) \geq f(\bar{\mathbf{x}})$ pro každý přípustný bod \mathbf{x} . Bod splňující tyto podmínky je optimálním řešením účelové funkce a tím i celého problému. Problém může mít více než jedno optimální řešení. Tato řešení se pak označují souhrnně jako alternativní optimální řešení [4] [10]. Při řešení nelineárních optimalizačních úloh pomocí systému GAMS lze využít řešitele MINOS a CONOPT.

3.3.3 Celočíslné programování

Pro výše uvedené lineární programování je charakteristické, že rozhodovací proměnné mohou v optimální řešení nabývat libovolných reálných hodnot. V praxi však může nastat situace, kdy je od některých rozhodovacích proměnných vyžadována celočíselnost. To platí zejména v případech, kdy rozhodovací proměnné nejsou fyzicky dělitelné, například auta nebo pracovníci. Obecná formulace celočíselné úlohy může vypadat následně [2]:

$$\begin{aligned} & \text{minimalizace } f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ & \text{za podmíněk } g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m, \\ & x_j \in M_j \subseteq Z, j \in J, \end{aligned} \tag{4}$$

kde $J \neq \emptyset, J \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$ a Z je množina reálných čísel [2].

V práci je celočíselné programování využito při modelování rozhodovací binární proměnné o využití kotlů na biomasu v kapitole 4.3.4. Při řešení optimalizačních úloh je v práci využit systém GAMS a pro řešení celočíselných úloh se používají řešitelé CPLEX pro lineární úlohy a BARON pro nelineární úlohy.

3.3.4 Alokace zdrojů

Nástroje lineárního a nelineárního programování jsou hojně využívány energetickým průmyslem za účelem řešení problému alokace zdrojů, jehož vyřešení napomáhá ke snížení nákladů a tím potenciálně k maximalizaci zisku.

Obecný zápis lineární úlohy alokace zdrojů je téměř shodný se zápisem (2) a liší se interpretací:

$$\begin{aligned} & \text{maximalizace } \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ & \text{za podmíněk } \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \quad \text{a} \quad \mathbf{x} \geq \mathbf{0}. \end{aligned} \tag{5}$$

Vektor \mathbf{b} v tomto zápisu reprezentuje m zdrojů, sloupec \mathbf{a}_j matice \mathbf{A} činnost j a proměnná x_j hodnotu činnosti j , která se má alokovat. Činnost j o velikosti x_j spotřebuje $\mathbf{a}_j x_j$ dostupných zdrojů. Omezující podmínka má tedy tvar $\mathbf{Ax} = \sum_{j=1}^n \mathbf{a}_j x_j \leq \mathbf{b}$. Za předpokladu, že zisk z činnosti j je c_j , lze celkový zisk spočítat jako $\sum_{j=1}^n c_j x_j = \mathbf{c}^T \mathbf{x}$ (viz [4] [13]).

Řešení problému spočívá ve snaze alokovat zdroje činnostem tak, aby maximalizovaly zisk. Tento deterministický model předpokládá pevnou hodnotu \mathbf{c} . Toto však neplatí v energetickém průmyslu, kde je hodnota kvůli tarifům reprezentována náhodnými proměnnými. Z tohoto důvodu se práce zabývá následujícími modely.

3.3.5 Stochastické programování

Do problematiky alokačních úloh vstupují při práci s reálnými daty parametry založené na určité míře náhodnosti a neurčitosti. Jak již bylo naznačeno v kapitole 2, v optimalizační úloze řešené v této práci je tímto náhodným parametrem poptávka po energii, která je ovlivněna neurčitostmi v podobě venkovní teploty a denní doby. K řešení těchto neurčitostí se používají nástroje stochastického programování.

Stochastické programování se používá při optimalizaci modelů, které pracují s náhodností neboli nejistotou [6]. Zatímco u deterministických problémů jsou hodnoty všech parametrů přesně známy a rozhodnutí probíhá za jistoty, problémy z reálného světa téměř ve všech případech zahrnují parametry, jejichž hodnoty v době rozhodnutí přesně známy nejsou a rozhodnutí probíhá za nejistoty. Cílem stochastického programování je co nejlépe určit hodnoty neznámých proměnných a docílit takového rozhodnutí, jehož kvalita bude srovnatelná s rozhodnutím učiněným za jistoty [14].

Náhodný parametr se v literatuře často označuje řeckým písmenem ξ . Obecný matematický zápis úlohy stochastického programování pak vypadá následovně:

$$\begin{aligned} & \text{maximalizace } f(\mathbf{x}, \xi) \\ & \text{za podmíněk } g_i(\mathbf{x}, \xi) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m, \mathbf{x} \in X, \end{aligned} \tag{6}$$

kde náhodnost proměnných je určena vektorem $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_k)^T$. Rozdělení pravděpodobnosti vektoru ξ je nezávislé na vektorové proměnné \mathbf{x} [6].

Pokud je známa množina hodnot, ve které se neznámý parametr nachází, lze hledat řešení, které je přípustné pro všechny parametry z množiny a zároveň optimalizuje účelovou funkci popisující problém. I když je struktura stochastických modelů podobná, při určování hodnot

neznámých parametrů je vhodné vzít v úvahu rozdělení pravděpodobností těchto parametrů, která jsou buď známá, nebo mohou být odhadnuta. Modely stochastického programování se často používají v oblastech, kde jsou rozhodnutí dělána opakovaně za stejných okolních podmínek s cílem dospět k rozhodnutí, které bude v průměru nejlepší [14].

Výše zmíněná skutečnost se dá dobře aplikovat na alokační problém řešený v této diplomové práci, kde se opakovaně rozhoduje o optimální kombinaci zdrojů, kterou jsou schopny vyrobit poptávanou energii.

Pro řešení stochastických problémů existují dva přístupy.

Wait-and-see přístup

První přístup se nazývá „wait-and-see“, což ve volném překladu znamená „počkej-a-uvideš“. Tato slova dokonale popisují tento přístup, jehož podstatou je učinit rozhodnutí až po realizaci náhodného parametru. Jedná se tedy o deterministický model.

Popsáno matematicky, náhodný jev ξ je realizován a vektorová proměnná x se přizpůsobuje ξ , čímž se z ní stává funkce $x(\xi)$ náhodného vektoru ξ [6].

Here-and-now

Druhý přístup se nazývá „here-and-now“, což ve volném překladu znamená „tady-a-terď“. Znovu se jedná o výstižný popis přístupu, neboť jeho podstatnou je provést rozhodnutí bez ohledu na budoucí realizaci náhodného jevu.

Matematicky to znamená, že pro všechny realizace náhodného vektoru ξ je stejné x , neboť rozhodnutí o x proběhlo před realizací ξ .

Tento přístup je všeobecně více využíván, neboť více odpovídá problémům z reálného světa.

Dvoustupňové stochastické programování

Princip dvoustupňového stochastického programování kombinuje oba výše popsané přístupy.

V první fázi je provedeno rozhodnutí x bez znalosti realizace náhodného jevu ξ . Tomuto rozhodnutí se obecně říká rozhodnutí prvního stupně a je učiněno na základě použití „here-and-now“ přístupu. Výsledek tohoto rozhodnutí je poté ovlivněn náhodným jevem.

Ve druhé fázi je provedeno rozhodnutí druhého stupně, jež kompenzuje negativní dopady, které se mohly vyskytnout v důsledku rozhodnutí prvního stupně. Jedná se tedy o „wait-and-see“ přístup, neboť v době učinění druhého rozhodnutí o \mathbf{x} je známa hodnota náhodného parametru ξ .

Tento model se tedy skládá z jednoho jednostupňového rozhodnutí \mathbf{x} a několik dvoustupňových rozhodnutí \mathbf{y} , z nichž se vybere podle realizovaného náhodného jevu ξ . Rozhodnutí \mathbf{y} je tedy funkcí $\mathbf{y}(\xi)$, protože je závislé na náhodném vektoru ξ [14].

Standardní matematický zápis dvoustupňové stochastické úlohy vypadá následovně [6]:

$$\begin{aligned} & \text{minimalizace } \mathbf{c}^T \mathbf{x} + E_{\xi} Q(\mathbf{x}, \xi) \\ & \text{za podmíněk } \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad \mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \end{aligned} \tag{7}$$

kde $\mathbf{c}^T \mathbf{x}$ je deterministický výraz zahrnující rozhodnutí prvního stupně a E_{ξ} střední hodnota kompenzace (penále) zahrnující rozhodnutí druhého stupně $Q(\mathbf{x}, \xi)$ závislé na \mathbf{x} [14]:

$$\begin{aligned} Q(\mathbf{x}, \xi) &= \min_{\mathbf{y}} \mathbf{q}(\xi)^T \mathbf{y}(\xi) \\ & \text{za podmíněk } \mathbf{T}(\xi) \mathbf{x} + \mathbf{W}(\xi) \mathbf{y}(\xi) = \mathbf{h}(\xi) \quad \mathbf{y}(\xi) \geq \mathbf{0}. \end{aligned} \tag{8}$$

Úlohy lze dále kompenzovat tím, že uvažujeme konečný počet možných realizací ξ . Takto určeným realizacím se říká scénáře a jsou indexovány $s \in S$. Každý z nich může nastat s určitou pravděpodobností p_s . Střední hodnotu kompenzace pak lze zapsat jako [11]:

$$\begin{aligned} E_{\xi}[Q(\mathbf{x}, \xi)] &= \sum_{s=1}^S p_s Q(\mathbf{x}, \xi_s), \\ & \text{kde } \sum_{s=1}^S p_s = 1, p_s \geq 0 \text{ pro } s = 1, \dots, S. \end{aligned} \tag{9}$$

Dvoustupňový model poté lze zapsat jako [11]:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{x}, \mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_S} \mathbf{c}^T \mathbf{x} + \sum_{s=1}^S p_s \mathbf{q}_s^T \mathbf{y}_s, \\ & \text{za podmíněk } \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b}, \\ & \quad \mathbf{T}_s \mathbf{x} + \mathbf{W}_s \mathbf{y}_s = \mathbf{h}_s, \\ & \quad \mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \mathbf{y}_s \geq \mathbf{0}, \\ & \quad s = 1, \dots, S. \end{aligned} \tag{10}$$

3.4 POČÍTAČOVÉ PROGRAMOVÁNÍ

Jak bylo uvedeno v dřívější kapitole, počítačové programování je v dnešní době neodmyslitelnou součástí matematického programování, potažmo matematického modelování. I v této práci je pro tvorbu modelu a jeho řešení použit software, konkrétně speciálně optimalizační modelovací jazyk GAMS, jehož stručný popis a principy jsou uvedeny v následující kapitole.

3.4.1 Modelovací nástroj GAMS

GAMS (General Algebraic Modeling System) je modelovací systém používající programovací jazyk vyšší úrovně pro řešení matematických problémů. Struktura GAMSu byla navržena tak, aby propojila teorii relačních databází a matematického programování [15]. Zatímco teorie relačních databází poskytuje nástroji strukturovaný framework pro organizaci a transformaci dat, teorie matematické programování způsoby, jak popsat matematické problémy spolu s metodami pro jejich řešení. Kombinace těchto dvou vlastností dělá z GAMSu ideální nástroj pro strategické modelování [16].

Důležité je podotknout, že GAMS sám o sobě modely neřeší. K tomu využívá dříve vytvořené algoritmy, které shlukuje v modelové knihovně. GAMS by se tedy dal jednoduše popsat jako rozhraní mezi uživatelem a řešitelem. Celý proces pak funguje tak, že uživatel formuluje pomocí programovacího jazyka problém, zvolí nástroj z knihovny, který chce použít pro jeho řešení a spustí řešitele. GAMS si transformuje zadaná data do požadované struktury, zavolá si z knihovny modelů požadovaný algoritmus, aplikuje jej na formulovaný problém a uživateli podá zprávu o dosažených výsledcích.

Pro modelování využívá GAMS algebraický modelovací jazyk, který umožňuje formulaci matematických modelů pomocí obecných algebraických pojmů, které jsou stručné a čitelné. Pro zápis lze využít množiny, které slouží jako indexy, algebraické výrazy, indexové operace, proměnné atd. (viz **tabulka 4**). Formulace modelu je do značné míry nezávislá na datech a jejich kontextu. Model tedy může být použit v různých oblastech na různá data bez nutnosti úpravy. Zároveň lze model jednoduše rozšířit o další funkcionalitu [12].

Tabulka 4: GAMS – základní elementy [16]

Vstupy	Výstupy
<ul style="list-style-type: none">Sets Deklarace Přiřazení členů	<ul style="list-style-type: none">Echo PrintReferenční mapyVýpis rovnic

<ul style="list-style-type: none"> • Data (Parameters, Tables, Scalars) Deklarace Přiřazení hodnot • Variables Deklarace Přiřazení typu • Přiřazení mezí a/nebo počátečních hodnot (volitelné) • Equations Deklarace Definice • Model a Solve • Display (volitelný) 	<ul style="list-style-type: none"> • Zprávy o stavu • Výsledek
---	--

V následující podkapitolách je na jednoduchém příkladu dodávky tepla vysvětlena syntaxe jednotlivých elementů. Příklad je uveden nejen z důvodu poskytnutí hlubších informací o jednotlivých elementech a jejich vlastnostech, ale zároveň slouží jako demonstrace postupu tvorby matematických modelů v GAMSu, který je později použit v praktické části.

Sets

Množiny, anglicky sets, jsou základním stavebním kamenem GAMSovských modelů a plní stejnou funkci jako indexy při algebraickém zápisu.

```
Sets
D dny /1*7/;
```

Obrázek 2: Deklarace příkazu Sets [vlastní]

Na **obrázku 2** je deklarována množina D s hodnotami $/1*7/$. Tyto hodnoty jsou členové množiny a uvádějí se mezi ($/$). Takto zapsaný výraz představuje všechny hodnoty od 1 do 7. Množina D je statická, neboť všichni její členové jsou pevně zadáni uživatelem a jejich podoba se při spuštění kódu nebude měnit. U množin jsou všichni členové ukládáni jako řetězce. Hodnoty 1 až 7 tedy nejsou interpretovány jako čísla a model by fungoval i v případě, že by dny byly deklarovány pomocí konkrétních jmen.

Slovo `dny` v množině reprezentuje tzv. komentářový text. Přítomnost těchto textů v kódu je nepovinná. Texty nejsou při kompilaci interpretovány, jsou pouze uloženy a následně uvedeny při výpisu výsledků kvůli přehlednosti a snazší interpretaci [16].

Data

Data lze v modelu deklarovat pomocí parametrů a tabulek. Při řešení problému, kterým se zabývá diplomová práce, není deklarace dat v tabulkách potřeba, proto se jimi ani příklad nezabývá a je ukázána pouze deklarace ve formě seznamu.

```
Parameters
  bio(D) naklad na vyrobu jednotky tepla z biomasy
        /1 120, 2 100, 3 110, 4 90, 5 100, 6 100, 7 90/
  plyn(D) naklad na vyrobu jednotky tepla z plynu
        /1 250, 2 300, 3 320, 4 320, 5 320, 6 140, 7 120/
  P(D) poptavka po teple v jednotlivých dnech
       /1 1600, 2 1750, 3 1700, 4 1550, 5 1350, 6 900, 7 750/;
```

Obrázek 3: Deklarace příkazu Parameters [vlastní]

V kódu zobrazeném na **obrázku 3** jsou deklarovány parametry `bio`, `plyn` a `P`. Všechny tři parametry mají index `D`, jsou tedy závislé na dříve deklarované množině. Tato závislost vyjadřuje vztah mezi hodnotami a dny.

Pokud je parametr závislý na množině, GAMS při kompilaci kontroluje, zdali je parametr deklarován pro všechny členy množiny – např. jestli je parametr `bio(D)` deklarován pro hodnoty 1 až 7. Pokud by tomu tak nebylo, během kompilace nastane chyba hlásící, že parametr pro deklarovanou hodnotu neexistuje [16].

Variables

Pomocí proměnných, anglicky `variables`, se v modelu deklarují hodnoty, kterým se později přiřazují výsledky řešení rovnic a nerovnic, nebo hodnoty, které mají být dopočítány řešitelem. Stejně jako u parametrů, i proměnné mohou mít index a být tak závislé na deklarované množině. Každá proměnná také musí mít deklarovaný typ.

Na **obrázku 4** jsou deklarovány dva typy proměnných.

```
variables
  nb naklady na biomasu
  np naklady na plyn
  f celkové naklady;

Positive variables
  x(D) vyrabene mnozství spalovanim biomasy
  y(D) vyrabene mnozství spalovanim plynu;
```

Obrázek 4: Deklarace příkazu Variables [vlastní]

Proměnné `nb`, `np` a `f` jsou deklarovány jako volné, mohou tedy nabývat hodnot z intervalu $(-\infty, +\infty)$. Tyto proměnné nemají index, nejsou tedy závislé na množině a figurují pouze jako skalární veličiny. Každý optimalizační model musí mít minimálně jednu skalární proměnnou, které je v pozdější fázi modelování přiřazena hodnota účelové funkce. Tato rovnice je poté předmětem optimalizace řešitelem [16].

Další dvě proměnné, x a y , jsou deklarovány jako nezáporné, mohou tedy nabývat pouze hodnot z intervalu $(0, +\infty)$. Tyto dvě proměnné reprezentují vyráběné množství energie, a to kotlem na biomasu a zemní plyn. Řešením simplexové úlohy řešitel pracuje s modelem a hledá optimální řešení zadané účelové funkce.

Jak již bylo zmíněno, každá deklarovaná proměnná musí mít přiřazený typ. Všechny podporované typy proměnných jsou uvedeny v **tabulce 5**.

Tabulka 5: Typy proměnných [16]

Typ proměnné	Povolený rozsah proměnné
Volné (výchozí)	$-\infty$ až $+\infty$
Nezáporné	0 až $+\infty$
Kladné	$-\infty$ až 0
Binární	bud' 0 nebo 1
Čeločíselné	0, 1, ..., 100 (výchozí hodnota)

Equations

Síla GAMSu se nejvíce ukazuje při deklaraci rovnic a nerovnic a spočívá v tom, že pokud má skupina rovnic nebo nerovnic stejnou algebraickou strukturu, všechna omezení v této skupině jsou vytvořena současně, nikoli jednotlivě [16].

Zápis rovnic probíhá ve dvou fázích. V první fázi je potřeba rovnice deklarovat. Deklarace se provádí stejně jako u ostatních elementů pomocí jména. Deklaraci rovnic lze vidět na **obrázku 5**.

```

Equations
nakl_bio      naklady na vyrobenou teplenou energii z biomasy
nakl_plyn     naklady na vyrobenou teplenou energii z plyny
nakl_celk     celkové naklady na vyrobenou energii
omez_1(D)    omezení
omez_2       omezení;

```

Obrázek 5: Deklarace omezení (equations) [vlastní]

Ve druhé fázi se definuje podoba rovnic a nerovnic. Jak již bylo uvedeno v dřívějších kapitolách, matematické modely jsou tvořeny hlavě vztahy, které jsou popsány rovnicemi a nerovnicemi, proto je jejich definice tím nejsložitějším krokem při tvorbě matematického modelu. Pro definici rovnice lze použít tři různé operátory:

=E= - rovná se,

=L= - levá strana je menší než pravá,

=G= levá strana je větší než pravá.

```
nakl_bio..          nb =E= sum(D, x(D)*bio(D));
nakl_plyn..         np =E= sum(D, y(D)*plyn(D));
nakl_celk..         f  =E= nb + np;

omez_1(D)..         P(D) =E= x(D) + y(D);
omez_2..           sum(D, y(D)) =G= sum(D, P(D)) * 40/100;
                   x.UP(D)    = 1200;
```

Obrázek 6: Definice omezení (equations) [vlastní]

Rozdíl mezi symboly = a =E= je ten, že zatímco = reprezentuje přiřazovací příkaz, který ukládá požadovanou hodnotu před spuštěním řešitele, =E= se používá výhradě při definici rovnic pro vyjádření vztahu, který se bere v úvahu až po spuštění řešitele [15].

První dvě rovnice, `nakl_bio` a `nakl_plyn`, slouží pro výpočet nákladů na výrobu tepla biomasou, respektive zemním plynem. Rovnice `nakl_celk` poté reprezentuje celkové náklady na výrobu tepelné energie z obou zdrojů a v modelu tato rovnice představuje účelovou funkci, která je předmětem optimalizace. Na **obrázku 6** lze vidět, že všechny tyto rovnice a nerovnice mají na levé straně jednu ze skalárních proměnných definovaných v předešlých krocích.

Kromě rovnic a nerovnic vyjadřujících vztahy v systému je potřeba definovat i rovnice a nerovnice vyjadřující systémová omezení. Prvním omezením je rovnice `omez_1`, která zaručuje, že vyrobené množství se bude rovnat poptávanému. Toto omezení je indexováno podle množiny D , protože model musí být optimalizovaný tak, aby proměnná $P(D)$ byla splněna pro každý člen množiny D . Jinými slovy, v modelu musí být zaručeno, aby poptávka po energii byla splněna každý den, nejen celkově za týden.

Nerovnice `omez_2` omezuje model tím, že na celkové produkci tepla se musí minimálně ze 40 % podílet zemní plyn. V realitě toto omezení může představovat například smluvené kvóty s dodavatelem zemního plynu, které se musí vyčerpat, nebo hrozí penále.

Poslední omezení stanovuje horní hranici proměnné x simulující maximální možnou výrobní kapacitu kotle na biomasu.

Všechna definovaná omezení jsou navržena pouze za účelem příkladu a nesouvisí se skutečným stavem.

Model a Solve

Modelem se v GAMSu rozumí soubor dříve definovaných rovnic a nerovnic. Stejně jako u ostatních elementů, i model musí být deklarovaný se jménem. Jelikož je model souborem definovaných omezení, dále je nutné deklarovat, jaké z definovaných rovnic a nerovnic jsou součástí modelu. V případě, že má model obsahovat všechny dříve definované rovnice a nerovnice, stačí jej deklarovat s parametrem `/all/`. Zázpis modelu lze vidět na **obrázku 7**.

```
model prikklad /all/;  
nebo  
model prikklad /nakl_bio, nakl_plyn, nakl_celk, omez_1, omez_2/;
```

Obrázek 7: Deklarace modelu [vlastní]

Jakmile je model deklarovaný, lze spustit řešitele pomocí elementu `solve`. Kromě jména modelu je u elementu `solve` nutno specifikovat, jakou proměnnou z modelu má minimalizovat nebo maximalizovat a jakou metodu matematického programování k tomu využít.

V tomto příkladu se minimalizuje (`minimizing`) účelová funkce `f` s využitím (`using`) lineárního programování `LP`.

```
solve prikklad minimizing f using LP;
```

Obrázek 8: Deklarace řešitele (`solveru`) [vlastní]

Display

Spuštěním řešitele se provede několik operací. V první řadě se vygeneruje instance deklarovaného modelu a z něj se vytvoří vhodná datová struktura, která zadaný problém interpretuje řešiteli. Následně se spustí řešitel, jehož výstupy se zaznamenají do textového souboru. Optimální řešení dané úlohy lze poté buď dohledat v daném textovém souboru s příponou `.lst` nebo si jej lze nechat vypsat přímo do požadovaného místa souboru `.lst`. K tomu je však potřeba deklarovat příkaz `Display` [15].

```
display nb.L, np.L, f.L, x.L, y.L;
```

Obrázek 9: Deklarace zobrazení výsledků (`Display`) [vlastní]

Výstupy

Po spuštění modelu jsou výsledky uvedeny v textovém souboru s příponou `.lst`. V něm je uveden jak celý zázpis matematického modelu, tak průběh jeho kompilace. Uživatel se tak může podívat na průběh generování definovaných omezení a případně identifikovat chyby, kdyby v zápisu udělal chybu. Pokud byl v modelu deklarován i příkaz `Display`, poslední řádky textového

souboru obsahují údaje o jednotlivých proměnných, který byly při deklaraci příkazu uvedené jako jeho parametry.

Výslednou optimalizaci řešeného příkladu lze vidět na **obrázku 10**, kde jsou uvedeny jak výsledky omezení, tak hodnoty nezáporných proměnných x a y ve všech členech množiny D . Všechny zobrazené elementy jsou také doplněny popisujícím textem.

```
General Algebraic Modeling System
Execution

----      47 VARIABLE nb.L          = 595200.000  naklady na biomasu
           VARIABLE np.L          = 861000.000  naklady na plyn
           VARIABLE f.L           = 1456200.000  celkove naklady

----      47 VARIABLE x.L  vyrabene mnozstvi spalovanim biomasy
1  960.000,    2 1200.000,    3 1200.000,    4 1200.000,    5 1200.000

----      47 VARIABLE y.L  vyrabene mnozstvi spalovanim plynu
1  640.000,    2 550.000,    3 500.000,    4 350.000,    5 150.000,    6 900.000
7  750.000
```

Obrázek 10: Výsledky optimalizace [vlastní]

4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

Tato kapitola je věnována vlastnímu řešení výše specifikovaného optimalizačního problému.

Základní myšlenkou celé optimalizace je alokovat dostupné výrobní zdroje s ohledem na poptávané množství. V jádru jde tedy o rozhodovací problém, kde se rozhoduje o využití zdrojů v daném čase tak, aby došlo k pokrytí poptávky a zároveň se minimalizovaly náklady, tedy potenciálně se zvýšil zisk. Jak již bylo naznačeno, celý problém lze rozdělit do čtyř hlavních částí.

Za prvé bylo potřeba nalézt způsob, s jehož využitím bude možné efektivně, na základě více či méně známých hodnot proměnných, predikovat výši energie, kterou musí energetický systém v daném časovém úseku přibližně vyrobit.

Jelikož výše potřebné energie, poptávky, je závislá na venkovní teplotě, druhým krokem bylo najít způsob jakým predikovat denní vývoj teplot.

Po dokončení prvních dvou kroků se mohlo přistoupit k návrhu modelu, který využije výše popsané způsoby predikce. Na jejich základě zohlední pravděpodobné výše poptávek a alokuje energetickému systému dostupné zdroje s ohledem na pokrytí poptávky za co nejvyšší možných dosažitelných zisků.

V posledním čtvrtém kroku bylo nutné navržený model upravit tak, aby vyhovoval technickým parametrům dostupných zdrojů použitých pro výrobu energie a snižoval přidružená rizika.

Důležité je podotknout, že s ohledem na zvyklosti v aplikační oblasti řešené v diplomové práci bylo zvoleno vícepísmenné označení parametrů a proměnných. Na místech, kde by to mohlo být matoucí je uveden symbol násobení z důvodu vyhnutí se nejednoznačnosti v chápání, zda posloupnost písmen představuje jeden parametr nebo je součinem více parametrů. Dále by mělo být zmíněno, že kvůli kompatibilitě dat generovaných pro GAMS jsou ve všech číslech a výpočtech uváděny desetinné tečky namísto desetinných čárek.

4.1 PREDIKCE VÝŠE POTŘEBNÉ ENERGIE

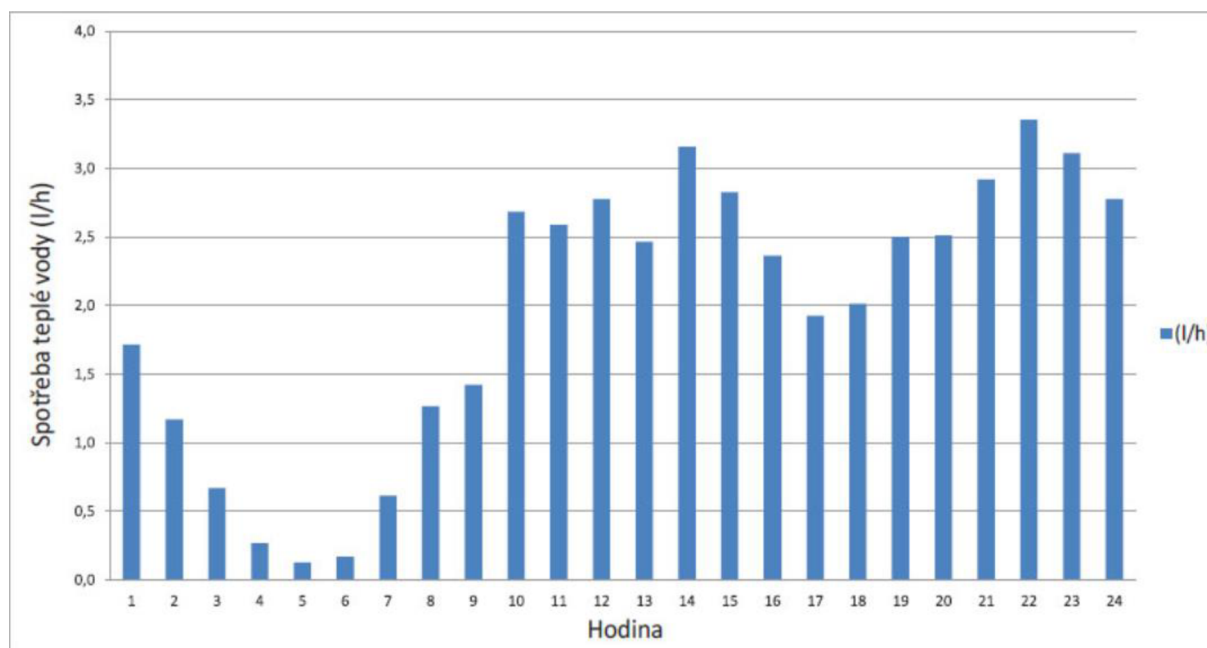
Vhledem k povaze systému, posloupnosti několika navzájem se ovlivňujících rozhodnutí v kombinaci s náběhovými časy úspornějších kotlů, nelze dílčí rozhodnutí provést až ve chvíli, kdy je přesně známa hodnota spotřeby, neboť je potřeba zohlednit jak minulé, tak budoucí hodnoty, kterými byl, potažmo má být, systém přizpůsoben. Nelze tedy využít čistě „wait-and-see“ přístup.

Naopak, rozhodnutí je potřeba učinit v době, kdy ještě nejsou přesně známy hodnoty poptávek v dílčích časech a nastavit systém takovým způsobem, aby predikované hodnoty pokrýval co do nejvyšší možné míry úspornějšími neregulovatelnými zdroji, přístup „here-and-now“, a zbytek regulovatelným zdrojem.

Nejdeálnějším případem je kombinace obou zmíněných přístupů, kdy predikované hodnoty jsou s předstihem co nejeekonomičtěji pokryty levnějšími zdroji, „here-and-know“, a rozdíly mezi predikovanými a reálnými hodnotami jsou poté přesně v daném čase vyvažovány nákladnějším regulovatelným zdrojem, „wait-and-see“.

4.1.1 Vytvoření dat pro simulační výpočty

Celková výše poptávané energie je v tomto modelu závislá na dvou dílčích hodnotách – energii potřebné k ohřevu teplé vody a energii potřebné k vytápění. Jelikož dostupná reálná data [14] byla málo detailní a neposkytovala všechny potřebné hodnoty, k odhalení závislostí a určení



predikcí bylo nutné vygenerovat data, která se opírají o nedostatečně podrobná data a kombinují je s odhady.

Graf 1: Denní vývoj spotřeby teplé vody v litrech na osobu [17]

Ohřev vody

Energie potřebná pro ohřev vody je v tomto modelu závislá čistě na denní době. Pro výpočet byly použity hodnoty průměrné hodinové spotřeby uvedené v litrech na osobu.

Jelikož model pracuje s půlhodinovými intervaly, kvůli náběhové křivce kotlů, hodinové hodnoty byly vyděleny dvěma, tzn. hodnoty o půl a v celou se rovnají, čímž se zaručí, že součet těchto hodnot odpovídá původním hodinovým hodnotám.

Pro výpočet energie P_t byla použita rovnice [18]:

$$P_t = (4.2 \cdot L \cdot T) / 3600, \quad (11)$$

kde L je počet litrů vody, které je potřeba ohřát a T je rozdíl mezi vstupní a výstupní teplotou ve stupních Celsia – podle technických parametrů kotlů uvedených v **tabulkách 1 a 2** má voda na vstupu 70 °C a na výstupu 105 °C, T se tedy rovná 35. Jelikož spotřeba L se liší v závislosti na dni v týdnu, původní průměrné hodnoty byly použity pro vygenerování hodnot v rozmezí +/- 20 % od původní průměrné hodnoty.

Dostupná data uváděla pouze spotřebu na jednu osobu. Rovnice byla rozšířena o další dva parametry:

$$P_t = (4.2 \cdot (L \cdot O \cdot D) \cdot T) / 3600, \quad (12)$$

kde O je průměrný počet osob na domácnost, 2.3 [19], a D je počet domácností, kterým se voda dodává. Tento parametr byl pro účely modelu odhadnut na 5000.

Vytápění

Energie potřebná pro vytápění je v tomto modelu závislá pouze na venkovní teplotě. Data, která byla použita pro výpočet, byla naměřena meteostanicí v brněnských Tuřanech [20]– kvůli formátu dat byla pro účely modelu vybrána pouze pondělí 1. a 3. týdne každého měsíce v letech 2017, 2018 a 2019, což dává dohromady 72 dní. Pro každý den byly teploty brány od 00:00 do 24:00 hodin v půlhodinových intervalech. Celkem byl každý den popsán 49 teplotními hodnotami.

Ze získaných teplot byla data pro simulační výpočty vygenerována následovně:

$$P_t = S_t \text{ pro } x_t \leq 6,$$

$$P_t = 0 \text{ pro } x_t \geq 13, \quad (13)$$

$$P_t = (1 - \text{norm}(x_t)) \cdot S \text{ pro } 6 \leq x_t \leq 13,$$

kde P_t je výše poptávky v čase t , x_t je teplota v čase t a S horní hranice. První z výše uvedených rovnic popisuje situaci, kdy pro teploty pod 6 °C topí všichni, kotle tedy fungují nepřetržitě a poptávka se rovná horní hranici S , která byla stanovena na 1900 kWh. Tato rovnice simuluje

převážně zimní měsíce. Druhá rovnice popisuje situaci, kdy pro teploty nad 13 °C [21] netopí nikdo, respektive voda na vytápění není dodávána. Tím se simulují převážně letní měsíce. Třetí rovnice popisuje situace pro měsíce s velmi proměnlivými teplotami, převážně jaro a podzim. Výše poptávky v těchto měsících závisí na venkovní teplotě, která je v rovnici zohledněna normalizovanou hodnotou $\text{norm}(x_t)$ spočítanou pomocí vzorce:

$$\text{norm}(x_t) = \frac{x_t - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (14)$$

kde x_t je hodnota teploty v čase t , x_{\min} je 6 °C a x_{\max} 13 °C. Roznásobením inverzní normalizované hodnoty s horní hranicí S se zaručí, že se zvyšující se teplotou x_t se poptávka P_t přibližuje k 0, naopak se snižující se teplotou x_t se poptávka P_t přibližuje k S .

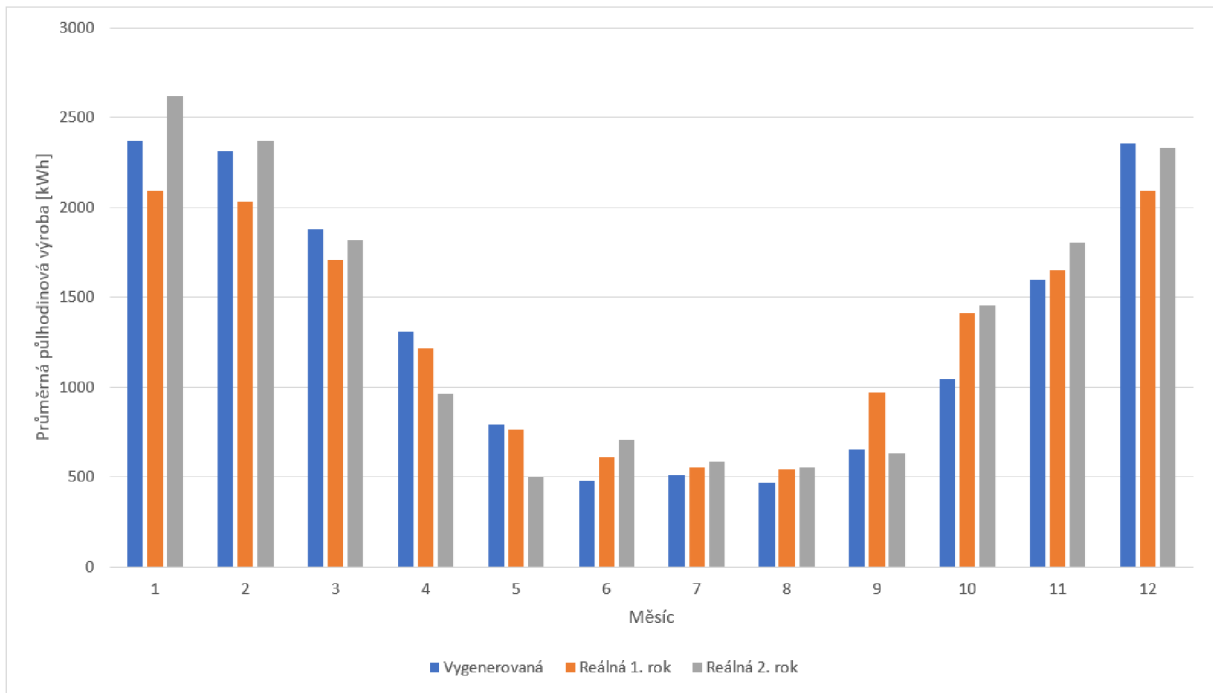
Výše predikované poptávky – potřebné množství energie k výrobě tepla – je výsledkem součtu energie potřebné na ohřev vody a vytápění a je do jisté míry závislá na obou proměnných – denní době a venkovní teplotě.

Je důležité zmínit, že rozptyl generovaných hodnot L a parametr D u ohřevu, stejně jako parametry x_{\min} , x_{\max} , a S u vytápění, byly určeny tak, aby se sumy vygenerovaných dat blížily skutečným měsíčním hodnotám dostupných z agregovaných dat, která vycházela z více zdrojů a sloužila jako inspirace k otestování použitých metod [8].

Tabulka 6: Srovnání průměrných půlhodinových poptávek v jednotlivých měsících

Měsíc	Výše průměrné půlhodinové poptávky		
	Vygenerovaná	Reálná 1. rok	Reálná 2. rok
Leden	2369.482993	2095.917709	2622.034365
Únor	2316.493197	2033.125364	2371.126531
Březen	1878.010204	1704.253193	1815.844898
Duben	1305.438776	1218.647755	964.1714286
Květen	790.4591837	758.8886109	497.2123766
Červen	477.9557823	607.2093878	707.0273469
Červenec	513.0170068	553.1217907	585.9163924
Srpen	470.4489796	543.3468071	555.2733377
Září	653.6836735	973.2865306	634.655102
Říjen	1042.091837	1413.918762	1457.757077
Listopad	1596.72449	1648.518776	1806.591837
Prosinec	2357.608844	2094.071494	2334.62133

Vyobrazení výše uvedených dat v histogramu je uvedeno v **grafu 2**.



Graf 2: Porovnání simulovaných dat s dostupnými daty [vlastní]

4.1.2 Logistická regrese

Pro získání vstupních scénářových dat optimalizačního modelu bylo potřeba popsat matematicky vztah mezi venkovní teplotou a výší poptávky. Vzhledem k povaze vygenerovaných dat byly pro odhalení závislosti použity nástroje logistické regrese. Cílem bylo najít rovnici, která nejlépe popisuje průběh dat a bude moci být později použita v matematickém modelu pro predikci závislé proměnné, v tomto případě poptávky po energii, na základě nezávislé proměnné, v tomto případě venkovní teploty. Kvůli povaze dat bylo nutné všechny funkce transformovat.

Otestováno bylo celkem 8 rovnic pro modelování logistické regrese. Na **grafu 3** lze vidět vykreslení křivky nejlépe vystihující charakter simulovaných dat.

Arkus tangens

$$f(x) = k \cdot \arctan(a \cdot x + b) + q, \quad (15)$$

kde k , a , b a q jsou reálné regresní koeficienty charakterizující posunutí a modifikaci funkce arctan.

Richardsova model

Richardsův model je modifikací Verhulstova modelu a používá se při predikci růstu.

$$f(x) = \frac{A}{(1 + e^{b-cx})^{1/d}}, \quad (16)$$

kde A je hranice horní asymptoty, b koeficient rychlosti růstu a d odchylka od standardní logistické křivky [22].

Gompertzův základní 3 parametrový model

Variace Gompertzova modelu se ve většině případů používají při predikci růstu. Základní rovnice se třemi parametry vypadá následně:

$$f(x) = A \cdot \exp(-\exp(-k_G(x - X_i))), \quad (17)$$

kde $f(x)$ je predikovaná hodnota, A hranice horní asymptoty, k_G růstový koeficient určující sklon a X_i inflexní bod, který posouvá růstovou křivku po horizontální ose bez změny tvaru [23].

Gompertzův 4 parametrový model

Rozšířený 4 parametrový model obsahuje oproti základnímu modelu navíc parametr B , který představuje hranici spodní asymptoty [23].

$$f(x) = B + A \cdot \exp(-\exp(-k_G(x - X_i))). \quad (18)$$

Gompertzův „stlačený“ 4 parametrový model

Tato modifikace zajišťuje posun dolní hranice asymptoty B bez změny hranice horní asymptoty A [23].

$$f(x) = B + (A - B) \cdot \exp(-\exp(-k_G(x - X_i))). \quad (19)$$

Zwieteringův model

Zwieteringův model je prakticky jenom modifikací Gompertzova modelu.

$$f(x) = A \cdot \exp(-\exp\left(\frac{e \cdot K_Z}{A} (X_{Lag} - x)\right)), \quad (20)$$

kde K_Z představuje absolutní růst, tedy tangens ke křivce v čase X_{Lag} . X_{Lag} znázorňuje časovou prodlevu mezi přechody. Hodnota X_{Lag} se objevuje vždy v 6.6 % horní asymptoty. To znamená, že modifikuje i jiné hodnoty než inflexní bod, jako tomu je u parametru X_i v předcházejících rovnicích. Výhodou Zwieteringových modifikací je, že růstový koeficient K_Z představuje absolutní rychlost růstu v inflexním bodě a parametr A tento koeficient neovlivňuje [23].

Hill funkce

Hill funkce je obdoba sigmoidové logistické funkce s upravenými parametry [24]. Tato funkce byla jako jediná počítána s normalizovanými hodnotami teplot x , aby se vyvarovalo chybě při dělení 0.

$$f(x) = \frac{a \cdot x^b}{x^b + e^b}, \quad (21)$$

kde a a b jsou reálné regresní koeficienty charakterizující posunutí a modifikaci Hill funkce.

Logistická funkce

Základní logistická funkce

$$f(x) = \frac{A}{1 + e^{-k(x-x_0)}}, \quad (22)$$

kde A je horní hranice asymptoty, k je logistický růstový koeficient udávající sklon křivky a x_0 je hodnota středního bodu křivky.

Pro určení hodnot koeficientů všech rovnic byl použit Microsoft Excel, respektive nástroj řešitel v nastavení na nelineární optimalizaci. Pro všechny rovnice byla zvolena jako účelová funkce směrodatná odchylka, která se minimalizovala zvolenou metodou min v řešiteli nastavováním hodnot koeficientů v iteracích algoritmu, čímž se zaručilo optimální řešení.

$$\min \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - f(x_i))^2}{n}}, \quad (23)$$

kde x_i jsou hodnoty teplot a y_i jsou simulované hodnoty poptávky. Řešená úloha v (23) je ekvivalentní minimalizaci součtu čtverců odchylek. Rovnice (23) se minimalizovala vzhledem k neznámým parametrům, které jsou pro každé model jiné, proto je uveden pouze všeobecný zápis.

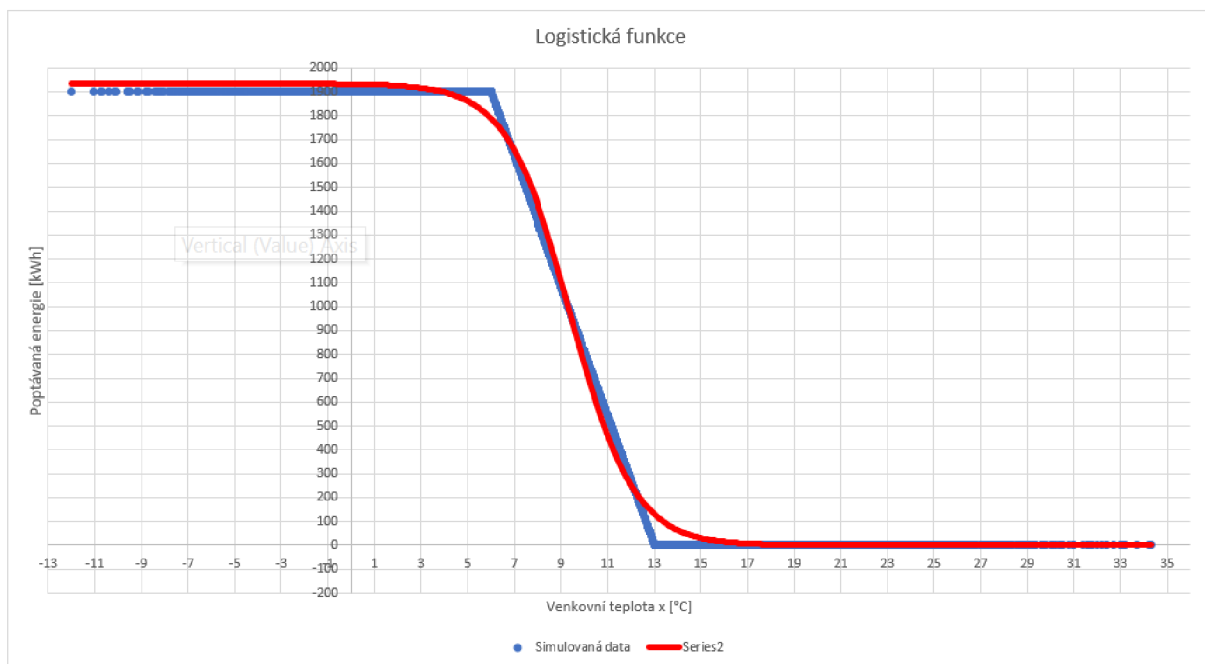
Získané hodnot koeficientů výše uvedených modelů a směrodatných odchylek jsou uvedeny v **tabulce 7**, respektive **tabulce 8**. Na základě nejmenší odchylky a křivky dobře vystihující simulovaná data byla pro optimalizaci zvolena logistická funkce.

Tabulka 7: Koeficienty testovaných vztahů

Arkus tangens		Richardsova rovnice		Gompertzův model		4p Gomp. model 1	
a	-0.5953	A	1884.7245	A	1946.0906	A	1946.0902
b	5.6259	b	-7.0981	k _G	-0.4897	B	-0.0009
k	715.0129	c	-0.7079	X _i	10.3744	k _G	-0.4897
q	954.8978	d	0.7834			X _i	10.3744
4p Gomp. model 2		Zwietringův model		Hill funkce		Logistická funkce	
A	1946.0905	A	1946.08952	a	1933.0292	L	1933.8820
B	-0.00005	KZ	-350.6197	b	-15.9611	k	-0.7356
k _G	-0.4897	X _{Lag}	12.4162	c	-0.4613	x ₀	9.4154
X _i	10.3744						

Tabulka 8: Průměrné odchylky testovaných vztahů

Arkus tangens	34.37057453
Richardsova rovnice	29.47428969
Gompertzův model	30.50964805
4p Gompertzův model	30.50676294
4p stlačený Gompertzův model	30.50693904
Zwietringův model	30.50694823
Hill funkce	30.30060773
Logistická funkce	27.96003459



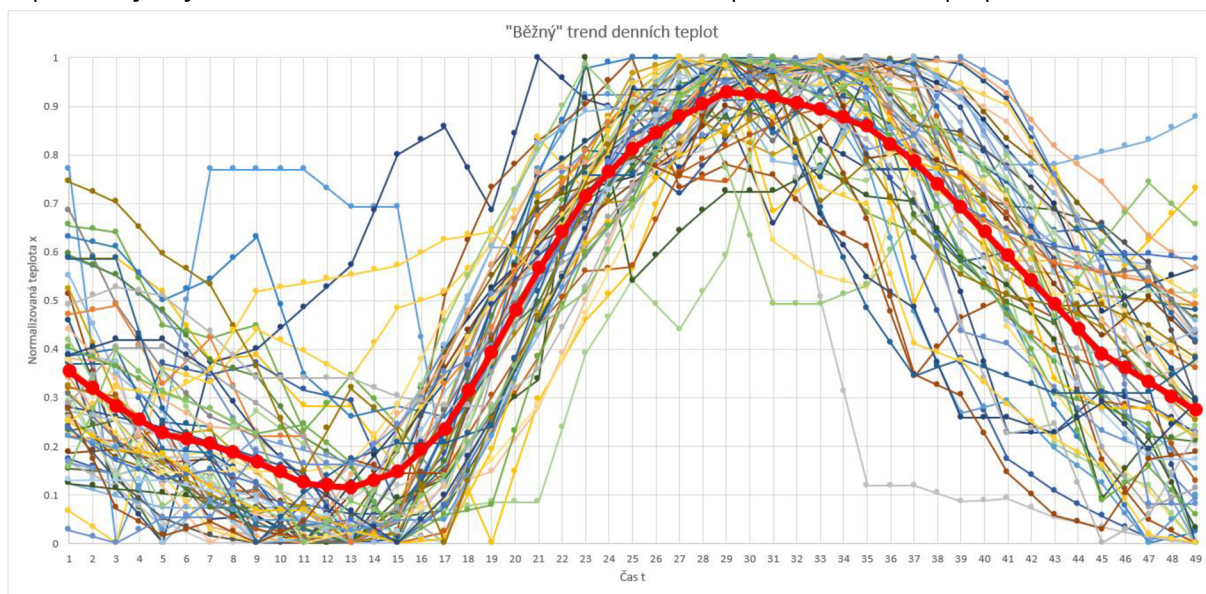
Graf 3: Logistická křivka závislosti poptávané energie na venkovní teplotě [vlastní]

4.2 PREDIKCE DENNÍHO VÝVOJE TEPLOT

V dalším kroku bylo třeba najít způsob, jakým namodelovat denní vývoj teplot x v jednotlivých časech t , který bude v kombinaci s výše popsáním logistickým modelem použit pro výpočet predikovaných hodnot poptávek. Za tímto účelem byla opět použita data naměřena meteostanicí v brněnských Tuřanech [20]. Teploty v každém dni byly normalizovány do intervalu $<0;1>$ pomocí rovnice (14) kde x_t je hodnota teploty v čase t , x_{\min} a x_{\max} minimální, respektive maximální, teplota v daném dni.

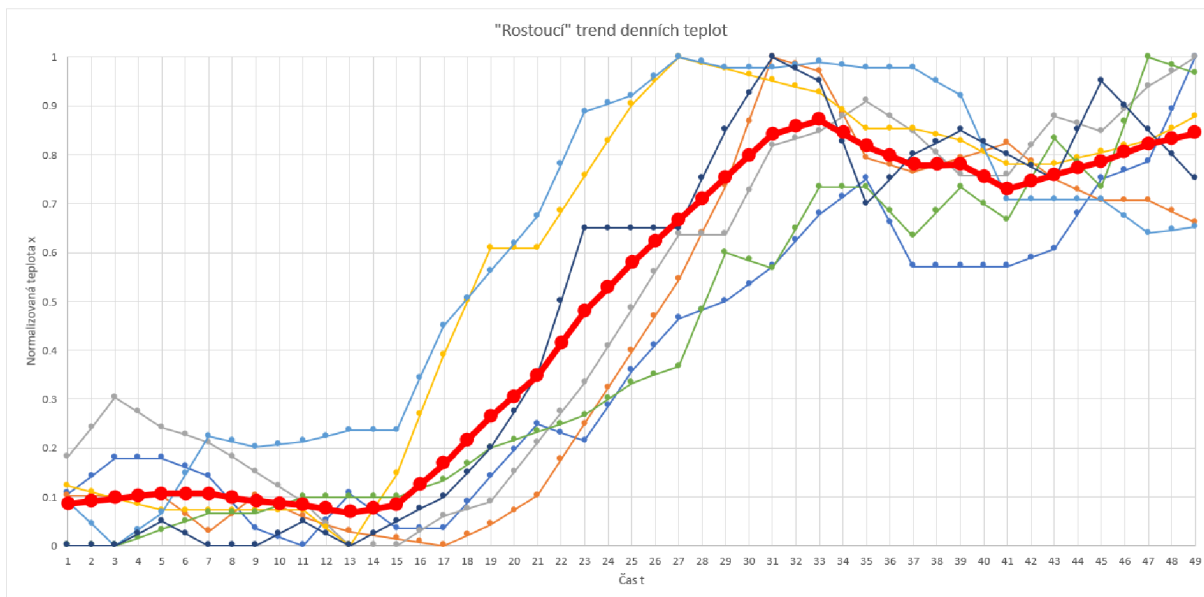
Na základě vykreslení denního vývoje normalizovaných teplot byly zjištěny 3 trendy – operativně nazvány jako běžný, rostoucí a klesající.

Běžný trend se objevil u 58 ze 72 dnů, tedy téměř v 90 % dní. Proto byl tento trend pojmenovaný jako „běžný“, neboť představuje běžný denní vývoj teplot bez vlivů, jakými mohou být například srážky. Pro běžný trend je charakteristický „sinusový“ průběh, kde se minimální teplota objevuje v ranních hodinách, zatímco maximální teplota v hodinách po poledni.



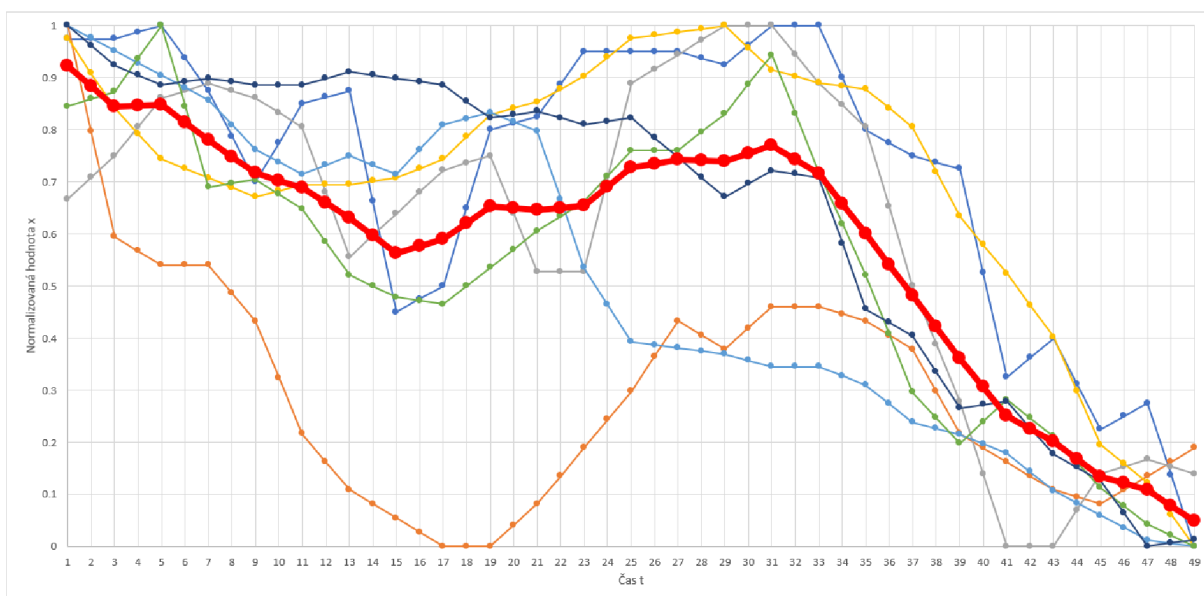
Graf 4: Běžný trend denních teplot [vlastní]

Rostoucí trend se objevil u 7 ze 72 dnů, pravděpodobnost výskytu zaokrouhleně 10 %. Tento trend dosahuje minim a maxim zhruba ve stejných časech jako trend běžný. Na rozdíl od běžného trendu však neklesá ve večerních hodinách a zachovává si rostoucí tendenci, odtud jeho pojmenování.



Graf 6: Rostoucí trend denních teplot [vlastní]

Klesající trend se, stejně jako rostoucí, objevuje v 7 ze 72 dní. Pravděpodobnost výskytu tedy opět zaokrouhleně 10 %. Tento trend se vyznačuje tím, že maximálních hodnot dosahuje v ranních časech a minimálních ve večerních časech, má tedy během celého dne klesající tendenci, proto byl označen jako „klesající“.



Graf 5: Klesající trend denních teplot [vlastní]

Červená křivka ve všech 3 výše uvedených grafech znázorňuje průměrné hodnoty normalizovaných teplot, jež byly použity pro modelování denního vývoje teplot s určitou pravděpodobností výskytu v kapitole 4.3.3.

4.3 NÁVRH MODELU

Tato podkapitola se bude věnovat matematickému programování nejen výše popsaných vztahů v GAMSu. Poté bude navázáno deklarací účelové funkce a dalších potřebných omezení pro výpočet modelu řízení provozu kotlů.

4.3.1 Generátor spotřeby teplé vody

V první fázi je nutné do modelu implementovat generátor poptávky po teplé vodě, jejíž hodnota bude v pozdější fázi modelu použita pro výpočet hodnoty energie potřebné pro ohřev. Rozsah generovaných hodnot v čase t je závislý na deklarovaném parametru v (viz obrázek 11). Pro výpočet celkové hodnoty poptávky po vodě Ve_t^s , v GAMSu $ve(t,s)$, jsou dále použity parametry o , průměrný počet osob v domácnosti, a d , počet domácností, jejichž hodnoty jsou

```
Sets
t          uvazovane casy          / 1 * 49 /,
r          hranice pro generatory / d, h /;

Parameter
v(t,r)    rozsah spotreby vody na osobu v case t /
  1.d 1.12, 1.h 1.12, 2.d 0.68, 2.h 0.68,
  3.d 0.68, 3.h 0.68, 4.d 0.48, 4.h 0.48,
  5.d 0.48, 5.h 0.48, 6.d 0.28, 6.h 0.28,
  7.d 0.28, 7.h 0.28, 8.d 0.12, 8.h 0.12,
  9.d 0.12, 9.h 0.12, 10.d 0.04, 10.h 0.04,
  11.d 0.04, 11.h 0.04, 12.d 0.08, 12.h 0.08,
  13.d 0.08, 13.h 0.08, 14.d 0.24, 14.h 0.24,
  15.d 0.24, 15.h 0.24, 16.d 0.52, 16.h 0.52,
  17.d 0.52, 17.h 0.52, 18.d 0.56, 18.h 0.56,
  19.d 0.56, 19.h 0.56, 20.d 1.064, 20.h 1.064,
  21.d 1.06, 21.h 1.06, 22.d 1.024, 22.h 1.024,
  23.d 1.02, 23.h 1.02, 24.d 1.08, 24.h 1.08,
  25.d 1.08, 25.h 1.08, 26.d 0.984, 26.h 0.984,
  27.d 0.98, 27.h 0.98, 28.d 1.28, 28.h 1.28,
  29.d 1.28, 29.h 1.28, 30.d 1.104, 30.h 1.104,
  31.d 1.1, 31.h 1.1, 32.d 0.96, 32.h 0.96,
  33.d 0.96, 33.h 0.96, 34.d 0.76, 34.h 0.76,
  35.d 0.76, 35.h 0.76, 36.d 0.8, 36.h 0.8,
  37.d 0.8, 37.h 0.8, 38.d 1, 38.h 1,
  39.d 1, 39.h 1, 40.d 1.008, 40.h 1.008,
  41.d 1.008, 41.h 1.008, 42.d 1.16, 42.h 1.16,
  43.d 1.16, 43.h 1.16, 44.d 1.344, 44.h 1.344,
  45.d 1.34, 45.h 1.34, 46.d 1.264, 46.h 1.264,
  47.d 1.26, 47.h 1.26, 48.d 1.12, 48.h 1.12,
  49.d 1.12, 49.h 1.12/,

// Parametry pro vypocet poptavky po teple vode
o          prumerny pocet obyvatel v domacnosti / 2.3 /,
d          pocet domacnosti / 5000 /,
Td         teplotni rozdil ohrivane vody / 35 /,
ve(t,s)    mnozstvi poptavane teple vody v case t scenari s;

// Generator poptavky po teple vode v case t scenari s
ve(t,s) = uniform(v(t,'d'),v(t,'h'))*o*d;
```

Obrázek 11: Parametry a výpočet hodnoty poptávky po teplé vodě [vlastní]

vysvětleny v kapitole 4.1.1.

4.3.2 Generátor teplot

V druhé fázi je nutné do modelu implementovat generátor venkovních teplot, z nichž se bude v pozdější fázi modelu počítat výše energie potřebné pro pokrytí poptávky po vytápění. Parametry $\min(m, r)$ a $\max(m, r)$ uvádějí rozsah teplot, mezi kterými se generuje výsledná minimální a maximální denní teplota ve specifikovaném měsíci. Deklarované hranice teplot jsou pro oba parametry vzaty z původních naměřených dat [20], kde pro každý měsíc byl použit rozsah minimálních a maximálních teplot napříč všemi třemi roky, a jsou v pozdější fázi modelu důležité při výpočtu energie potřebné pro vytápění, která je závislá na venkovní teplotě.

Jak lze vidět na **obrázku 12**, měsíc, pro který se generují minimální a maximální denní teploty je potřeba zadat manuálně. V tomto konkrétním případě byl zvolen 5. měsíc, tedy květen. Minimální denní teplota, uložena v parametru `min_tp` se bude generovat v rozsahu 4.6 až 12.8 °C, maximální denní teplota, uložena v parametru `max_tp`, pak v rozsahu 11.4 až 23.2 °C.

```
Parameter
min(m,r) rozsah minimalnich teplot v mesici m /
1.d -12.0, 1.h -1.3, 2.d -8.8, 2.h -0.4,
3.d -7.0, 3.h 6.4, 4.d -0.2, 4.h 13.9,
5.d 4.6, 5.h 12.8, 6.d 11.5, 6.h 17.9,
7.d 7.9, 7.h 19.1, 8.d 11.7, 8.h 20.3,
9.d 4.8, 9.h 16.6, 10.d 1.1, 10.h 11.9,
11.d -0.3, 11.h 9.3, 12.d -4.3, 12.h 1.6/,

max(m,r) rozsah maximalnich teplot v mesici m /
1.d -4.0, 1.h 2.7, 2.d 1.1, 2.h 10.9,
3.d -2.9, 3.h 16.5, 4.d 8.8, 4.h 20.0,
5.d 11.4, 5.h 23.2, 6.d 23.7, 6.h 28.7,
7.d 21.4, 7.h 34.3, 8.d 21.6, 8.h 33.2,
9.d 17.1, 9.h 25.8, 10.d 10.8, 10.h 21.0,
11.d 2.6, 11.h 16.2, 12.d -0.5, 12.h 7.4/,

// Parametry pro ulozeni generovanych teplot
min_tp minimalni denni teplota;
max_tp maximalni denni teplota;

// generator minimalnich a maximalnich teplot v mesici m
min_tp = uniform(min('5','d'),min('5','h'));
max_tp = uniform(max('5','d'),max('5','h'));
```

Obrázek 12: Parametry pro vygenerování minimální a maximální denní teploty [vlastní]

4.3.3 Implementace predikce denního vývoje teplot

Jakmile jsou vygenerovány hodnoty minimální a maximální denní teploty, lze vypočítat hodnoty teplot Tp_t^s , v GAMSu $Tp(t, s)$, ve všech časech množiny t . Pro tento výpočet je použit parametr k_t^s , v GAMSu $k(t, s)$, jehož hodnoty vychází z křivek průměrných normalizovaných teplot trendů, jejichž postup identifikace je uveden v kapitole 4.2. Tento parametr je závislý na čase t a scénáři s . Časových intervalů v množině t je 49, což odpovídá počtu denních měřených teplot realizovaných po půl hodině. V množině s jsou poté deklarovány 3 hodnoty, každá odpovídající

jednomu ze tří identifikovaných teplotních vývojových trendů. Konkrétní hodnoty parametru k_t^s jsou uvedeny na obrázku 13.

Parameter								
k(t, s)	prumerne nominalni teploty v case t			scenari s/				
1.1	0.354674309,	1.2	0.086248725,	1.3	0.923192406,			
2.1	0.318634411,	2.2	0.091846069,	2.3	0.883791134,			
3.1	0.282594514,	3.2	0.097443412,	3.3	0.844389862,			
4.1	0.25424421,	4.2	0.102140038,	4.3	0.846222927,			
5.1	0.225893907,	5.2	0.106836663,	5.3	0.848055992,			
6.1	0.214925707,	6.2	0.106914519,	6.3	0.813868309,			
7.1	0.203957507,	7.2	0.106992374,	7.3	0.779680626,			
8.1	0.185810702,	8.2	0.098657273,	8.3	0.748160407,			
9.1	0.167663897,	9.2	0.090322172,	9.3	0.716640188,			
10.1	0.145636411,	10.2	0.087045836,	10.3	0.702258859,			
11.1	0.123608925,	11.2	0.0837695,	11.3	0.68787753,			
12.1	0.118744572,	12.2	0.075635441,	12.3	0.659389107,			
13.1	0.113880219,	13.2	0.067501383,	13.3	0.630900683,			
14.1	0.130192748,	14.2	0.075373312,	14.3	0.597032709,			
15.1	0.146505277,	15.2	0.083245241,	15.3	0.563164735,			
16.1	0.190840978,	16.2	0.125146605,	16.3	0.576333307,			
17.1	0.235176678,	17.2	0.167047969,	17.3	0.589501879,			
18.1	0.312723195,	18.2	0.21562668,	18.3	0.621222204,			
19.1	0.390269711,	19.2	0.26420539,	19.3	0.652942529,			
20.1	0.47794189,	20.2	0.305839061,	20.3	0.649772213,			
21.1	0.565614069,	21.2	0.347472732,	21.3	0.646601898,			
22.1	0.64002258,	22.2	0.413595203,	22.3	0.650245141,			
23.1	0.714431091,	23.2	0.479717675,	23.3	0.653888384,			
24.1	0.762820866,	24.2	0.52887104,	24.3	0.690372855,			
25.1	0.811210641,	25.2	0.578024405,	25.3	0.726857325,			
26.1	0.844439643,	26.2	0.62197175,	26.3	0.735073874,			
27.1	0.877668644,	27.2	0.665919095,	27.3	0.743290423,			
28.1	0.903662235,	28.2	0.709730662,	28.3	0.741237925,			
29.1	0.929655826,	29.2	0.753542229,	29.3	0.739185427,			
30.1	0.923823275,	30.2	0.797130018,	30.3	0.754200761,			
31.1	0.917990723,	31.2	0.840717808,	31.3	0.769216094,			
32.1	0.90562569,	32.2	0.855828273,	32.3	0.742536687,			
33.1	0.893260658,	33.2	0.870938737,	33.3	0.715857281,			
34.1	0.875587882,	34.2	0.843878548,	34.3	0.658098893,			
35.1	0.857915107,	35.2	0.816818359,	35.3	0.600340506,			
36.1	0.822153244,	36.2	0.797633413,	36.3	0.541040939,			
37.1	0.786391381,	37.2	0.778448466,	37.3	0.481741372,			
38.1	0.739045953,	38.2	0.779015084,	38.3	0.421615824,			
39.1	0.691700526,	39.2	0.779581702,	39.3	0.361490276,			
40.1	0.641371997,	40.2	0.754616093,	40.3	0.305766209,			
41.1	0.591043468,	41.2	0.729650483,	41.3	0.250042141,			
42.1	0.541011028,	42.2	0.743940745,	42.3	0.225461984,			
43.1	0.490978588,	43.2	0.758231006,	43.3	0.200881826,			
44.1	0.440488378,	44.2	0.772004342,	44.3	0.167503346,			
45.1	0.389998167,	45.2	0.785777679,	45.3	0.134124867,			
46.1	0.361089001,	46.2	0.803653719,	46.3	0.120841812,			
47.1	0.332179834,	47.2	0.821529758,	47.3	0.107558758,			
48.1	0.302628665,	48.2	0.832776704,	48.3	0.078117686,			
49.1	0.273077495,	49.2	0.844023649,	49.3	0.048676615/,			

Obrázek 13: Parametr $k(t,s)$ pro výpočet vývoje denních teplot [vlastní]

Teplota v čase t je poté počítána jako inverze normalizace:

$$x_t = \text{norm}(x_t) \cdot (x_{\max} - x_{\min}) + x_{\min}, \quad (24)$$

v modelu převedeno na:

$$Tp_t^s = k_t^s \cdot (\max_tp - \min_tp) + \min_tp, \quad (25)$$

kde Tp_t^s je výše predikované teploty v čase t scénáři s , k_t^s je výše specifikovaný normalizační koeficient (viz **obrázek 13**) a \min_tp a \max_tp jsou vygenerované hodnoty minimální a maximální denní teploty (viz **obrázek 12**).

Jakmile je známa hodnota teploty Tp_t^s , lze podle vztahu zjištěného v podkapitole 4.1.2 vypočítat predikovanou výši celkové poptávky po energii Pt_t^s :

$$Pt_t^s = \frac{A}{(1 + e^{-Kg(Tp_t^s - T_0)})} + (4.2 \cdot Ve_t^s \cdot T_d)/3600. \quad (26)$$

Deklarace parametrů nutných pro výpočet výše popsaných hodnot v GAMSU je uvedena na **obrázku 14**. Výsledná hodnota poptávky Pt_t^s , v GAMSu $Pt(t, s)$, je zaokrouhlena na celé kWh. Deklarace nebo výpočet parametrů Ve_t^s a T_d byla uvedena dříve na **obrázku 11**.

Parameter

```
// Parametry pro vypočet poptávky po vytapení
A      horní asymptota           / 1933.88202706417 /,
e      konstantní Eulerovo číslo / 2.71828182845905 /,
Kg     logisticky rustový koeficient / -0.735635517649199 /,
T0     sigmoiduv střední bod      / 9.41541981244695 /,
Tp(t,s) venkovní teplota v case t scenari s,
Pt(t,s) celková poptávka Pt po teple v case t scenari s,
Vr(s)  celkova vyrobena energie beze ztrat ve scenari s;

// vypočet denní teploty v case t scenari s
Tp(t,s) = round(k(t,s) * (max_tp - min_tp) + min_tp,1);

// vypočet celkové poptávky po energii v case t
// První část rovnice počítá poptávku po energii potřebnou k vytapení.
// Druhá část rovnice počítá poptávku po energii potřebnou k ohřevu vody.
Pt(t,s) = A/(1+e**(-Kg*(Tp(t,s)-T0))) + (4.2*Ve(t,s)*Td)/3600;
Pt(t,s) = round(Pt(t,s),0);
```

Obrázek 14: Deklarace parametrů pro výpočet celkové predikované poptávky [vlastní]

4.3.4 Optimalizace – matematický model

Jak již bylo několikrát zmíněno, cílem této práce je maximalizovat zisk s ohledem na technické parametry systému. Účelová funkce modelu vypadá následně:

$$\max \sum_s \left(p_{st}^s \sum_t \left(\frac{Pt_t^s}{277.78} \cdot gjp - \sum_i x_{it}^s \cdot cap_i \cdot bc - \sum_j y_{jt}^s \cdot pc \right) \right). \quad (27)$$

Optimální hodnota účelové funkce (27) je hledána za podmínek:

- omezení poptávky:

$$\sum_i x_{it}^s \cdot cap_i + \sum_j yP_{jt}^s - yZ_t^s = P_t^s \text{ pro } t = 1, \quad s = 1, \dots, S, \quad (28)$$

$$f_{t-1}^s yZ_{t-1}^s + \sum_i x_{it}^s \cdot cap_i + \sum_j yP_{jt}^s - yZ_t^s = P_t^s \text{ pro } t > 1, \dots, T, \quad s = 1, \dots, S,$$

- omezení kapacit:

$$x_{it}^s \in \{0, 1\} \text{ pro } i = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T, \quad s = 1, \dots, S,$$

$$yP_{jt}^s \leq 9600 \text{ pro } j = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, T, \quad s = 1, \dots, S,$$

(29)

$$yZ_t^s \leq 2000 \text{ pro } t = 1, \dots, T, \quad s = 1, \dots, S,$$

$$yP_{jt}^s, yZ_t^s \geq 0,$$

- neanticipativního omezení:

$$\sum_{ss} pst^{s0} \cdot x_{it}^{s0} = x_{it}^s, \text{ pro } i = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T, \quad s = 1, \dots, S, \quad (30)$$

- omezení počtu sepnutí:

$$\Delta xp_{it}^s - \Delta xm_{it}^s = x_{it}^s - x_{it-1}^s \text{ pro } i = 1, \dots, m, \quad t > 2, \dots, T, \quad s = 1, \dots, S, \quad (31)$$

$$\sum_t \Delta xp_{it}^s + \Delta xm_{it}^s \leq \text{radomint}(3,5) \text{ pro } i = 1, \dots, m, \quad s = 1, \dots, S. \quad (32)$$

Popis výše uvedených proměnných a parametrů:

pst^s ...Pravděpodobnost scénáře s .

Pt_t^s ...Poptávka po energie v čase t scénáři s .

gjp ...Výnos za prodej jedné kWh.

x_{it}^s ...Binární proměnná indikující, jestli je kotel typu i sepnutý v čase t scénáři s .

cap_i ...Kapacita kotle typu i .

bc ...Náklad na jednu kWh vyrobenou z biomasy.

yP_{jt}^s ...Množství energie vyráběné kotlem typu j v čase t scénáři s .

gc ...Náklad na jednu kWh vyrobenou zemním plynem.

yZ_t^s ...Množství energie uskladněné v tepelném zásobníku v čase t scénáři s .

P_t^s ...Množství poptávané energie v čase t scénáři s .

f_t^s ...Koeficient chladnutí tepelného zásobníku v čase t scénáři s .

Δxp_{it}^s ...Proměnná plusové změny kotle typu i v čase t scénáři s .

Δxm_{it}^s ...Proměnná minusové změny kotle typu i v čase t scénáři s .

Následující odstavce jsou věnovány dovysvětlení významu omezení modelu a některých ve výpočtech použitých parametrů.

Omezení poptávky

Deklarovat samotnou účelovou funkci pro provedení optimalizace nestačí, neboť bez omezení by GAMS vyhodnotil, že nejvýnosnější variantou je vyrábět nekonečné množství energie. Vyrobená energie však musí být spotřebována. Z tohoto důvodu je nutné přidat omezení, které zaručí, že součet množství vyráběné energie všemi 3 zdroji se rovná poptávanému predikovanému množství (viz **obrázek 15** – zakomentovaná část kódu obsahuje upravené omezení pro model rozšířený o tepelný zásobník).

```
//$ontext
omez1(t,s)$ (ord(t) EQ 1)..
    sum(i,x(i,t,s)*cap(i)) + sum(j,yP(j,t,s)) =E= Pt(t,s);
omez(t,s)$ (ord(t) GT 1)..
    sum(i,cap(i)*x(i,t,s)) + sum(j,yP(j,t,s)) =E= Pt(t,s);
//$offtext
$ontext
omez(t,s)$ (ord(t) GT 1)..
    f(t-1,s)*yZ(t-1,s) + sum(i,cap(i)*x(i,t,s)) + sum(j,yP(j,t,s)) - yZ(t,s)
    =E= Pt(t,s);
omez1(t,s)$ (ord(t) EQ 1)..
    sum(i,x(i,t,s)*cap(i)) + sum(j,yP(j,t,s)) - yZ(t,s) =E= Pt(t,s);
$offtext
```

Obrázek 15: Deklarace omezení poptávky [vlastní]

Omezení kapacit

Omezení technických parametrů ve formě kapacit jsou zobrazena na **obrázku 16**. Jelikož rozhodnutí o využití kotlů typu i je binárního charakteru, kapacita byla modelována parametrem cap_i , v GAMSU $cap(i)$. V porovnání s kapacitami v **tabulkách 1, 2 a 3** jsou hodnoty omezení kapacit v modelu poloviční, neboť model pracuje s půlhodinovými intervaly.

Binary variables

```
x(i,t,s) vyuziti kotle typu i v case t pro scenar s;
```

Positive variables

```
yP(j,t,s) vyuziti kotle typu j v case t pro scenar s,  
yZ(t,s) zasobnik se ztrátou f,  
deltaxp(i,t,s) citac plus zmen,  
deltaxm(i,t,s) citac minus zmen;
```

```
deltaxp.L(i,t,s) = 0;  
deltaxm.L(i,t,s) = 0;
```

Parameter

```
// Parametry kapacit kotlu  
cap(i) maximalni kapacita kotle typu i / Bio1 550, Bio2 750 /;  
  
// horni mez pro vyuziti jednoho kotle  
x.UP(i,t,s) = 1;  
// maximalni kapacitu kotle typu j  
yP.UP(j,t,s) = 9600;  
// maximalni kapacita zasobniku yz  
yZ.UP(t,s) = 2000;  
// omezeni zasobniku yz v case t = 49  
yZ.L('49',s) = 0;
```

Obrázek 16: Deklarace omezení kapacit a rozhodovacích proměnných [vlastní]

Neanticipativní omezení

Pro modelování náběhu a chladnutí kotlů typu i a jejich nemožnosti regulace, je k celé optimalizační úloze přístupováno jako ke dvojstupňovému modelu stochastického programování. V prvním stupni je na základě predikovaných hodnot poptávek učiněno rozhodnutí o sepnutí kotlů typu i , které je v matematickém modelu modelováno binární proměnnou x_{it}^s , v GAMSU $x(i,t,s)$. Z tohoto důvodu je tato proměnná omezena shora jedničkou (viz **obrázek 16**). Toto rozhodnutí je shodné pro všechny 3 scénáře s , což je zaručeno neanticipativním omezením (viz **obrázek 17**). Pokud je predikováno, že v čase t má být kotel typu i sepnutý, respektive vypnutý, a pracovat na plný výkon cap_i , v GAMSU $cap(i)$, nebo nulový výkon, je nutné jej zapnout nebo vypnout v čase $t-1$ – model pracuje s půlhodinovými časovými intervaly, což odpovídá přibližným dobám náběhu a chladnutí – čímž se zaručí, že v čase t bude kotel typu i vyrábět požadované množství energie. V druhém stupni je poté učiněno rozhodnutí „wait-and-see“ o využití kotlů typu j , v modelu proměnná y_{jt}^s , v GAMSU $yP(j,t,s)$, pomocí kterých se dorovná rozdíl mezi predikovanou a skutečnou hodnotou poptávky Pt_t^s , v GAMSU $Pt(t,s)$, v čase t scénáři s .

```
HNWS(i,t,s)..  
sum(ss, pst(ss) * x(i,t,ss)) =E= x(i,t,s);
```

Obrázek 17: Deklarace neanticipativního omezení [vlastní]

Omezení počtu sepnutí

V neposlední řadě je jedním z cílů optimalizace snížit opotřebovávání kotlů a tím i přidruženého rizika poruchy. Pro každý kotel typu i je zaznamenáván počet plusových Δxp_{it}^s , v GAMSu `deltalxp(i,t,s)`, a minusových Δxm_{it}^s , v GAMSu `deltaxm(i,t,s)`, změn, tedy přechodů z vypnutého do sepnutého stavu a naopak. Počet těchto změn nesmí překročit náhodně vygenerovanou hodnotu z expertně stanoveného intervalu <3;5>.

```
delta(i,t,s)$ (ord(t) GT 1)..  
    deltaxp(i,t,s)-deltaxm(i,t,s) =E= x(i,t,s)-x(i,t-1,s);  
pocetzmen(i,s)..  
    sum(t, deltaxp(i,t,s) + deltaxm(i,t,s) ) =L= zmeny(i);
```

Obrázek 18: Deklarace omezení počtu sepnutí [vlastní]

Parametr gjp

Hodnota parametru *gjp* (Gigajoule Profit) vychází z informací o vývoji prodejní ceny tepla v Brně. Pro řešení byla použita cena z roku 2019, která činí 552 Kč bez DPH/GJ [19].

```
Parameter  
    gjp          zisk z jednoho GJ vyrobene energie      / 552 /;
```

Obrázek 19: Deklarace parametru *gjp* [vlastní]

Parametr bc

Pro stanovení hodnoty parametru *bc* (Biomass Cost) bylo třeba spočítat spotřebu dřevní štěpky. Z množství vyrobené energie lze spočítat množství spotřebovaného paliva následovně [8]:

$$m = \frac{Q \cdot 100}{\eta \cdot Q_i^r}, \quad (33)$$

kde m [t] je spotřeba dřevní štěpky, Q [J] množství vyrobeného tepla, η účinnost kotle a Q_i^r [J/t] výhřevnost dřevní štěpky. Při účinnosti 85 % a výhřevnosti 10 GJ/t bylo po převedení vypočítáno, že na výrobu jedné kWh je potřeba cca 0.000543 t dřevní štěpky. Tato hodnota je použita u výpočtu (33). Pro výpočet ceny dřevní štěpky byl použit následující vztah [8]:

$$C_t = \frac{C_m}{m_{ST}}, \quad (34)$$

kde C_t [Kč/t] je cena štěpky, C_m [Kč/m³] je cena štěpky za prostorový metr sypaný a m_{ST} je měrná hmotnost štěpky. Po dosazení [8]:

$$C_t = \frac{450}{0.379} = 1188 \text{ Kč/t.} \quad (35)$$

Přepočteno na kWh:

$$bc = 1.188 \cdot 0.000543 = 0.65 \text{ Kč/kWh.} \quad (36)$$

Parameter
bc jednotkova cena za kwh vyrobenou biomasou / 0.65 /;

Obrázek 20: Deklarace parametru bc [vlastní]

Parametr gc

Hodnota parametru gc (Gas Cost) byla vypočítána následně:

$$gc = \frac{1}{Q \cdot \eta} C_p, \quad (37)$$

kde Q [kW] je energie, kterou lze vyrobit z jednoho m^3 zemního plynu, η účinnost kotle na zemní plyn a C_p [Kč/ m^3] cena za jeden m^3 zemního plynu. Po dosazení:

$$gc = \frac{1}{11 \cdot 0.85} 13 = 1.4 \text{ Kč/kWh.} \quad (38)$$

Parameter
gc jednotkova cena za kwh vyrobenou plynem / 1.40 /;

Obrázek 21: Deklarace parametru gc [vlastní]

Při porovnání hodnot obou parametrů lze vidět, že náklady na výrobu energie ze zemního plynu jsou více než dvojnásobné v porovnání s náklady potřebné na výrobu z biomasy. V praxi to znamená, že predikované hodnoty se model bude snažit pokrýt v první řadě výrobou z kotlů na biomasu, neboť se jedná o levnější variantu.

Zestručněnou implementaci modelu v GAMSu lze vidět na **obrázcích 22, 23 a 24**. Kompletní implementace modelu včetně dat je poté v **příloze č. 1**. Na **obrázku 25** je ukázán stručný výpis výsledků, jehož celá verze je v **příloze č. 2**.

```

set i          typ kotle na biomasu,
    j          typ kotle na plyn,
    t          uvazovane casy,
    s          uvazovane scenare,
    m          mesice,
    r          hranice pro generatory,
    l          pocet simulaci;
alias(s,ss);

Parameter
v(t,r) rozsah spotreby vody na osobu v case t,
o      prumerny pocet obyvatel v domacnosti,
d      pocet domacnosti,
Td     teplotni rozdil ohrivane vody,
Ve(t,s) mnozstvi poptavane teple vody v case t scenari s;

ve(t,s) = uniform(v(t,r),v(t,r))*o*d;

Parameter
min(m,r) rozsah minimalnich teplot v mesici m,
max(m,r) rozsah maximalnich teplot v mesici m,
min_tp   minimalni denni teplota,
max_tp   maximalni denni teplota;

min_tp = uniform(min(m,r),min(m,r));
max_tp = uniform(max(m,r),max(m,r));

Parameter
k(t,s) prumerne nominalni teploty v case t scenari s,
A      horni asymptota,
e      konstantni Eulerovo cislo,
Kg     logisticky rustovy koeficient,
T0     stredni bod funkce,
Tp(t,s) venkovni teplota v case t scenari s,
Pt(t,s) celkova poptavka Pt po teple v case t scenari s,
vr(s)  celkova vyrobena energie beze ztrat ve scenari s;

Tp(t,s) = round(k(t,s) * (max_tp - min_tp) + min_tp,1);
Pt(t,s) = A/(1+e**(-Kg*(Tp(t,s)-T0))) + (4.2*ve(t,s)*Td)/3600;
Pt(t,s) = round(Pt(t,s),0);

Parameter
cap(i) maximalni kapacita kotle typu i,
bc     jednotkova cena za kwh vyrobenou biomasou,
pc     jednotkova cena za kwh vyrobenou plynem,
gjp    zisk z jednoho GJ vyrobene energie,
pst(s) pravdepodobnost scenare,|
zmeny(i),
f(t,s) nahodne generovana ztrata tepelneho zasobniku,
poztrate(t,s) energie na skladu po odedcteni ztraty,
pohyb(t,s) energie vzana ze zasobniku po poryti poptavky Pt case t scenari s
prubeh(i,t,s) mnozstvi vyrobene kotlem typu i v case t scenari s,
spinac(i,t) ukazatel here-and-now rozhodnuti kotle typu i v case t;

zmeny(i) = uniform(2,5);
zmeny(i) = round(zmeny(i),0);
f(t,s) = uniform(0.85, 0.95);
f(t,s) = round(f(t,s),2);

```

Obrázek 22: Deklarace parametrů a množin [vlastní]

Equations

bio_cost(s) naklady na vyrobu z biomasy ve scenari s,
zpl_cost(s) naklady na vyrobu ze zemniho plynu ve scenari s,
scn_cost(s) celkove naklady ve scenari s;

bio_cost(s)..
bic(s) =E= pst(s) * (sum(t,(x(i,t,s)*cap(i)
+ x(i,t,s)*cap(i)))) * bc;

zpl_cost(s)..
plc(s) =E= pst(s) * sum(t,yP(j,t,s)) * gc;

scn_cost(s).. snc(s) =E= bic(s) + plc(s);

Equations

scn_revenue(s) celkove primy za scenar s ;

scn_revenue(s).. snr(s) =E= pst(s) * sum(t,Pt(t,s))/277.78*gjp;

Equations

total_cost celkove naklady za vsechny scenare,
total_revenue celkove prijmy za vsechny scenare;

total_cost.. tc =E= sum(s, snc(s));
total_revenue.. tr =E= sum(s, snr(s));

Equations

profit ucelova funkce predmetem maximalizacet;

profit.. z =E= tr - tc;

Equations

omez(t,s) omezeni pro splneni poptavky v case t pro scenar s,
omez1(t,s) omezeni pro splneni poptavky v case 1 pro scenar s,
HNWS(i,t,s) neanticipativni omezeni v case t pro scenare s,
delta(i,t,s) pomocne omezeni,
pocetzmen(i,s) omezeni poctu zmen;

Obrázek 24: Deklarace a definice rovnic [vlastní]

Equations

omez(t,s) omezeni pro splneni poptavky v case t pro scenar s,
omez1(t,s) omezeni pro splneni poptavky v case 1 pro scenar s,
HNWS(i,t,s) neanticipativni omezeni v case t pro scenare s,
delta(i,t,s) pomocne omezeni,
pocetzmen(i,s) omezeni poctu zmen;

//\$ontext

omez1(t,s)\$(ord(t) EQ 1)..
sum(i,x(i,t,s)*cap(i)) + sum(j,yP(j,t,s)) =E= Pt(t,s);

omez(t,s)\$(ord(t) GT 1)..
sum(i,cap(i)*x(i,t,s)) + sum(j,yP(j,t,s)) =E= Pt(t,s);

//\$offtext

\$ontext

omez(t,s)\$(ord(t) GT 1)..
f(t-1,s)*yZ(t-1,s) + sum(i,cap(i)*x(i,t,s)) + sum(j,yP(j,t,s)) - yZ(t,s)
=E= Pt(t,s);

omez1(t,s)\$(ord(t) EQ 1)..
sum(i,x(i,t,s)*cap(i)) + sum(j,yP(j,t,s)) - yZ(t,s) =E= Pt(t,s);

\$offtext

HNWS(i,t,s)..
sum(ss, pst(ss) * x(i,t,ss)) =E= x(i,t,s);

delta(i,t,s)\$(ord(t) GT 1)..
deltaxp(i,t,s)-deltaxm(i,t,s) =E= x(i,t,s)-x(i,t-1,s);

pocetzmen(i,s)..
sum(t, deltaxp(i,t,s) + deltaxm(i,t,s)) =L= zmeny(i);

Obrázek 23: Definice a deklarace omezení [vlastní]

Výsledky

=====

Celociselné řešení

Naklady = 69200.17
 Vynosy = 149438.63
 Zisk = 80238.45

Minimalni denni teplota = 3.23

Maximalni denni teplota = 13.31

t	symbol pst(s)	naklad	kapacita	Prepinani	1 0.80	2 0.10	3 0.10
	scn(s)				56341.63	6950.05	5908.50
	scr(s)				121715.82	14633.62	13089.18
	Pt(s)				76563.00	73640.00	65868.00
	Vr(s)				77144.31	76482.47	69042.84
1	Ve(t,s)				12880.00	12880.00	12880.00
	Tp(t,s)				6.80	4.10	12.50
	Pt(t,s)				2213.00	2422.00	707.00
					<=	<=	<=
	omez.L				0.00	0.00	0.00
	f(t,s)				0.00	0.00	0.00
Po	ztrate				0.00	0.00	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		913.00	1122.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	593.00
	Na sklade				0.00	0.00	593.00
2	Ve(t,s)				7820.00	7820.00	7820.00
	Tp(t,s)				6.40	4.20	12.10
	Pt(t,s)				2063.00	2212.00	555.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2063.00	2212.00	555.00
	f(t,s)				0.86	0.87	0.89
Po	ztrate				0.00	0.00	527.77
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		763.00	912.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	745.00
	Na sklade				0.00	0.00	1272.77
23	Ve(t,s)				11730.00	11730.00	11730.00
	Tp(t,s)				10.40	8.10	9.80
	Pt(t,s)				1110.00	1880.00	1310.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1110.00	1880.00	1310.00
	f(t,s)				0.94	0.94	0.85
Po	ztrate				0.00	0.00	688.02
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	580.00	0.00
	Pohyb				190.00	0.00	-10.00
	Na sklade				190.00	0.00	678.02
24	Ve(t,s)				12420.00	12420.00	12420.00
	Tp(t,s)				10.90	8.60	10.20
	Pt(t,s)				993.00	1756.00	1203.00
					<=	<=	<=
	omez.L				993.00	1756.00	1203.00
	f(t,s)				0.89	0.92	0.91
Po	ztrate				169.10	0.00	617.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	456.00	0.00
	Pohyb				307.00	0.00	97.00
	Na sklade				476.10	0.00	714.00

Obrázek 25: Stručný výpis výsledků optimalizačního modelu [vlastní]

5 ANALÝZA VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ

V této kapitole budou postupně porovnány dosažené výsledky ve všech ročních obdobích. Pro každé roční období budou uvedeny základní charakteristiky stejně jako průběh využití zdrojů v čase t bez a s tepelným zásobníkem.

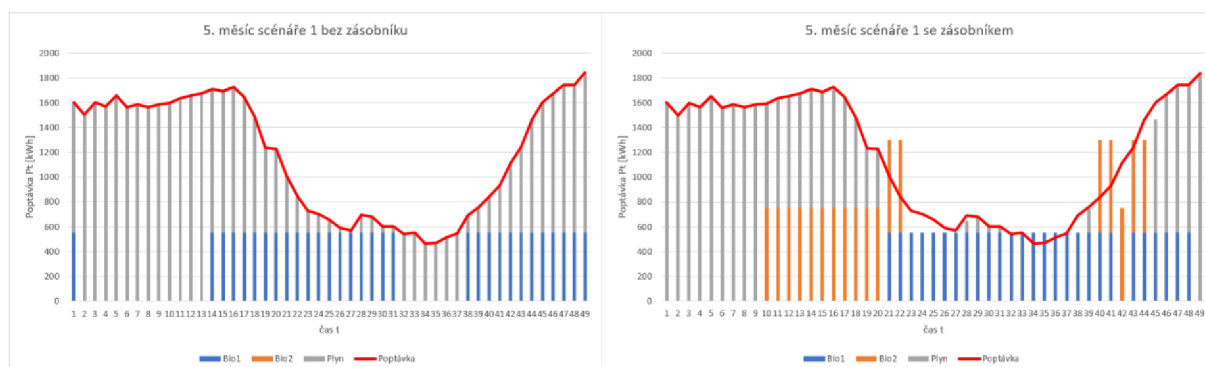
5.1 JARO

Pro jaro byl jako reprezentativní zvolen měsíc květen, neboť tento jarní měsíc dosahuje v průměru i vyšších denních teplot jak 13 °C, přesahuje tedy pomyslnou hranici, od které není dodávána energie na vytápění.

Tabulka 9: Charakteristiky 5. měsíce

	Bez zásobníku	Se zásobníkem
Minimální denní teplota [°C]	6.22	6.22
Maximální denní teplota [°C]	14.31	14.31
Náklady [Kč]	66770.02	59264.10
Výnosy [Kč]	112925.31.62	112925.31
Zisk [Kč]	46155.29	53661.22

V **tabulce 9** lze vidět jasný pokles nákladů asi o 16 %. Ten je způsobený zavedením tepelného zásobníku, díky kterému je systém schopen využívat úspornější kotle na biomasu v časech t , kde by výroba z jednoho kotle, nebo kombinovaná výroba z obou kotlů, přesahovala poptávku P_t^s . Tuto změnu využívaných zdrojů lze vidět v **grafu 7**, kde zavedení zásobníku znamenalo, že druhý kotel na biomasu byl používán mnohem častěji. Překročení hranice červené křivky v čase t znamená, že přebytek vyrobené energie se uloží do tepelného zásobníku. Naopak, pokud sloupec v čase t nedosáhne úrovně křivky, tato energie je z tepelného zásobníku doplněna.



Graf 7: Porovnání využití zdrojů v 5. měsíci scénáře 1 [vlastní]

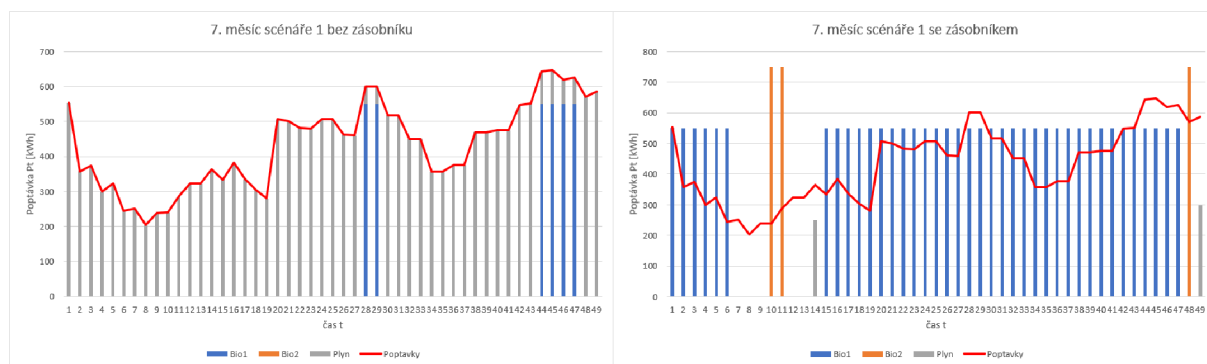
5.2 LÉTO

Pro léto byl jako reprezentativní zvolen měsíc červenec, neboť se jedná o jeden z nejteplejších měsíců v roce. Vysoké teploty letních měsíců znamenají absenci poptávky po energii na vytápění.

Tabulka 10: Charakteristiky 7. měsíce

	Bez zásobníku	Se zásobníkem
Minimální denní teplota [°C]	10.11	10.11
Maximální denní teplota [°C]	24.58	24.58
Náklady [Kč]	27600.78	16694.60
Výnosy [Kč]	42690.08	42690.08
Zisk [Kč]	15089.30	25995.48

Poptávka P_t^s v těchto měsících v mnoha časech t nepřevyšuje kapacity úspornějších kotlů na biomasu, které, kvůli svojí nemožnosti regulace, nemohou být využívány a poptávka je téměř ze 100 % kryta dražší kaskádou na zemní plyn (viz **graf 8**). Zavedení tepelného zásobníku pomáhá neregulovatelným zdrojům pokrýt kolísavou poptávku P_t^s a tím snižuje celkové náklady. V **grafu 8** lze vidět, že zavedení tepelného zásobníku znamenalo několikanásobné zvýšení využití kotlů na biomasu, což mělo za následek snížení nákladů téměř o 40 %.



Graf 8: Porovnání využití zdrojů v 7. měsíci scénáře 1 [vlastní]

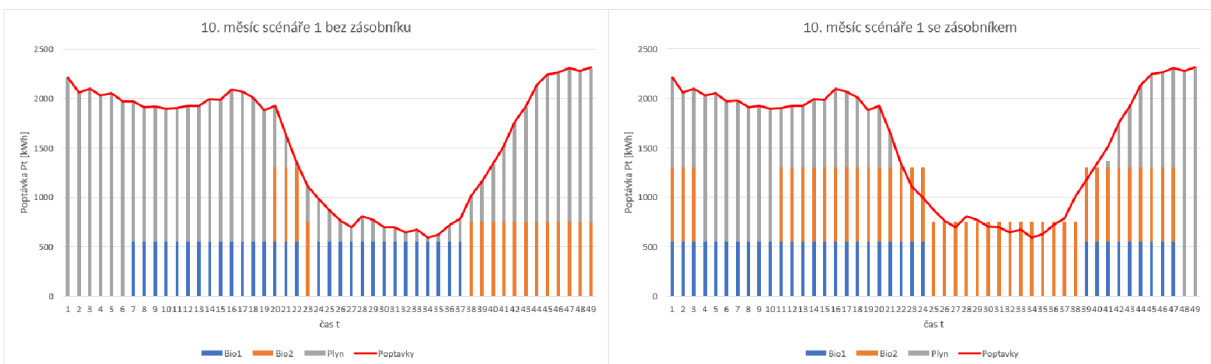
5.3 PODZIM

Pro podzim byl jako reprezentativní zvolen měsíc říjen. Charakteristiky podzimních měsíců jsou v podstatě stejné jako charakteristiky těch jarních, což lze vidět při porovnání vygenerovaných maximálních a minimálních teplot v **tabulkách 9 a 11**. Model se tedy při alokaci zdrojů chová v obou případech obdobně.

Tabulka 11: Charakteristiky 10. měsíce

	Bez zásobníku	Se zásobníkem
Minimální denní teplota [°C]	3.23	3.23
Maximální denní teplota [°C]	13.31	13.31
Náklady [Kč]	83906.68	70408.62.56
Výnosy [Kč]	149438.63	149438.63
Zisk [Kč]	65531.95	79030.01

Podobnost obou ročních období lze pozorovat i na procentuálním poklesu nákladů, který v případě jara činil 16 % a v případě podzimu 11 %. V porovnání s poklesem zaznamenaným v 7. měsíci je procentuálně menší, neboť výše poptávek v tomto měsíci převyšují kapacity úspornějších zdrojů a v současném stavu nedominovalo použití kotlů na zemní plyn, jako tomu je u letních měsíců. V grafu 9 lze vidět, že zavedení zásobníku znamenalo víc jak dvojnásobné využití výkonnějšího kotle na biomasu.



Graf 9: Porovnání využití zdrojů v 10. měsíci scénáře 1 [vlastní]

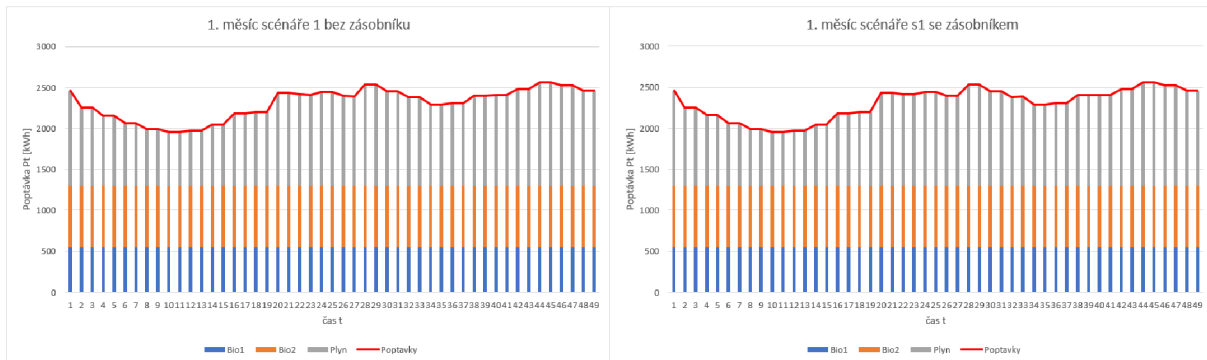
5.4 ZIMA

Pro zimu byl jako reprezentativní zvolen měsíc leden. Pro zimní měsíce je charakteristické, že jejich průměrné denní teploty klesají pod 6 °C, což znamená, že poptávka po energii na vytápění je konstantní, neboť všichni topí.

Tabulka 12: Charakteristiky 1. měsíce

	Bez zásobníku	Se zásobníkem
Minimální denní teplota [°C]	-9.89	-9.89
Maximální denní teplota [°C]	-2.35	-2.35
Náklady [Kč]	110526.08	110526.08
Výnosy [Kč]	224695.28	224695.28
Zisk [Kč]	114169.20	114169.20

Kotle na biomasu tedy vyrábí nepřetržitě, stejně jako kaskáda na zemní plyn. Zavedení zásobníku tedy nemá v těchto měsících žádný efekt, neboť nevznikají žádné nadbytky, které by se mohly skladovat. Náklady tedy zůstávají v obou případech stejné.



Graf 10: Porovnání využití zdrojů v 1. měsíci scénáře 1 [vlastní]

6 ZÁVĚR

V této práci byl na základě představených metod a nástrojů, popsaných ve 3. kapitole, navržen matematický model pro optimalizaci energetického systému, konkrétně teplárny. Model řeší klasickou optimalizační úlohu v podobě alokace zdrojů v závislosti na poptávce s ohledem na technické parametry systému za účelem dosažení maximálního možného zisku.

Poptávka je kolísavá a její výše je závislá především na venkovní teplotě a denní době. Z tohoto důvodu bylo nutné navrhnout způsob, jakým efektivně predikovat hodnoty teplot v jednotlivých časech, pro které se zdroje alokují. Toho bylo dosaženo identifikováním teplotních vývojových trendů z dat dostupných z meteorologického úřadu. K určení závislosti mezi venkovní teplotou a výší poptávky byly použity modely logistické regrese, z nichž nejpřesnějších výsledků dosahovala logistická funkce.

Po navržení způsobu předikování výše poptávky mohl být navržen samotný optimalizační model, který funguje na principu dvoustupňového stochastického programování. V prvním stupni je na základě predikovaných hodnot učiněno „here-and-now“ rozhodnutí o využití úspornějších kotlů na biomasu, které jsou kvůli svým technickým parametrům (době náběhu a neregulovatelnost) modelovány binární proměnou, mohou tedy nabývat pouze dvou hodnot. Toto rozhodnutí je společné pro všechny scénáře a je zajištěno neanticipativními omezeními. V druhém stupni je poté učiněno „wait-and-see“ rozhodnutí o využití kaskády kotlů na zemní plyn. Tato rozdílná rozhodnutí pro různé scénáře jsou použita pro pokrytí rozdílu mezi predikovanou a skutečnou hodnotou poptávky.

Proti skutečnému stavu je matematický model rozšířen o ztrátový tepelný zásobník, zkoumání jehož vlivu na chování systému, je jedním z cílů této práce. Při posuzování výsledků bylo zjištěno, že, vyjma zimní měsíce, tepelný zásobník pomáhá snižovat náklady, neboť umožňuje využití úspornějších kotlů na biomasu i v situacích, kde výroba jednoho kotle, nebo kombinovaná výroba obou kotlů, přesahuje výši poptávky.

Mezi hlavní přínosy této práce patří model predikce poptávek v závislosti na vstupných proměnných a principy optimalizačního modelu spolu s definovanými omezeními, které by mohly být dále rozšířeny a v upravené podobě prakticky využity v řídicím algoritmu procesu výroby tepla.

Tato práce vznikla za podpory projektu "Výpočtové simulace pro efektivní nízkoemisní energetiku" reg. č.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008392 financovaného z OP VV, Prioritní osy 1: Posilování kapacit pro kvalitní výzkum.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] „Teplárny Brno - Historie,“ Teplárny Brno, a.s., 2014. [Online]. Dostupné z: <https://www.teplarny.cz/historie>. [Přístup získán 31-05-2020].
- [2] J. Klapka, J. Dvořák a P. Popela, *Metody operačního výzkumu: teorie a algoritmy*, 2. vyd., Brno: VUTIUM, 2001.
- [3] S. G. Nash a A. Sofer, *Linear and Nonlinear Programming*, New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 1996.
- [4] M. S. Bazaraa, H. D. Sherali a C. M. Shetty, *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*, 3rd ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [5] H. P. Williams, *Model Building in Mathematical Programming*, New York: John Wiley & Sons, Ltd., 1978.
- [6] J. R. Birge a F. Louveaux, *Introduction to Stochastic Programming*, 2nd ed., New York: Springer, 2011.
- [7] „Teplárny Brno - Provozy,“ Teplárny Brno, a.s., 2014. [Online]. Dostupné z: <https://www.teplarny.cz/provozy>. [Přístup získán 8-4-2020].
- [8] L. Drahokoupilová, *Optimalizace provozu kotelny Brno-Bystrc*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010.
- [9] „Teplárny Brno - Cena tepla,“ Teplárny Brno, a.s., 2020. [Online]. Dostupné z: <https://www.teplarny.cz/cena-tepla>. [Přístup získán 31-05-2020].
- [10] D. G. Luenberger a Y. Ye, *Linear and Nonlinear Programming*, 3rd ed., New York: Springer, 2008.
- [11] D. E. Knuth, *The art of computer programming: fundamental algorithms*, 3rd ed., Reading, Massachusetts: Addison Wesley Longman, 1997.
- [12] „GAMS Documentation Center,“ GAMS Development Corporation, [Online]. Dostupné z: <https://www.gams.com/latest/docs/>. [Přístup získán 14-04-2020].
- [13] G. Ghiani, G. Laporte a R. Musmanno, *Introduction to Logistics Systems Planning and Control*, New York: John Wiley & Sons Ltd., 2004.
- [14] A. Shapiro a A. Philpott, *A Tutorial on Stochastic Programming*, Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2007.
- [15] R. E. Rosenthal, *GAMS - A Users's Guide*, Washington, DC: GAMS Development Corporation, 2008.

- [16] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus a R. Raman, GAMS - A User's Guide, Washington, DC: GAMS Development Corporation, 1998.
- [17] Z. Krippelová a J. Peráčková, „Průběh spotřeby teplé vody v bytových domech,“ Jaga Media, s.r.o., 10 11 2014. [Online]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/vytapeni/prubeh-spotreby-teple-vody-v-bytovych-domech>. [Přístup získán 27-05-2020].
- [18] E. James, „How to Calculate Time to Heat Water.,“ Leaf Group Ltd., 16-05-2018. [Online]. Dostupné z: <https://sciencing.com/calculate-time-heat-water-8028611.html>. [Přístup získán 27-05-2020].
- [19] J. Škrabal, „Jaké je složení domácností v ČR?,“ Český statistický úrad, 07-03-2013. [Online]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/jake_je_slozeni_domacnosti_v_cr20130307. [Přístup získán 27-05-2020].
- [20] „Archiv počasí,“ InMeteo, s.r.o., [Online]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/archiv/>. [Přístup získán 27 05 2020].
- [21] M. Hrabal, „Teplárny zavírají kohouty. Topná sezona v Brně? Nejteplejší v tomto století,“ VLTAVA LABE MEDIA a.s., 19 05 2020. [Online]. Dostupné z: https://brnensky.denik.cz/zpravy_region/teplarny-zaviraji-kohouty-topna-sezona-v-brne-nejteplejsi-v-tomto-stoleti-20200519.html. [Přístup získán 29 05 2020].
- [22] Y.-H. Hsieh, „Richards Model: A Simple Procedure for Real-time Prediction of Outbreak Severity,“ ResearchGate.net, 01-04-2009. [Online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228982186_Richards_Model_A_Simple_Procedure_for_Real-time_Prediction_of_Outbreak_Severity/citation/download. [Přístup získán 31-05-2020].
- [23] K. M. C. Tjørve, „The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: An addition to the Unified-Richards family,“ PLOS, 05 06 2017. [Online]. Dostupné z: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0178691>. [Přístup získán 27-05-2020].
- [24] A. Onofri, „Some useful equations for nonlinear regression in R,“ statforbiology.com, 08-01-2019. [Online]. Dostupné z: <https://www.statforbiology.com/nonlinearregression/usefulequations>. [Přístup získán 27-05-2020].

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Technické parametry 1. uvažovaného kotle na biomasu	13
Tabulka 2: Technické parametry 2. uvažovaného kotle na biomasu	14
Tabulka 3: Technické parametry uvažované kaskády kotlů na zemní plyn	14
Tabulka 4: GAMS – základní elementy [16].....	26
Tabulka 5: Typy proměnných [16]	29
Tabulka 6: Srovnání průměrných půlhodinových poptávek v jednotlivých měsících	36
Tabulka 7: Koeficienty testovaných vztahů.....	40
Tabulka 8: Průměrné odchylky testovaných vztahů.....	40
Tabulka 9: Charakteristiky 5. měsíce	55
Tabulka 10: Charakteristiky 7. měsíce	56
Tabulka 11: Charakteristiky 10. měsíce.....	57
Tabulka 12: Charakteristiky 1. měsíce.....	57

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Denní vývoj spotřeby teplé vody v litrech na osobu [17]	34
Graf 2: Porovnání simulovaných dat s dostupnými daty [vlastní]	37
Graf 3: Logistická křivka závislosti poptávané energie na venkovní teplotě [vlastní]	40
Graf 4: Běžný trend denních teplot [vlastní]	41
Graf 5: Rostoucí trend denních teplot [vlastní]	42
Graf 6: Klesající trend denních teplot [vlastní]	42
Graf 7: Porovnání využití zdrojů v 5. měsíci scénáře 1 [vlastní]	55
Graf 8: Porovnání využití zdrojů v 7. měsíci scénáře 1 [vlastní]	56
Graf 9: Porovnání využití zdrojů v 10. měsíci scénáře 1 [vlastní]	57
Graf 10: Porovnání využití zdrojů v 1. měsíci scénáře 1 [vlastní]	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Vyobrazení systému se vstupy, vazbami a omezeními [vlastní]	15
Obrázek 2: Deklarace příkazu Sets [vlastní]	27
Obrázek 3: Deklarace příkazu Parameters [vlastní]	28
Obrázek 4: Deklarace příkazu Variables [vlastní].....	28
Obrázek 5: Deklarace omezení (equations) [vlastní]	29
Obrázek 6: Definice omezení (equations) [vlastní]	30
Obrázek 7: Deklarace modelu [vlastní]	31
Obrázek 8: Deklarace řešitele (solveru) [vlastní].....	31
Obrázek 9: Deklarace zobrazení výsledků (Display) [vlastní]	31
Obrázek 10: Výsledky optimalizace [vlastní].....	32
Obrázek 11: Parametry a výpočet hodnoty poptávky po teplé vodě [vlastní]	43
Obrázek 12: Parametry pro vygenerování minimální a maximální denní teploty [vlastní]	44
Obrázek 13: Parametr $k(t,s)$ pro výpočet vývoje denních teplot [vlastní]	45
Obrázek 14: Deklarace parametrů pro výpočet celkové predikované poptávky [vlastní].....	46
Obrázek 15: Deklarace omezení poptávky [vlastní]	48
Obrázek 16: Deklarace omezení kapacit a rozhodovacích proměnných [vlastní].....	49
Obrázek 17: Deklarace neanticipativního omezení [vlastní]	49
Obrázek 18: Deklarace omezení počtu sepnutí [vlastní]	50
Obrázek 19: Deklarace parametru g_{jp} [vlastní]	50
Obrázek 20: Deklarace parametru bc [vlastní].....	51
Obrázek 21: Deklarace parametru g_c [vlastní]	51
Obrázek 22: Deklarace parametrů a množin [vlastní]	52
Obrázek 23: Definice a deklarace omezení [vlastní]	53
Obrázek 24: Deklarace a definice rovnic [vlastní].....	53
Obrázek 25: Stručný výpis výsledků optimalizačního modelu [vlastní]	54

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Zdrojový kód GAMS

Příloha č. 2: Kompletní výpis výsledků

Příloha č. 3: Soubor.zip odevzdaný s prací obsahující výpočty v Excelu, GAMS a výsledky

PŘÍLOHY

Zdrojový kód GAMS

```
$solcom //
//Castecne vypnuti vypisu
option limrow = 0;
option limcol = 0;
option solprint = off;

set i          typ kotle na biomasu          / Bio1, Bio2 /,
    j          typ kotle na plyn             / Plyn /,
    t          uvazovane casy                / 1 * 49 //,
    s          uvazovane scenare             / 1 * 3 //,
    m          mesice                        / 1 * 12 //,
    r          hranice pro generatory        / d, h //,
    l          pocet simulaci                / 1*4 //;
alias(s,ss);

Parameter
v(t,r) rozsah spotreby vody na osobu v case t /
  1.d 1.12, 1.h 1.12, 2.d 0.68, 2.h 0.68,
  3.d 0.68, 3.h 0.68, 4.d 0.48, 4.h 0.48,
  5.d 0.48, 5.h 0.48, 6.d 0.28, 6.h 0.28,
  7.d 0.28, 7.h 0.28, 8.d 0.12, 8.h 0.12,
  9.d 0.12, 9.h 0.12, 10.d 0.04, 10.h 0.04,
  11.d 0.04, 11.h 0.04, 12.d 0.08, 12.h 0.08,
  13.d 0.08, 13.h 0.08, 14.d 0.24, 14.h 0.24,
  15.d 0.24, 15.h 0.24, 16.d 0.52, 16.h 0.52,
  17.d 0.52, 17.h 0.52, 18.d 0.56, 18.h 0.56,
  19.d 0.56, 19.h 0.56, 20.d 1.064, 20.h 1.064,
  21.d 1.06, 21.h 1.06, 22.d 1.024, 22.h 1.024,
  23.d 1.02, 23.h 1.02, 24.d 1.08, 24.h 1.08,
  25.d 1.08, 25.h 1.08, 26.d 0.984, 26.h 0.984,
  27.d 0.98, 27.h 0.98, 28.d 1.28, 28.h 1.28,
  29.d 1.28, 29.h 1.28, 30.d 1.104, 30.h 1.104,
  31.d 1.1, 31.h 1.1, 32.d 0.96, 32.h 0.96,
  33.d 0.96, 33.h 0.96, 34.d 0.76, 34.h 0.76,
  35.d 0.76, 35.h 0.76, 36.d 0.8, 36.h 0.8,
  37.d 0.8, 37.h 0.8, 38.d 1, 38.h 1,
  39.d 1, 39.h 1, 40.d 1.008, 40.h 1.008,
  41.d 1.008, 41.h 1.008, 42.d 1.16, 42.h 1.16,
  43.d 1.16, 43.h 1.16, 44.d 1.344, 44.h 1.344,
  45.d 1.34, 45.h 1.34, 46.d 1.264, 46.h 1.264,
  47.d 1.26, 47.h 1.26, 48.d 1.12, 48.h 1.12,
  49.d 1.12, 49.h 1.12/,

// Parametry pro vypocet poptavky po teple vode
o          prumerny pocet obyvatel v domacnosti / 2.3 /,
d          pocet domacnosti / 5000 //,
Td         teplotni rozdil ohrivane vody / 35 //,
ve(t,s)   mnozstvi poptavane teple vody v case t scenari s;

// Generator poptavky po teple vode v case t scenari s
ve(t,s) = uniform(v(t,'d'),v(t,'h'))*o*d;

Parameter
min(m,r) rozsah minimalnich teplot v mesici m /
  1.d -12.0, 1.h -1.3, 2.d -8.8, 2.h -0.4,
  3.d -7.0, 3.h 6.4, 4.d -0.2, 4.h 13.9,
  5.d 4.6, 5.h 12.8, 6.d 11.5, 6.h 17.9,
  7.d 7.9, 7.h 19.1, 8.d 11.7, 8.h 20.3,
  9.d 4.8, 9.h 16.6, 10.d 1.1, 10.h 11.9,
  11.d -0.3, 11.h 9.3, 12.d -4.3, 12.h 1.6/,

max(m,r) rozsah maximalnich teplot v mesici m /
  1.d -4.0, 1.h 2.7, 2.d 1.1, 2.h 10.9,
  3.d -2.9, 3.h 16.5, 4.d 8.8, 4.h 20.0,
  5.d 11.4, 5.h 23.2, 6.d 23.7, 6.h 28.7,
  7.d 21.4, 7.h 34.3, 8.d 21.6, 8.h 33.2,
  9.d 17.1, 9.h 25.8, 10.d 10.8, 10.h 21.0,
  11.d 2.6, 11.h 16.2, 12.d -0.5, 12.h 7.4/,

// Parametry pro ulozeni generovanych teplot
min_tp    minimalni denni teplota,
max_tp    maximalni denni teplota;

// generator minimalnich a maximalnich teplot v mesici m
min_tp = uniform(min('1','d'),min('1','h'));
max_tp = uniform(max('1','d'),max('1','h'));
```

Parameter

```

k(t,s) prumerne nominalni teploty v case t scenari s/
  1.1 0.354674309, 1.2 0.086248725, 1.3 0.923192406,
  2.1 0.318634411, 2.2 0.091846069, 2.3 0.883791134,
  3.1 0.282594514, 3.2 0.097443412, 3.3 0.844389862,
  4.1 0.25424421, 4.2 0.102140038, 4.3 0.846222927,
  5.1 0.225893907, 5.2 0.106836663, 5.3 0.848055992,
  6.1 0.214925707, 6.2 0.106914519, 6.3 0.813868309,
  7.1 0.203957507, 7.2 0.106992374, 7.3 0.779680626,
  8.1 0.185810702, 8.2 0.098657273, 8.3 0.748160407,
  9.1 0.167663897, 9.2 0.090322172, 9.3 0.716640188,
 10.1 0.145636411, 10.2 0.087045836, 10.3 0.702258859,
 11.1 0.123608925, 11.2 0.0837695, 11.3 0.68787753,
 12.1 0.118744572, 12.2 0.075635441, 12.3 0.659389107,
 13.1 0.113880219, 13.2 0.067501383, 13.3 0.630900683,
 14.1 0.130192748, 14.2 0.075373312, 14.3 0.597032709,
 15.1 0.146505277, 15.2 0.083245241, 15.3 0.563164735,
 16.1 0.190840978, 16.2 0.125146605, 16.3 0.576333307,
 17.1 0.235176678, 17.2 0.167047969, 17.3 0.589501879,
 18.1 0.312723195, 18.2 0.21562668, 18.3 0.621222204,
 19.1 0.390269711, 19.2 0.26420539, 19.3 0.652942529,
 20.1 0.47794189, 20.2 0.305839061, 20.3 0.649772213,
 21.1 0.565614069, 21.2 0.347472732, 21.3 0.646601898,
 22.1 0.64002258, 22.2 0.413595203, 22.3 0.650245141,
 23.1 0.714431091, 23.2 0.479717675, 23.3 0.653888384,
 24.1 0.762820866, 24.2 0.52887104, 24.3 0.690372855,
 25.1 0.811210641, 25.2 0.578024405, 25.3 0.726857325,
 26.1 0.844439643, 26.2 0.62197175, 26.3 0.735073874,
 27.1 0.877668644, 27.2 0.665919095, 27.3 0.743290423,
 28.1 0.903662235, 28.2 0.709730662, 28.3 0.741237925,
 29.1 0.929655826, 29.2 0.753542229, 29.3 0.739185427,
 30.1 0.923823275, 30.2 0.797130018, 30.3 0.754200761,
 31.1 0.917990723, 31.2 0.840717808, 31.3 0.769216094,
 32.1 0.90562569, 32.2 0.855828273, 32.3 0.742536687,
 33.1 0.893260658, 33.2 0.870938737, 33.3 0.715857281,
 34.1 0.875587882, 34.2 0.843878548, 34.3 0.658098893,
 35.1 0.857915107, 35.2 0.816818359, 35.3 0.600340506,
 36.1 0.822153244, 36.2 0.797633413, 36.3 0.541040939,
 37.1 0.786391381, 37.2 0.778448466, 37.3 0.481741372,
 38.1 0.739045953, 38.2 0.779015084, 38.3 0.421615824,
 39.1 0.691700526, 39.2 0.779581702, 39.3 0.361490276,
 40.1 0.641371997, 40.2 0.754616093, 40.3 0.305766209,
 41.1 0.591043468, 41.2 0.729650483, 41.3 0.250042141,
 42.1 0.541011028, 42.2 0.743940745, 42.3 0.225461984,
 43.1 0.490978588, 43.2 0.758231006, 43.3 0.200881826,
 44.1 0.440488378, 44.2 0.772004342, 44.3 0.167503346,
 45.1 0.389998167, 45.2 0.785777679, 45.3 0.134124867,
 46.1 0.361089001, 46.2 0.803653719, 46.3 0.120841812,
 47.1 0.332179834, 47.2 0.821529758, 47.3 0.107558758,
 48.1 0.302628665, 48.2 0.832776704, 48.3 0.078117686,
 49.1 0.273077495, 49.2 0.844023649, 49.3 0.048676615;/

```

Parameter

```

// Parametry pro vypocet poptavky po vytapeni
A horni asymptota / 1933.88202706417 /,
e konstantni Eulerovo cislo / 2.71828182845905 /,
Kg logisticky rustovy koeficient / -0.735635517649199 /,
T0 sigmoiduv stredni bod / 9.41541981244695 /,
Tp(t,s) venkovni teplota v case t scenari s,
Pt(t,s) celkova poptavka Pt po teple v case t scenari s,
Vr(s) celkova vyrobena energie beze ztrat ve scenari s;

// vypocet denni teploty v case t scenari s
Tp(t,s) = round(k(t,s) * (max_tp - min_tp) + min_tp,1);

// vypocet celkove poptavky po energii v case t
// Prvni cast rovnice pocita poptavku po energii potrebnou k vytapeni.
// Druha cast rovnice pocita poptavku po energii potrebnou k ohrevu vody.
Pt(t,s) = A/(1+e**(-Kg*(Tp(t,s)-T0))) + (4.2*Ve(t,s)*Td)/3600;
Pt(t,s) = round(Pt(t,s),0);

```

Parameter

```

// Parametry kapacit kotlu
cap(i) maximalni kapacita kotle typu i / Bio1 550, Bio2 750 /,

// Parametry pro vypocet nakladu a prijmu
bc jednotkova cena za kwh vyrobenou biomasou / 0.65 /,
gc jednotkova cena za kwh vyrobenou plynem / 1.40 /,
gjp zisk z jednoho GJ vyrobene energie / 552 /,
pst(s) pravdepodobnost scenare / 1 0.8,
2 0.1,
3 0.1 /

zmeny(i),
f(t,s) nahodne generovana ztrata tepelneho zasobniku,
poztrate(t,s) energie na skladu po odedceni ztraty,
pohyb(t,s) energie vzana ze zasobniku po pokryti poptavky Pt case t scenari s,
prubeh(i,t,s) mnozstvi vyrobene kotlem typu i v case t scenari s,
spinac(i,t) ukazatel here-and-now rozhodnuti kotle typu i v case t;

```

```

zmeny(i) = uniform(2,5);
zmeny(i) = round(zmeny(i),0);
f(t,s) = uniform(0.85, 0.95);
f(t,s) = round(f(t,s),2);
variable
// Promenne pro dilci vypocty nakladu
bic(s)    naklady na vyrobu biomasou,
plc(s)    naklady na vyrobu zemnim plynem,
snc(s)    naklady v-teho scenare na vyrobu,

// Promenne pro dilci vypoctu prijmu
bir(s)    příjem z energie vyrobené biomasou,
plr(s)    příjem z energie vyrobené zemním plynem,
snr(s)    příjem za prodej energie v-teho scenare,

// Promenne pro uložení celkových nakladu a příjmu
tc        celkove naklady na vyrobu,
tr        celkove prijmy za vyrobenou energii,

// promenna pro uložení ucelove funkce
z        hodnota ucelove funkce;

Binary variables
x(i,t,s) vyuziti kotle typu i v case t pro scenar s;

Positive variables
yp(j,t,s) vyuziti kotle typu j v case t pro scenar s,
yz(t,s)   zasobnik se ztratom f,
deltaxp(i,t,s) citac plus zmen,
deltaxm(i,t,s) citac minus zmen;

deltaxp.L(i,t,s) = 0;
deltaxm.L(i,t,s) = 0;

// horni mez pro vyuziti jednoho kotle
x.UP(i,t,s) = 1;
// maximalni kapacitu kotle typu j
yp.UP(j,t,s) = 9600;
// maximalni kapacita zasobniku yz
yz.UP(t,s) = 2000;
// omezeni zasobniku yz v case t = 49
yz.L('49',s) = 0;

Equations
bio_cost(s)    naklady na vyrobu z biomasy ve scenari s,
zpl_cost(s)    naklady na vyrobu ze zemniho plynu ve scenari s,
scn_cost(s)    celkove naklady ve scenari s;

bio_cost(s)..
  bic(s) =E= pst(s) * (sum(t,(x('Bio1',t,s)*cap('Bio1')
  + x('Bio2',t,s)*cap('Bio2')))) * bc;

zpl_cost(s)..
  plc(s) =E= pst(s) * sum(t,yp('Plyn',t,s)) * gc;

scn_cost(s)..  snc(s) =E= bic(s) + plc(s);

Equations
scn_revenue(s)  celkove primy za scenar s ;

scn_revenue(s)..  snr(s) =E= pst(s) * sum(t,Pt(t,s))/277.78*gjp;

Equations
total_cost      celkove naklady za vsechny scenare,
total_revenue   celkove prijmy za vsechny scenare;

total_cost..    tc =E= sum(s, snc(s));
total_revenue.. tr =E= sum(s, snr(s));

Equations
profit          ucelova funkce predmetem maximalizacet;

profit..        z =E= tr - tc;

Equations
omez(t,s)       omezeni pro splneni poptavky v case t pro scenar s,
omez1(t,s)      omezeni pro splneni poptavky v case 1 pro scenar s,
HNWS(i,t,s)     neanticipativni omezeni v case t pro scenare s,
delta(i,t,s)    pomocne omezeni,
pocetzmen(i,s)  omezeni poctu zmen;

//$ontext
omez1(t,s)$(ord(t) EQ 1)..
  sum(i,x(i,t,s)*cap(i)) + sum(j,yp(j,t,s)) =E= Pt(t,s);

omez(t,s)$(ord(t) GT 1)..
  ... sum(i,cap(i)*x(i,t,s)) + sum(j,yp(j,t,s)) =E= Pt(t,s);

```

```

omez(t,s)$ord(t) GT 1)..
  f(t-1,s)*yz(t-1,s) + sum(i,cap(i)*x(i,t,s)) + sum(j,yP(j,t,s)) - yz(t,s)
  =E= Pt(t,s);

omez1(t,s)$ord(t) EQ 1)..
  sum(i,x(i,t,s)*cap(i)) + sum(j,yP(j,t,s)) - yz(t,s) =E= Pt(t,s);
$offtext

HNWS(i,t,s)..
  sum(ss, pst(ss) * x(i,t,ss)) =E= x(i,t,s);

delta(i,t,s)$ord(t) GT 1)..
  deltaxp(i,t,s)-deltaxm(i,t,s) =E= x(i,t,s)-x(i,t-1,s);

pocetzmen(i,s)..
  sum(t, deltaxp(i,t,s) + deltaxm(i,t,s) ) =L= zmeny(i);

model optimTepla /all/;

file out1 / "vysledky_final.txt" /;
file out2 / "poptavky.txt" /;
file out3 / "bio1.txt" /;
file out4 / "bio2.txt" /;
file out5 / "plyn.txt" /;
file out6 / "zasobnik.txt" /;
put out1;

solve optimTepla maximizing z using MIP;
display z.L, x.L, yP.L, yZ.L, omez.L, Pt, cap, bc, gc, delta.L;
display f, zmeny, pocetzmen.L, deltaxp.L, deltaxm.L;
poztrate(t,s) = f(t,s)*yz.L(t,s);
pohyb(t,s) = sum(i,x.L(i,t,s)*cap(i))+sum(j,yP.L(j,t,s))-Pt(t,s);
prubeh(i,t,s) = x.L(i,t,s)*(cap(i));
spinac(i,t) = sum(s, x.L(i,t,s))/3;
vr(s) = sum(t, sum(i,x.L(i,t,s)*cap(i))+sum(j,yP.L(j,t,s)))

put "vysledky" /;
put "======" / /;

If(optimTepla.modelstat EQ 1,
put "Nalezeno optimalni reseni"););
If(optimTepla.modelstat EQ 2,
put "Nalezeno lokalne optimalni reseni"););
If(optimTepla.modelstat EQ 3,
put "Neomezena ucelova funkce na mnozine pripustnych reseni"););
If(optimTepla.modelstat EQ 4,
put "Neexistuje pripustne reseni"););
If(optimTepla.modelstat EQ 5,
put "Lokalne neexistuje pripustne reseni"););
If(optimTepla.modelstat EQ 6,
put "Prubezne neexistuje pripustne reseni"););
If(optimTepla.modelstat EQ 7,
put "Prubezne neoptimalni reseni"););
If(optimTepla.modelstat EQ 8,
put "Celociselne reseni"););

put / /;
put "Naklady = ", tc.L:10:2 /;
put "Vynosy = ", tr.L:10:2 /;
put "Zisk = ", z.L:10:2 / /;
put "Minimalni denni teplota = ", min_tp:6:2 /;
put "Maximalni denni teplota = ", max_tp:6:2 / /;

```

Kompletní výpis výsledků

Výsledky

=====

Celociselné řešení

Naklady = 69200.17

Vynosy = 149438.63

Zisk = 80238.45

Minimalní denní teplota = 3.23

Maximální denní teplota = 13.31

t	symbol	naklad	kapacita	Prepinani	1	2	3
	pst(s)				0.80	0.10	0.10
	scn(s)				56341.63	6950.05	5908.50
	scr(s)				121715.82	14633.62	13089.18
	Pt(s)				76563.00	73640.00	65868.00
	Vr(s)				77144.31	76482.47	69042.84

1	Ve(t,s)				12880.00	12880.00	12880.00
	Tp(t,s)				6.80	4.10	12.50
	Pt(t,s)				2213.00	2422.00	707.00
					<=	<=	<=
	omez.L				0.00	0.00	0.00
	f(t,s)				0.00	0.00	0.00
	Po ztrate				0.00	0.00	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		913.00	1122.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	593.00
	Na sklade				0.00	0.00	593.00

2	Ve(t,s)				7820.00	7820.00	7820.00
	Tp(t,s)				6.40	4.20	12.10
	Pt(t,s)				2063.00	2212.00	555.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2063.00	2212.00	555.00
	f(t,s)				0.86	0.87	0.89
	Po ztrate				0.00	0.00	527.77
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		763.00	912.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	745.00
	Na sklade				0.00	0.00	1272.77

2	Ve(t,s)				7820.00	7820.00	7820.00
	Tp(t,s)				6.40	4.20	12.10
	Pt(t,s)				2063.00	2212.00	555.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2063.00	2212.00	555.00
	f(t,s)				0.86	0.87	0.89
	Po ztrate				0.00	0.00	527.77
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		763.00	912.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	745.00
	Na sklade				0.00	0.00	1272.77

3	Ve(t,s)				7820.00	7820.00	7820.00
	Tp(t,s)				6.10	4.20	11.70
	Pt(t,s)				2098.00	2212.00	623.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2098.00	2212.00	623.00
	f(t,s)				0.87	0.92	0.93
	Po ztrate				0.00	0.00	1183.68
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		798.00	912.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	677.00
	Na sklade				0.00	0.00	1860.68
4	Ve(t,s)				5520.00	5520.00	5520.00
	Tp(t,s)				5.80	4.30	11.80
	Pt(t,s)				2033.00	2115.00	511.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2033.00	2115.00	511.00
	f(t,s)				0.87	0.89	0.92
	Po ztrate				0.00	0.00	1711.82
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		1283.00	1365.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	239.00
	Na sklade				0.00	0.00	1950.82
5	Ve(t,s)				5520.00	5520.00	5520.00
	Tp(t,s)				5.50	4.30	11.80
	Pt(t,s)				2057.00	2115.00	511.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2057.00	2115.00	511.00
	f(t,s)				0.93	0.91	0.95
	Po ztrate				0.00	0.00	1853.28
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Plyn	1.40	9300.00		2057.00	2115.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	-511.00
	Na sklade				0.00	0.00	1342.28
6	Ve(t,s)				3220.00	3220.00	3220.00
	Tp(t,s)				5.40	4.30	11.40
	Pt(t,s)				1970.00	2021.00	496.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1970.00	2021.00	496.00
	f(t,s)				0.85	0.87	0.86
	Po ztrate				0.00	0.00	1154.36
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		1220.00	1271.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	254.00
	Na sklade				0.00	0.00	1408.36

7	Ve(t,s)				3220.00	3220.00	3220.00
	Tp(t,s)				5.30	4.30	11.10
	Pt(t,s)				1976.00	2021.00	566.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1976.00	2021.00	566.00
	f(t,s)				0.90	0.86	0.92
	Po ztrate				0.00	0.00	1295.69
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		1226.00	1271.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	184.00
	Na sklade				0.00	0.00	1479.69
8	Ve(t,s)				1380.00	1380.00	1380.00
	Tp(t,s)				5.10	4.20	10.80
	Pt(t,s)				1913.00	1949.00	569.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1913.00	1949.00	569.00
	f(t,s)				0.86	0.90	0.93
	Po ztrate				0.00	0.00	1376.11
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		1163.00	1199.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	181.00
	Na sklade				0.00	0.00	1557.11
9	Ve(t,s)				1380.00	1380.00	1380.00
	Tp(t,s)				4.90	4.10	10.50
	Pt(t,s)				1923.00	1952.00	657.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1923.00	1952.00	657.00
	f(t,s)				0.90	0.90	0.85
	Po ztrate				0.00	0.00	1323.55
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		1173.00	1202.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	93.00
	Na sklade				0.00	0.00	1416.55
10	Ve(t,s)				460.00	460.00	460.00
	Tp(t,s)				4.70	4.10	10.30
	Pt(t,s)				1894.00	1915.00	682.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1894.00	1915.00	682.00
	f(t,s)				0.90	0.90	0.95
	Po ztrate				0.00	0.00	1345.72
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		1144.00	1165.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	68.00
	Na sklade				0.00	0.00	1413.72

11	Ve(t,s)				460.00	460.00	460.00
	Tp(t,s)				4.50	4.10	10.20
	Pt(t,s)				1902.00	1915.00	714.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1902.00	1915.00	714.00
	f(t,s)				0.87	0.87	0.85
	Po ztrate				0.00	0.00	1201.66
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		1152.00	1165.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	36.00
	Na sklade				0.00	0.00	1237.66
12	Ve(t,s)				920.00	920.00	920.00
	Tp(t,s)				4.40	4.00	9.90
	Pt(t,s)				1924.00	1936.00	834.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1924.00	1936.00	834.00
	f(t,s)				0.87	0.86	0.85
	Po ztrate				0.00	0.00	1052.01
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		624.00	636.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	466.00
	Na sklade				0.00	0.00	1518.01
13	Ve(t,s)				920.00	920.00	920.00
	Tp(t,s)				4.40	3.90	9.60
	Pt(t,s)				1924.00	1939.00	939.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1924.00	1939.00	939.00
	f(t,s)				0.93	0.91	0.85
	Po ztrate				0.00	0.00	1290.31
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		624.00	639.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	361.00
	Na sklade				0.00	0.00	1651.31
14	Ve(t,s)				2760.00	2760.00	2760.00
	Tp(t,s)				4.50	4.00	9.20
	Pt(t,s)				1996.00	2011.00	1156.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1996.00	2011.00	1156.00
	f(t,s)				0.87	0.95	0.88
	Po ztrate				0.00	0.00	1453.15
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		696.00	711.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	144.00
	Na sklade				0.00	0.00	1597.15

15	Ve(t,s)				2760.00	2760.00	2760.00
	Tp(t,s)				4.70	4.10	8.90
	Pt(t,s)				1988.00	2009.00	1261.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1988.00	2009.00	1261.00
	f(t,s)				0.91	0.88	0.91
	Po ztrate				0.00	0.00	1453.41
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		688.00	709.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	39.00
	Na sklade				0.00	0.00	1492.41
16	Ve(t,s)				5980.00	5980.00	5980.00
	Tp(t,s)				5.20	4.50	9.00
	Pt(t,s)				2095.00	2127.00	1358.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2095.00	2127.00	1358.00
	f(t,s)				0.87	0.90	0.89
	Po ztrate				0.00	0.00	1328.24
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		795.00	827.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	-58.00
	Na sklade				0.00	0.00	1270.24
17	Ve(t,s)				5980.00	5980.00	5980.00
	Tp(t,s)				5.60	4.90	9.20
	Pt(t,s)				2068.00	2111.00	1288.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2068.00	2111.00	1288.00
	f(t,s)				0.93	0.90	0.89
	Po ztrate				0.00	0.00	1130.52
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		768.00	811.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	12.00
	Na sklade				0.00	0.00	1142.52
18	Ve(t,s)				6440.00	6440.00	6440.00
	Tp(t,s)				6.40	5.40	9.50
	Pt(t,s)				2007.00	2101.00	1200.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2007.00	2101.00	1200.00
	f(t,s)				0.91	0.94	0.88
	Po ztrate				0.00	0.00	1005.42
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		707.00	801.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	100.00
	Na sklade				0.00	0.00	1105.42

19	Ve(t,s)				6440.00	6440.00	6440.00
	Tp(t,s)				7.20	5.90	9.80
	Pt(t,s)				1880.00	2061.00	1094.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1880.00	2061.00	1094.00
	f(t,s)				0.85	0.94	0.91
	Po ztrate				0.00	0.00	1005.93
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		580.00	761.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	206.00
	Na sklade				0.00	0.00	1211.93
20	Ve(t,s)				12236.00	12236.00	12236.00
	Tp(t,s)				8.00	6.30	9.80
	Pt(t,s)				1929.00	2256.00	1331.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1929.00	2256.00	1331.00
	f(t,s)				0.88	0.95	0.93
	Po ztrate				0.00	0.00	1127.09
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		629.00	956.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	-31.00
	Na sklade				0.00	0.00	1096.09
21	Ve(t,s)				12190.00	12190.00	12190.00
	Tp(t,s)				8.90	6.70	9.70
	Pt(t,s)				1646.00	2201.00	1364.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1646.00	2201.00	1364.00
	f(t,s)				0.86	0.95	0.91
	Po ztrate				0.00	0.00	997.44
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		346.00	901.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	-64.00
	Na sklade				0.00	0.00	933.44
22	Ve(t,s)				11776.00	11776.00	11776.00
	Tp(t,s)				9.70	7.40	9.80
	Pt(t,s)				1347.00	2057.00	1312.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1347.00	2057.00	1312.00
	f(t,s)				0.87	0.91	0.88
	Po ztrate				0.00	0.00	821.43
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		47.00	757.00	0.00
	Pohyb				0.00	0.00	-12.00
	Na sklade				0.00	0.00	809.43

23	Ve(t,s)				11730.00	11730.00	11730.00
	Tp(t,s)				10.40	8.10	9.80
	Pt(t,s)				1110.00	1880.00	1310.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1110.00	1880.00	1310.00
	f(t,s)				0.94	0.94	0.85
	Po ztrate				0.00	0.00	688.02
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	580.00	0.00
	Pohyb				190.00	0.00	-10.00
	Na sklade				190.00	0.00	678.02
24	Ve(t,s)				12420.00	12420.00	12420.00
	Tp(t,s)				10.90	8.60	10.20
	Pt(t,s)				993.00	1756.00	1203.00
					<=	<=	<=
	omez.L				993.00	1756.00	1203.00
	f(t,s)				0.89	0.92	0.91
	Po ztrate				169.10	0.00	617.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	456.00	0.00
	Pohyb				307.00	0.00	97.00
	Na sklade				476.10	0.00	714.00
25	Ve(t,s)				12420.00	12420.00	12420.00
	Tp(t,s)				11.40	9.10	10.60
	Pt(t,s)				872.00	1586.00	1078.00
					<=	<=	<=
	omez.L				872.00	1586.00	1078.00
	f(t,s)				0.85	0.93	0.94
	Po ztrate				404.69	0.00	671.16
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	836.00	0.00
	Pohyb				-122.00	0.00	-328.00
	Na sklade				282.69	0.00	343.16
26	Ve(t,s)				11316.00	11316.00	11316.00
	Tp(t,s)				11.70	9.50	10.60
	Pt(t,s)				766.00	1399.00	1032.00
					<=	<=	<=
	omez.L				766.00	1399.00	1032.00
	f(t,s)				0.90	0.88	0.90
	Po ztrate				254.42	0.00	308.84
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	649.00	0.00
	Pohyb				-16.00	0.00	-282.00
	Na sklade				238.42	0.00	26.84

27	Ve(t,s)				11270.00	11270.00	11270.00
	Tp(t,s)				12.10	9.90	10.70
	Pt(t,s)				696.00	1257.00	1001.00
					<=	<=	<=
	omez.L				696.00	1257.00	1001.00
	f(t,s)				0.85	0.93	0.90
	Po ztrate				202.65	0.00	24.16
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	507.00	226.84
	Pohyb				54.00	0.00	-24.16
	Na sklade				256.65	0.00	0.00
28	Ve(t,s)				14720.00	14720.00	14720.00
	Tp(t,s)				12.30	10.40	10.70
	Pt(t,s)				808.00	1232.00	1142.00
					<=	<=	<=
	omez.L				808.00	1232.00	1142.00
	f(t,s)				0.92	0.92	0.91
	Po ztrate				236.12	0.00	0.00
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	482.00	392.00
	Pohyb				-58.00	0.00	0.00
	Na sklade				178.12	0.00	0.00
29	Ve(t,s)				14720.00	14720.00	14720.00
	Tp(t,s)				12.60	10.80	10.70
	Pt(t,s)				771.00	1114.00	1142.00
					<=	<=	<=
	omez.L				771.00	1114.00	1142.00
	f(t,s)				0.86	0.95	0.92
	Po ztrate				153.18	0.00	0.00
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	364.00	392.00
	Pohyb				-21.00	0.00	0.00
	Na sklade				132.18	0.00	0.00
30	Ve(t,s)				12696.00	12696.00	12696.00
	Tp(t,s)				12.50	11.30	10.80
	Pt(t,s)				700.00	905.00	1031.00
					<=	<=	<=
	omez.L				700.00	905.00	1031.00
	f(t,s)				0.95	0.94	0.91
	Po ztrate				125.58	0.00	0.00
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	155.00	281.00
	Pohyb				50.00	0.00	0.00
	Na sklade				175.58	0.00	0.00

31	Ve(t,s)				12650.00	12650.00	12650.00
	Tp(t,s)				12.50	11.70	11.00
	Pt(t,s)				698.00	820.00	976.00
					<=	<=	<=
	omez.L				698.00	820.00	976.00
	f(t,s)				0.92	0.92	0.93
	Po ztrate				161.53	0.00	0.00
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	70.00	226.00
	Pohyb				52.00	0.00	0.00
	Na sklade				213.53	0.00	0.00
32	Ve(t,s)				11040.00	11040.00	11040.00
	Tp(t,s)				12.40	11.90	10.70
	Pt(t,s)				644.00	719.00	992.00
					<=	<=	<=
	omez.L				644.00	719.00	992.00
	f(t,s)				0.91	0.86	0.90
	Po ztrate				194.31	0.00	0.00
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	0.00	242.00
	Pohyb				106.00	31.00	0.00
	Na sklade				300.31	31.00	0.00
33	Ve(t,s)				11040.00	11040.00	11040.00
	Tp(t,s)				12.20	12.00	10.40
	Pt(t,s)				672.00	702.00	1082.00
					<=	<=	<=
	omez.L				672.00	702.00	1082.00
	f(t,s)				0.86	0.92	0.87
	Po ztrate				258.27	28.52	0.00
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	0.00	332.00
	Pohyb				78.00	48.00	0.00
	Na sklade				336.27	76.52	0.00
34	Ve(t,s)				8740.00	8740.00	8740.00
	Tp(t,s)				12.10	11.70	9.90
	Pt(t,s)				593.00	661.00	1153.00
					<=	<=	<=
	omez.L				593.00	661.00	1153.00
	f(t,s)				0.87	0.93	0.95
	Po ztrate				292.55	71.16	0.00
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	0.00	403.00
	Pohyb				157.00	89.00	0.00
	Na sklade				449.55	160.16	0.00

35	Ve(t,s)				8740.00	8740.00	8740.00
	Tp(t,s)				11.90	11.50	9.30
	Pt(t,s)				625.00	700.00	1365.00
					<=	<=	<=
	omez.L				625.00	700.00	1365.00
	f(t,s)				0.93	0.92	0.85
	Po ztrate				418.08	147.35	0.00
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	0.00	615.00
	Pohyb				125.00	50.00	0.00
	Na sklade				543.08	197.35	0.00
36	Ve(t,s)				9200.00	9200.00	9200.00
	Tp(t,s)				11.50	11.30	8.70
	Pt(t,s)				719.00	762.00	1591.00
					<=	<=	<=
	omez.L				719.00	762.00	1591.00
	f(t,s)				0.88	0.93	0.93
	Po ztrate				477.91	183.54	0.00
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	0.00	841.00
	Pohyb				31.00	-12.00	0.00
	Na sklade				508.91	171.54	0.00
37	Ve(t,s)				9200.00	9200.00	9200.00
	Tp(t,s)				11.20	11.10	8.10
	Pt(t,s)				786.00	810.00	1777.00
					<=	<=	<=
	omez.L				786.00	810.00	1777.00
	f(t,s)				0.94	0.87	0.90
	Po ztrate				478.38	149.24	0.00
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	0.00	1027.00
	Pohyb				-36.00	-60.00	0.00
	Na sklade				442.38	89.24	0.00
38	Ve(t,s)				11500.00	11500.00	11500.00
	Tp(t,s)				10.70	11.10	7.50
	Pt(t,s)				1011.00	904.00	2024.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1011.00	904.00	2024.00
	f(t,s)				0.85	0.88	0.89
	Po ztrate				376.02	78.53	0.00
	Bio1	0.65	550.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	75.47	1274.00
	Pohyb				-261.00	-78.53	0.00
	Na sklade				115.02	0.00	0.00

39	Ve(t,s)				11500.00	11500.00	11500.00
	Tp(t,s)				10.20	11.10	6.90
	Pt(t,s)				1165.00	904.00	2141.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1165.00	904.00	2141.00
	f(t,s)				0.88	0.86	0.93
	Po ztrate				101.22	0.00	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	0.00	841.00
	Pohyb				135.00	396.00	0.00
	Na sklade				236.22	396.00	0.00
40	Ve(t,s)				11592.00	11592.00	11592.00
	Tp(t,s)				9.70	10.80	6.30
	Pt(t,s)				1339.00	986.00	2230.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1339.00	986.00	2230.00
	f(t,s)				0.89	0.86	0.90
	Po ztrate				210.24	340.56	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		0.00	0.00	930.00
	Pohyb				-39.00	314.00	0.00
	Na sklade				171.24	654.56	0.00
41	Ve(t,s)				11592.00	11592.00	11592.00
	Tp(t,s)				9.20	10.60	5.80
	Pt(t,s)				1517.00	1044.00	2281.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1517.00	1044.00	2281.00
	f(t,s)				0.88	0.94	0.86
	Po ztrate				150.69	615.29	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		66.31	0.00	981.00
	Pohyb				-150.69	256.00	0.00
	Na sklade				0.00	871.29	0.00
42	Ve(t,s)				13340.00	13340.00	13340.00
	Tp(t,s)				8.70	10.70	5.50
	Pt(t,s)				1760.00	1086.00	2376.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1760.00	1086.00	2376.00
	f(t,s)				0.89	0.88	0.90
	Po ztrate				0.00	766.73	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		460.00	0.00	1076.00
	Pohyb				0.00	214.00	0.00
	Na sklade				0.00	980.73	0.00

43	Ve(t,s)				13340.00	13340.00	13340.00
	Tp(t,s)				8.20	10.90	5.30
	Pt(t,s)				1917.00	1031.00	2389.00
					<=	<=	<=
	omez.L				1917.00	1031.00	2389.00
	f(t,s)				0.91	0.91	0.88
	Po ztrate				0.00	892.47	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		617.00	0.00	1089.00
	Pohyb				0.00	269.00	0.00
	Na sklade				0.00	1161.47	0.00
44	Ve(t,s)				15456.00	15456.00	15456.00
	Tp(t,s)				7.70	11.00	4.90
	Pt(t,s)				2138.00	1091.00	2498.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2138.00	1091.00	2498.00
	f(t,s)				0.86	0.94	0.87
	Po ztrate				0.00	1091.78	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		838.00	0.00	1198.00
	Pohyb				0.00	209.00	0.00
	Na sklade				0.00	1300.78	0.00
45	Ve(t,s)				15410.00	15410.00	15410.00
	Tp(t,s)				7.20	11.20	4.60
	Pt(t,s)				2246.00	1039.00	2509.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2246.00	1039.00	2509.00
	f(t,s)				0.94	0.90	0.86
	Po ztrate				0.00	1170.70	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		946.00	0.00	1209.00
	Pohyb				0.00	261.00	0.00
	Na sklade				0.00	1431.70	0.00
46	Ve(t,s)				14536.00	14536.00	14536.00
	Tp(t,s)				6.90	11.30	4.40
	Pt(t,s)				2265.00	980.00	2480.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2265.00	980.00	2480.00
	f(t,s)				0.89	0.89	0.89
	Po ztrate				0.00	1274.21	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		965.00	0.00	1180.00
	Pohyb				0.00	320.00	0.00
	Na sklade				0.00	1594.21	0.00

47	Ve(t,s)				14490.00	14490.00	14490.00
	Tp(t,s)				6.60	11.50	4.30
	Pt(t,s)				2309.00	935.00	2482.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2309.00	935.00	2482.00
	f(t,s)				0.86	0.93	0.93
	Po ztrate				0.00	1482.62	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		1009.00	0.00	1182.00
	Pohyb				0.00	365.00	0.00
	Na sklade				0.00	1847.62	0.00
48	Ve(t,s)				12880.00	12880.00	12880.00
	Tp(t,s)				6.30	11.60	4.00
	Pt(t,s)				2282.00	849.00	2424.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2282.00	849.00	2424.00
	f(t,s)				0.85	0.90	0.88
	Po ztrate				0.00	1662.86	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Plyn	1.40	9300.00		1732.00	0.00	1874.00
	Pohyb				0.00	-299.00	0.00
	Na sklade				0.00	1363.86	0.00
49	Ve(t,s)				12880.00	12880.00	12880.00
	Tp(t,s)				6.00	11.70	3.70
	Pt(t,s)				2315.00	830.00	2431.00
					<=	<=	<=
	omez.L				2315.00	830.00	2431.00
	f(t,s)				0.94	0.85	0.92
	Po ztrate				0.00	1159.28	0.00
	Bio1	0.65	550.00	1.00	550.00	550.00	550.00
	Bio2	0.65	750.00	1.00	750.00	750.00	750.00
	Plyn	1.40	9300.00		1015.00	0.00	1131.00
	Pohyb				0.00	470.00	0.00
	Na sklade				0.00	1629.28	0.00