

MATLAB V ANALÝZE NAMĚŘENÝCH DAT PRŮMYSLOVÉHO PODNIKU.

J. Šípál

Fakulta výrobních technologií a managementu; Univerzita Jana Evangelisty Purkyně

Abstrakt

Příspěvek představuje model popisující dodávku tepelné energie do sítě centrálního zásobování teplem města Ústí nad Labem. Tento model je základem pro vývoj automatizovaného systému řízení výroby a optimalizace využití přenosových cest.

1 Úvod

Tepelná energie dodávaná párou má podobné vlastnosti jako elektrická energie. Lze ji skladovat pouze ve velmi omezeném množství. To znamená, že okamžitá výroba je závislá na okamžité spotřebě. Přitom reakce kotelní jednotky na změnu výkonu je řádově 10 až 20 minut, uvedení kotelní jednotky do provozu z teplé zálohy cca 4 hodiny a ze studené zálohy cca 8 až 10 hodin. Přitom na každé odstavení i uvedení kotelní jednotky do provozu musí být vynaloženy finanční prostředky. Cílem každého výrobce je proto naplánovat produkci tak, aby minimalizoval náklady spojené s najížděním a odstavováním kotelních jednotek.

Jedním z řešení, jakým lze dosáhnout zlepšení stávajícího stavu je najít a sestavit matematický model rozsáhlé parokondenzátní sítě, kterou výrobní podnik provozuje. S postupným vytvářením modelu bude dosahováno dílčích cílů:

- V první etapě provést analýzu kvantitativních parametrů výstupující tepelné energie ze zdroje s cílem nalézt a popsat jednotlivé složky tohoto průběhu.
- Na základě nalezených složek připravit mechanismus predikce výroby tepelné energie pro příští období. Tím bude moci výrobní podnik lépe plánovat provoz svých výrobních kapacit a optimalizovat provoz přenosových kapacit tepelné energie.

Tento článek je věnován prvnímu bodu a představuje jednoduchý model spotřeby v síti centrálního zásobování teplem (CZT).

2 Stručný technický popis problému

Pro navržení modelu, který by dobře popisoval spotřebu je nutné analyzovat reálná data skutečného výrobce. V článku jsou analyzována data získaná na základě spolupráce našeho pracoviště s podnikem Dalkia ČR a.s. divize Ústí nad Labem, zajišťující CZT pro větší část města Ústí nad Labem.

Město Ústí nad Labem je zásobováno tepelnou energií prostřednictvím parokondenzátní soustavy z teplárny v blízkých Trmicích, vzdálených od centra města Ústí nad Labem cca 5 km. Zdroj tepelné energie i primární tepelné sítě v Ústí nad Labem provozuje v současné době podnik Dalkia a.s., divize Ústí nad Labem. V současné době je v teplárně instalováno 6 kotlů o celkovém výkonu cca 470 MWt a 5 turbogenerátorů na výrobu elektrické energie o výkonu 88 MWe. Primárními tepelnými napáječi o celkové délce 110 km je dodáváno cca 3 300 TJ tepelné energie v páře za rok. K tepelné síti je připojeno více než 1 300 odběrných míst a zásobuje teplem cca 26 800 domácností a velkou část průmyslových závodů ve městě.

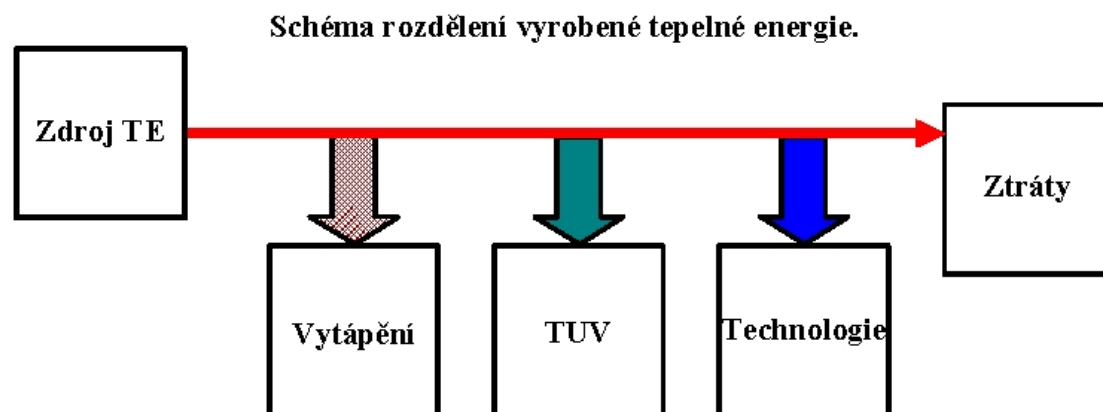
Tepelná energie vyrobená v teplárně je dopravována přehřátou párou do městské distribuční sítě třemi tepelnými napáječi (TN I; TN II; TN III). Jedná se o tři soustavy parního a kondenzátního potrubí, každá o délce cca 5 km, o následujících rozměrech:

- TN I.....parní potrubí DN 500; kondenzátní potrubí DN 200

- TN II.....parní potrubí DN 600; kondenzátní potrubí DN 250
- TN III.....parní potrubí DN 700; kondenzátní potrubí DN 250

Vyrobena tepelná energie je spotřebováána ve čtyřech oblastech.

- Vytápění stavebních objektů
- Příprava teplé užitkové vody
- Technologická spotřeba
- Ztráty jako nevratný děj při přenosu tepelné energie



Obr. 1: Schéma rozdělení vyrobené TE

Vytápění stavebních objektů

Jedná se o spotřebovanou tepelnou energii, která pokrývá tepelné ztráty stavebních objektů prostupem tepla stěnami i provětráváním. V současné době téměř všechny předávací stanice jsou regulovány na ekvitemní teplotu. Z toho vyplývá, že spotřeba tepelné energie koresponduje s vnější teplotou.

Příprava teplé užitkové vody

V tomto případě se jedná o pokrývání spotřeby tepelné energie potřebné k přípravě teplé vody, která zajišťuje sociální a hygienické potřeby obyvatel. Vzhledem k tomu, že teplá voda je spotřebováána především při osobní hygieně, průběh této spotřeby je silně závislý na čase, počtu a skladbě obyvatel. Největší spotřeby se soustředí do časů konců pracovních směn v závodech a do večerních hodin pro sídliště. Přesto, že mnoho menších spotřebitelů si zajišťuje ohřev TUV náhodně během dne, bude z hlediska výrobce TE průběh v čase vzhledem k velkému počtu sledovaných domácností nenáhodný.

Technologická spotřeba

Je spotřeba tepelné energie pro potřeby technologie. Může se jednat o spotřebu pro kontinuální i šaržovou výrobu. Průběh této spotřeby je závislý na produkci daného spotřebitele. Z vyššího pohledu je možno v průběhu této spotřeby nalézt časovou závislost u šaržových spotřebitelů a konstantní u kontinuálních spotřebitelů.

Ztráty

Každý transport tepelné energie je spojen se ztrátami. Ztracenou energii můžeme rozdělit do několika složek.

- První jsou „průsaky“ tepla izolací potrubních rozvodů. Velikost této složky ztrát závisí pouze na rozdílu teplot média a okolního prostředí a na stavu a kvalitě izolace potrubních rozvodů. Z toho je zřejmé, že tato položka je ovlivňována venkovní

teplotou.

- Příčinou druhé složky ztrát je vzniklá disproporce mezi velikostí potrubního rozvodu a dopravovaným množstvím. Důsledkem toho je snížení teploty při pomalejším než optimálním průtoku páry. Naopak při vyšším průtoku dochází ke ztrátě tlaku. V obou případech se tento jev projevuje negativně snížením entalpie. Protože je potrubí počítáno na zimní provoz, častěji nastává první jev. V tomto případě jsou řídicími veličinami venkovní teplota a rychlost média, která závisí na výši odběru.

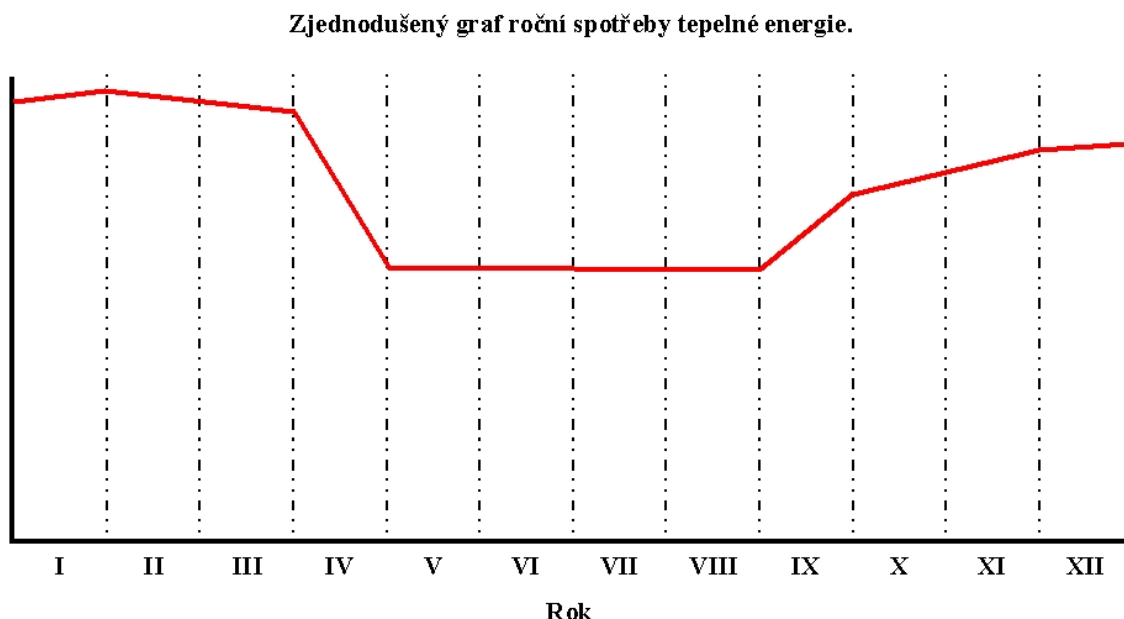
- Poslední položkou jsou poruchy a úniky teplonosného média. Tato položka má charakter náhodné veličiny.

Jednotlivé položky ztrát působí vždy společně, jenom v různých časových okamžicích některá převládá a ostatní mohou být potlačeny.

Pro zjednodušení modelu v první fázi byly zanedbány ztráty, přičemž byly v podstatě rozděleny do ostatních složek.

3 Teoretické předpoklady

Vzhledem k tomu, že dodávaná tepelná energie pokrývá všechny typy spotřeb je roční průběh spotřeby zjednodušeně zachycen v následujícím grafu.



Obr. 2: Zjednodušený graf spotřeby TE

Jedná se o časovou funkci s vanovým průběhem. Na tuto funkci můžeme v teoretické rovině pohlížet jako na časovou řadu a k její analýze můžeme použít příslušný matematický aparát publikovaný například v [1]. Časovou řadu je možno rozdělit do několika složek:

- trendové T_t
- sezónní S_t
- náhodné N_t

Rozdělení do složek může být aditivní, nebo multiplikativní. Protože bude analyzována funkce, která popisuje technický proces dodávky tepelné energie, bude lépe vyhovovat aditivní model, protože výsledky bude možné fyzikálně interpretovat a přiřadit je

jednotlivým oblastem spotřeby.

$$F_t = T_t + S_t + N_t \quad (1)$$

Jak již bylo uvedeno, dodávaná tepelná energie je spotřebováána pro vytápění objektů, technologické procesy, přípravu TUV a pokrytí ztrát.

Vyjdeme-li z tohoto předpokladu, pak velikost energie potřebné k vytápění je závislá na průběhu venkovní teploty, tzn. že ji můžeme považovat za trendovou složku.

Energie pro technologickou spotřebu má buďto trvalý nebo sezónní charakter. Trvalý charakter odběru nazveme základní složkou.

Energie potřebná pro přípravu TUV bude mít sezónní charakter. Sezónní složky budou dvě a délka periody bude jeden den a jeden týden (příprava TUV a technologické procesy utlumované o víkendu)

Vzorec (1) pro popis časové řady tedy modifikujeme následujícím způsobem:

$$F_t = T_t + Sd_t + St_t + Z_t + N_t \quad (2)$$

kde:

T_t je trendová složka ovlivňovaná venkovní teplotou

Sd_t je sezónní složka s periodou jeden den

St_t je sezónní složka s periodou jeden týden

Z_t je základní složka (trvalá dodávka tepelné energie)

N_t je náhodná složka, kterou není možné popsat

4 Rozklad na jednotlivé složky

Pokud chceme analyzovat jednotlivé složky je podle [1] nutné nejprve časovou řadu očistit od trendu. Poté můžeme ve zbytku hledat jednotlivé sezónní složky a základní složku. K tomuto rozkladu bylo vzhledem k velkému množství analyzovaných dat (cca 4 000 000 hodnot) použito prostředí Matlab.

Hledání trendu

Jak již bylo uvedeno, trendová složka závisí na průběhu venkovní teploty. Při poklesu teploty se zvyšuje dodávka TE a naopak. Pro lepší analýzu byla zavedena teplotní funkce, definovaná podle (3).

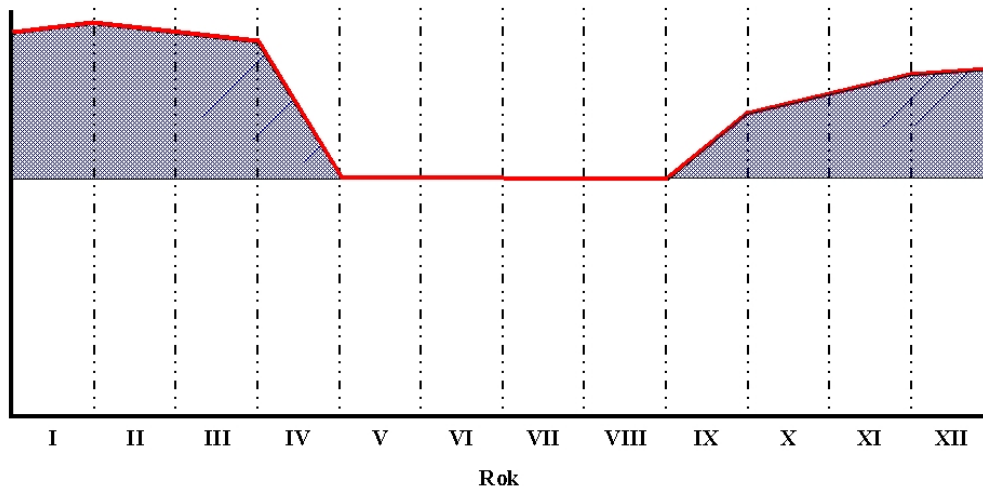
$$TepFce = Koef - \vartheta_{ex} \quad (3)$$

kde: ϑ_{ex} je venkovní teplota ve stupních Celsia

Velikost koeficientu „Koef“ byla zvolena 13°C a to proto, že se jedná o teplotu, kdy se začíná nebo končí s vytápěním. Pokud funkční hodnoty teplotní funkce jsou nezáporné je předpoklad spotřeby tepelné energie pro vytápění a tím i silné závislosti odběru na venkovní teplotě. Z grafu na obr. 2 tomu odpovídá šrafovaná část v obr. 3.

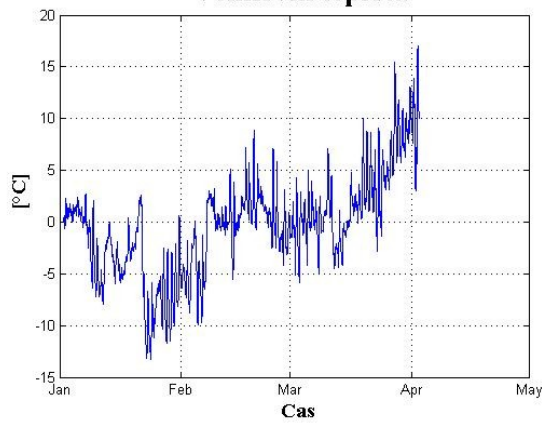
Vzhledem k tomu že předpokládáme závislost na teplotní funkci, je výhodné hledat trendovou složku regresní metodou. Průběh skutečné teploty a teplotní funkce jsou na obr. 4 resp. 5. Průběh dodávaného výkonu v daném časovém období je na obr. 7. Pro pracovníky pohybující se v praxi je výhodnější vyjít z faktu, že výkon je v podstatě reprezentován průtokem páry. Toto je dokumentováno obr. 6, kde průběh průtoků prakticky kopíruje průběhy výkonů z obr. 7.

Zjednodušený graf roční spotřeby tepelné energie.



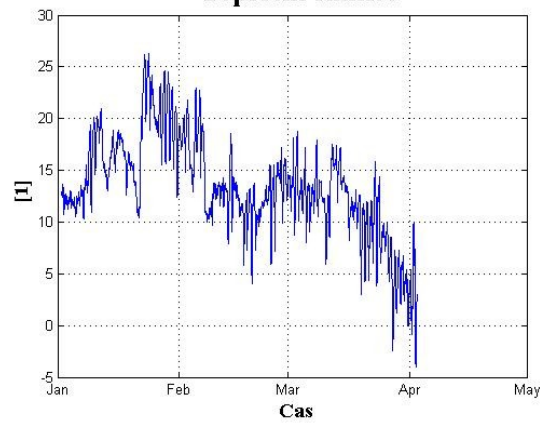
Obr. 3: Znáornění trendové složky v grafu spotřeby TE

Venkovní teplota



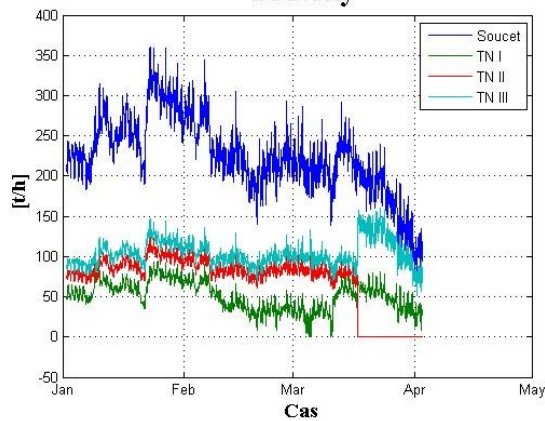
Obr. 4: Průběh venkovní teploty v 2006

Teplotní funkce



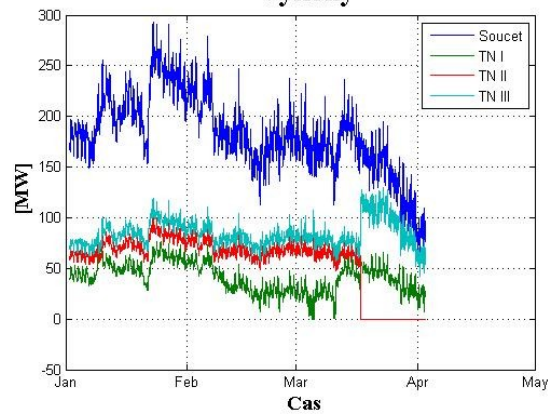
Obr. 5: Průběh teplotní funkce v 2006

Průtoky



Obr. 6: Průtoky jednotlivých napaječů

Výkony



Obr. 7: Výkony jednotlivých napaječů

Jednoduchým porovnáním průběhu celkového průtoku a teplotní funkce je zřejmé, že mezi oběma veličinami bude jednoduchý polynomiální vztah. Proto jsme při regresní analýze zkoumali celkový průtok jako funkci lineární, resp. kvadratickou teplotní funkce.

V prostředí Matlab jsme pro všechna nashromážděná data (přibližně 360 000 párů hodnot) provedli lineární a kvadratickou regresi ve smyslu nejmenších čtverců, založenou na rozložení Vandermondeovy matice. Obdrželi jsme následující výsledky:

Lineární regrese:

$$\text{Průtok} = 98,03 + 9,08 \cdot \text{TeplFce} \quad (4)$$

Kvadratická regrese:

$$\text{Průtok} = 104,02 + 7,32 \cdot \text{TeplFce} + 0,09 \cdot \text{TeplFce}^2 \quad (5)$$

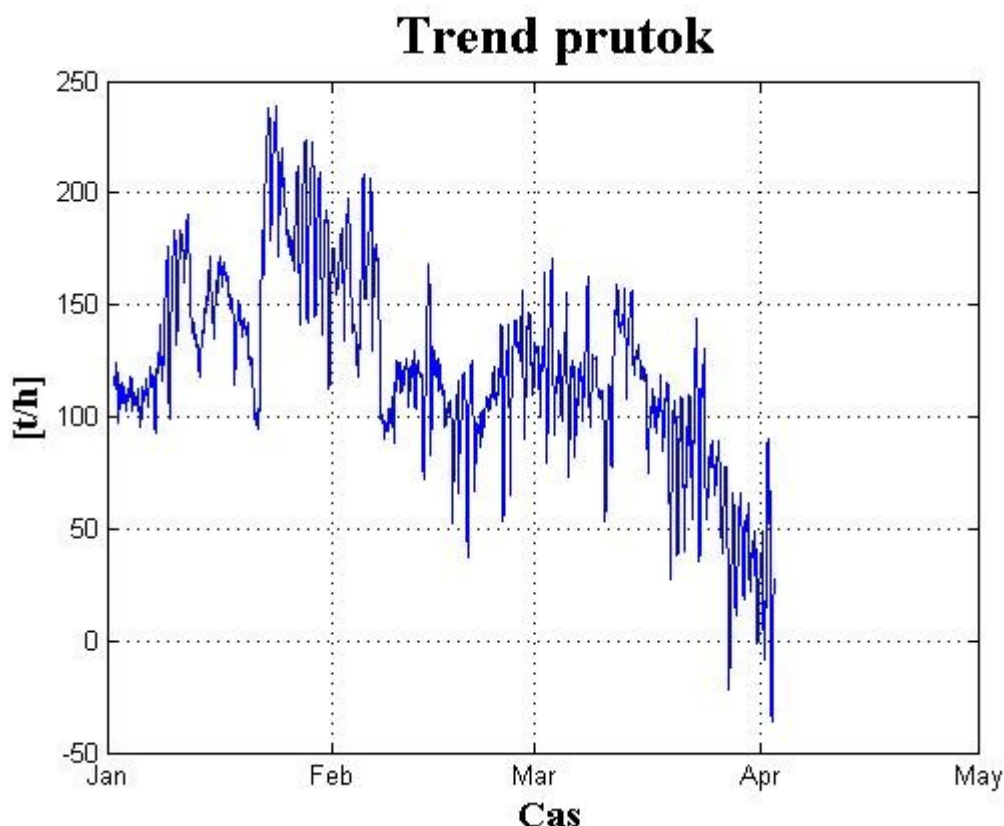
Při porovnání přesnosti obou přístupů jsme došli k závěru, že lineární regrese poskytuje stejně dobré výsledky jako kvadratická. Vzhledem k dalším cílům práce, byla vybrána jednodušší lineární regrese. Polynomiální závislosti vyšších řádů byly prozkoumány až do stupně 5. Zlepšení proti lineární resp. kvadratické regresi bylo zanedbatelné.

Za trendovou složku byla zvolena pouze lineární část ze vzorce (4). Absolutní hodnota byla ponechána jako základ pro určení základní a obou sezónních složek.

Trendová složka časového průběhu dodávky v dané síti CZT tedy je:

$$T_t = 9,08 \cdot \text{TeplFce} \quad (6)$$

Průběh trendové složky je v obr. 8. Začátkem dubna se trendová složka dostává do záporných hodnot, to je dáno zejména tím, že v tomto období teplotní funkce dosáhla záporných hodnot. Prakticky tato situace znamenala, že se přestávala dodávat TE pro potřeby vytápění objektů.



Obr. 8: Trendová složka průtoku

Hledání sezónních složek

Během analýzy byly hledány dvě sezónní složky s periodami den a týden. Sezónní složky můžeme hledat několika metodami. Například metodou aritmetických průměrů, Wintersovou metodou nebo regresním přístupem. Vzhledem k tomu, že podle našich předpokladů nebude snadné denní průběh modelovat jednoduchými goniometrickými funkcemi s periodami den resp. týden, byla využita metoda aritmetických průměrů popsání v [1] vzorcem (7)

$$S_t = \frac{1}{I} \sum_{\tau \in I} \alpha_\tau \cdot x_\tau \quad (7)$$

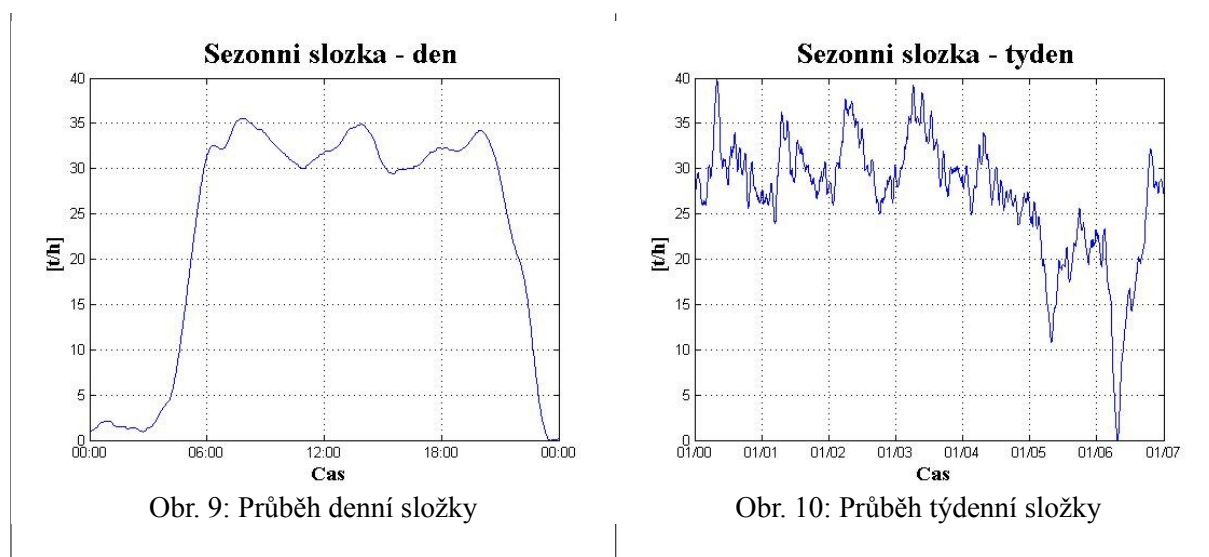
kde:

$\alpha_\tau = 1$ jestliže $\tau = t + k \cdot L$ jinak $= 0$, kde $k \in \mathbf{N}$

x_τ hodnota dané časové řady v čase t

I počet koeficientů $\alpha_\tau \neq 0$

Při hledání sezónních složek se postupuje tak, že nejprve je vyhledána jedna složka, v našem případě se jednalo o denní složku. Časová řada je od této nalezené složky očištěna a vyhledává se druhá, v našem případě týdenní. Po provedení této analýzy byly pro denní a týdenní sezónní složky zjištěny průběhy podle obr. 9 resp. 10.



Z grafů je zřejmé, že i takto odhadnutá týdenní složka stále obsahuje jisté denní opakování. Toto opakování je ovšem výrazně menší než amplituda denní složky. Proto tento výsledek můžeme považovat pro tuto část práce jako dobrý.

Hledání základní složky

Po očištění časového průběhu o trendovou a obě sezónní složky jsme dostali průběh základní a náhodné složky. Pro odstranění náhodné složky jsme použili průměrování hodnot časové řady, které mělo vlastně funkci dolní propusti. Tím jsme zjistili, že základní složka má velikost cca 75 $t_{páry}/hod.$

5 Závěr

V naší práci jsme představili rozložení časové řady naměřených hodnot průtoku resp. dodávaného celkového výkonu do sítě CZT pomocí programu Matlab na následující složky:

- Trendovou složku závislou na venkovní teplotě, která popisuje množství

- energie potřebné pro vytápění objektů.
- Sezónní složky, které popisují změny spotřeby energie v čase v závislosti na hodině a dnu v týdnu.
- Na závěr byla stanovena velikost základní složky, která popisuje spotřebu energie pro kontinuální technologii a ztráty.

Na základě tohoto rozložení jsme získali jednoduchý model popisující dodávku tepelné energie do sítě CZT města Ústí nad Labem. Shoda tohoto modelu se skutečně naměřenými hodnotami je pro průmyslovou výrobu dostatečná.

Tento model může být v budoucnosti použit pro predikci dodávané TE do sítě CZT a pokud se stane součástí automatizovaného řízení dodávky TE může umožnit minimalizaci nákladů spojených s provozem základních zařízení pro výrobou TE.

Dalšími cíli bude vyvíjení systému automatizovaného řízení a ověřování modelu na nově získaných hodnotách, které nebyly dosud použity k výpočtu parametrů modelu.

Použitá literatura:

- [1] Rogalewicz Vladimír – *Stochastické procesy (Analýza časových řad)*; skriptum ČVUT FEL 1993
- [2] Šípál Jaroslav – *Přínosy kvalitní regulace vytápění*; článek v časopisu Energie plyn teplo a peníze 3/1999
- [3] Šípál Jaroslav – *Použití matematického programu ke sledování tepelné sítě*; vystoupení XXV. mezinárodní vědecká konference kateder mechaniky tekutin a termomechaniky 2006

Ing. Jaroslav Šípál PhD,

UJEP; fakulta výrobních technologií a managementu; katedra strojů a mechaniky; Na Okraji 1001; 400 96 Ústí nad Labem; tel 475285515; e-mail: sipal@utrv.ujep.cz