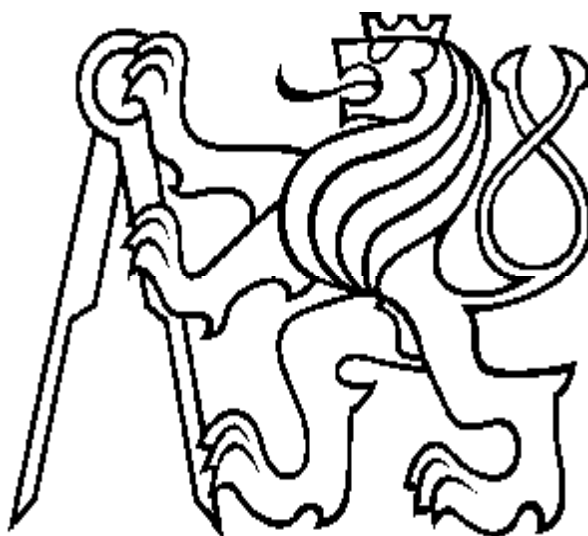


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky



Bakalářská práce

Implementace modelu chování obchodníků s elektrickou energií v liberalizovaném prostředí České republiky

Tomáš Strnad

červen 2006

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Havel

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 27.6.2006

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především Petru Havlovi za možnost podílet se na tomto zajímavém projektu a za cenné rady, které mi byly velmi nápomocné, ať už v oblasti Matlabu, lineárního programování a nebo stylistických věcí v dokumentu. Dál bych rád poděkoval svým rodičům, kteří mi dopřáli vhodné prostředí k práci.

Anotace

V této práci byl v Matlabu implementován model simulující chování obchodníků, kteří nakupují silovou elektřinu na ročním trhu v liberalizovaném tržním prostředí České republiky. K výpočtu ekonomicky optimálního nákupu bylo použito lineární optimalizace, která byla řešena pomocí programu Lpsolve. Výstupem modelu je ekonomicky optimálně pokrytý diagram spotřeby obchodníka, prodaná silová elektřina jednotlivých výrobců a predikovaná systematická obchodní odchylka v přenosové soustavě. Základní principy a verze modelu byly již dříve vytvořeny v rámci jiného projektu, na který tato práce navazuje. Výsledkem je upravený model, který obsahuje řadu vylepšení, jejichž pomocí se více přibližuje realitě.

Abstract

This thesis deals with implementation of a model describing behavior of wholesale electricity traders, who buy electrical energy at one year forward liberalized market of the Czech Republic. Calculations of the economically optimal purchase are performed by linear optimization in Lpsolve tool. The outputs of the model are economically optimal coverage of the consumption diagram, sold electrical energy of each producer and prediction of power disbalance in the transmission system caused by the market. This work is based on principles and the model created in a different project and brings some improvements which help to make the model more realistic

Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Úvod..... | 2 |
| 1.1 | Český trh s elektrickou energií..... | 2 |
| 1.2 | Model zajištění spolehlivosti elektrické soustavy | 3 |
| 1.3 | Model nákupu elektrické energie na straně spotřeby..... | 4 |
| 2 | Model trhu se silovou elektřinou..... | 5 |
| 2.1 | Vstupní data..... | 5 |
| 2.1.1 | Produkty | 5 |
| 2.1.2 | Výrobci..... | 6 |
| 2.1.3 | Obchodníci | 6 |
| 2.1.4 | Ostatní důležité vstupy | 6 |
| 2.2 | Algoritmus obchodování | 6 |
| 2.2.1 | Preference výrobců | 7 |
| 2.2.3 | Algoritmus optimálního nákupu | 8 |
| 2.2.4 | Implementace v Matlabu | 8 |
| 2.2.5 | Výstupy modelu trhu se silovou elektřinou | 14 |
| 2.3 | Testování modelu..... | 15 |
| 2.3.1 | Výchozí nastavení vstupů..... | 15 |
| 2.3.2 | Srovnání se softwarem Lancelot | 18 |
| 2.3.3 | Testy s nastavením podle historických..... | 19 |
| 2.3.4 | Ukázka vlivu vzorkování..... | 25 |
| 2.3.5 | Citlivostní analýza | 26 |
| 2.3.6 | Vyhodnocení výsledků testů s počátečním nastavením..... | 29 |
| 2.3.7 | Upravený model..... | 31 |
| 3 | Závěr | 35 |
| 4 | Literatura | 35 |
| 5 | Příloha | 36 |

1 Úvod

1.1 Český trh s elektrickou energií

Situace na trhu s elektrickou energií v České republice se v posledních několika letech zásadně mění. Důvodem je postupná liberalizace trhu s elektřinou, která byla dokončena 1.1.2006. Nově tak vznikly pravidla a principy, kterými se trh s elektrickou energií řídí a které mají za úkol zajistit bezproblémový chod soustavy. Zajištění spolehlivého provozu přenosové soustavy má za úkol ČEPS, a. s., který je ze zákona jediným držitelem licence na přenos elektřiny. Jeho hlavní činností je poskytování přenosu elektřiny na základě uzavřených smluv a zajišťování systémových služeb na úrovni přenosové soustavy. Systémové služby představují kvalitu a spolehlivost dodávek energie.

Systémové služby se zajišťují jednak vlastními prostředky přenosové soustavy (různými ochranami proti šíření poruch), dále pak nákupem podpůrných služeb od uživatelů přenosové soustavy a ze zahraničí. Podpůrné služby, které nabízejí výrobci, představují zejména regulační rozsah na provozovaném elektrárenském bloku a dále pak možnost rychlého najetí odstavených zdrojů. Tohoto výkonu se využívá v případě nerovnováhy v soustavě, kdy elektrárna sníží nebo naopak zvýší výkon, aby se situace opět srovnala. O stabilní soustavě mluvíme, jestliže je v každém okamžiku rovnováha mezi odebranou a vyrobenou elektrickou energií. Více informací o situaci na českém elektrickém trhu lze nalézt v [1] a [2].

Ukazatelem nerovnováhy soustavy je odchylka salda, která představuje rozdíl mezi odebranou a vyrobenou elektřinou. Pokud je z nějakého důvodu rovnováha v soustavě porušena, tak dochází nepovolenému exportu nebo importu z okolních připojených soustav a ke zhoršení kvality elektrické energie. Zhoršením kvality máme zejména na mysli změnu frekvence a napětí sítě. Při velké odchylce může nastat i rozpad celé sítě, takzvaný black-out. Odchylka může v soustavě nastat z mnoha důvodů. Tyto důvody můžeme rozdělit na predikovatelné a náhodné. Hlavními náhodnými jevy jsou výpadek bloku elektrárny z důvodu technické poruchy, náhlá změna počasí nebo působení ochrany přenosové soustavy, kdy se při závadě může odstavit celá část rozvodné sítě. Mezi predikovatelné důvody patří strategické chování účastníků trhu, například záměrné překupy obchodníků.

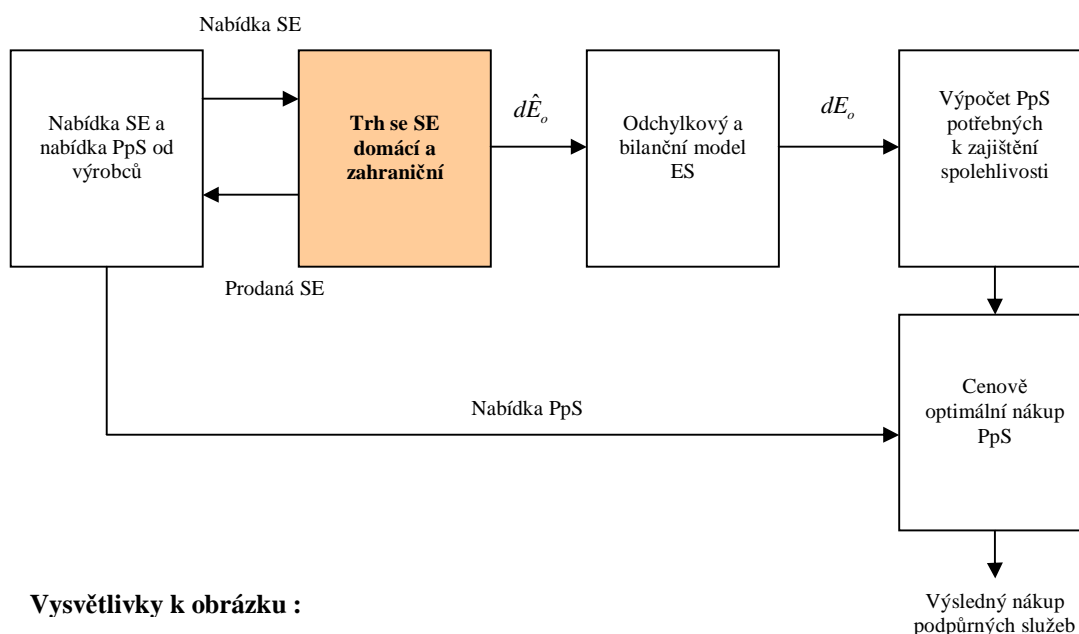
Důvod, proč obchodník záměrně koupí více a nebo naopak méně silové elektřiny, než potřebuje, je čistě ekonomický. Obchodník nakoupí více z důvodu, že ve výsledku zaplatí za celkový nákup méně, když použije pásové produkty, které jsou levnější než špičkové. Z tohoto vyplývá, že se v hodinách, kde nastává pokles poptávky, někdy obchodníkovi vyplatí překoupit, i když zaplatí navíc za odchylku, kterou způsobí, než aby svůj nákup provedl přesně pomocí špičkových produktů. Situace opačná, tedy že obchodník koupí silové elektřiny méně, než potřebuje, nastává z důvodů spekulací, kdy se obchodník domnívá, že cena odchylky bude nižší než cena, kterou by zaplatil za silovou elektřinu.

Nákup podpůrných služeb pro kompenzaci odchylky v soustavě je velice nákladný a je proto z ekonomického hlediska žádoucí tyto náklady minimalizovat. Toto snížení není jenom v zájmu společnosti ČEPS, a. s., ale také všech odběratelů elektrické energie. K ceně elektrické energie se přičítají náklady za systémové služby, jejichž velký podíl

jsou právě náklady na nákup podpůrných služeb. Je proto velice žádoucí znát a předikovat chování odchylky v soustavě a díky těmto informacím nakoupit jenom takové množství podpůrných služeb, které stačí k stabilnímu chodu přenosové soustavy [3].

1.2 Model zajištění spolehlivosti elektrické soustavy

K provedení optimálního nákupu podpůrných služeb je potřeba znát velké množství informací o trhu s elektrickou energií. Model vyvíjený v rámci projektu SESyS, simuluje chování elektrické soustavy a vliv tohoto chování na konečnou odchylku v soustavě s následným výpočtem potřebných podpůrných služeb. Princip celého modelu je představen v zjednodušeném blokovém schématu Obr. 1, podrobné informace o celém projektu lze nalézt v [2].



Vysvětlivky k obrázku :

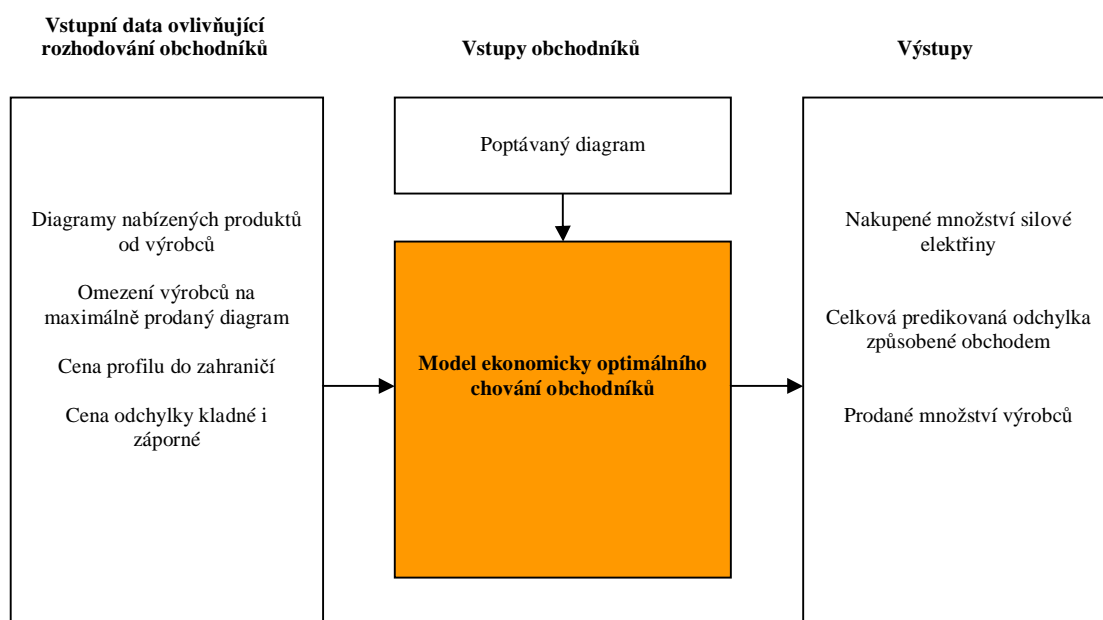
| | |
|--------------|---|
| PpS | Podpůrné služby |
| SE | Silová elektřina |
| dE_o | Odchylka salda energie v otevřené smyčce |
| $d\hat{E}_o$ | Předikovaná odchylka salda výkonu v otevřené smyčce |

Obr. 1 - Principiální schéma celkového modelu spolehlivosti elektrické soustavy

Jako první se v modelu vypočítá nabízené množství silové elektrické energie jednotlivých výrobců. Tato informace se využije během nákupu silové elektřiny obchodníky, kteří pokrývají svůj predikovaný diagram spotřeby. Z tohoto nákupu se určí obchodní odchylka, způsobená záměrnými překupy a nedokupy. K této informaci se v odchylkovém modelu přidají informace o náhodném chování odchylky získané z historických dat. Množina těchto informací vstupuje do „Výpočtu podpůrných služeb“, kde se vypočítá potřebné množství a složení podpůrných služeb, aby byla zajištěna spolehlivost soustavy. Podle informací o potřebném množství a složení podpůrných služeb se nakonec provede cenově optimální nákup těchto služeb od výrobců.

1.3 Model nákupu elektrické energie na straně spotřeby

Moje práce na tomto projektu spočívala ve spoluúčasti na vývoji modelu realizujícího obchod se silovou elektřinou na straně obchodníka pro roční horizont, jehož schéma je na Obr. 2. Obchod se silovou elektřinou se odehrává v unifikovaných produktech. Každý produkt je specifikován svým diagramem, cenou, minimálním a maximálním nabízeným množstvím. Nákup silové elektřiny se provádí s ohledem na ekonomicky optimální chování obchodníků. K simulaci tohoto druhu chování používáme lineární optimalizaci s cílem minimalizace nákladů na nákup produktů a ceny, kterou zaplatí za způsobenou odchylku. Základní principy, které jsou v modelu použity jsou popsány v [4].



Obr. 2 - Model trhu se silovou elektřinou

Tento model je velice citlivý na vstupní údaje ovlivňující rozhodování obchodníků. Mezi nejdůležitější patří diagramy a cena nabízených produktů, očekávaná cena kladné a záporné odchylky a samozřejmě i omezení výrobců na maximálně prodané množství, což reprezentuje objem silové elektřiny, který je výrobce v dané hodině ochoten prodat.

Výsledkem mé práce bylo zdokonalení existujícího modelu trhu se silovou elektřinou. Do modelu jsem přidal omezení bílé elektřiny, díky němuž nákup obchodníka splňuje podmínky pro její obchodování a intervaly cen odchylky, které reprezentují myšlenku, že je cena odchylky závislá na její velikosti. Dalšími vylepšení je možnost vzorkování problému, díky kterému se simulace značně urychlí, řešení situací s převisem poptávky a kratší produkty, se kterými se obchoduje na kratších horizontech, a proto mají také vliv na výsledky obchodování. Všechny části, na kterých jsem pracoval, jsou postupně popsány v následujících odstavcích.

2 Model trhu se silovou elektřinou

V této kapitole je podrobně popsán model trhu se silovou elektřinou. V prvních odstavcích je popsán algoritmus obchodování a data, která do modelu vstupují. Další část je věnována testování modelu, citlivostní analýze, úpravám a rozboru rozdílů s realitou. Poslední odstavec obsahuje test modelu s úpravami navržených na základě předchozích testů.

2.1 Vstupní data

Všechny vstupní data se zadávají do excelovských tabulek, z kterých se poté načítají do Matlabu. Je to z důvodu jednodušší editace pro normálního uživatele, který tak nemusí ovládat Matlab a přesto si může snadno měnit vstupy.

2.1.1 Produkty

Tento vstup reprezentuje produkty, se kterými se obchoduje na elektrickém trhu. Obecně je můžeme rozdělit do dvou kategorií. První jsou produkty, které prodává ČEZ, a. s., v rámci duhové kampaně, tyto produkty jsou charakterizovány svým diagramem, maximálním, minimálním nabízením množstvím a samozřejmě také cenou za MWh. Jsou to:

- Roční pásmo
- Roční pásmo pracovní dny
- Roční špička v pracovních dnech 8-20 hod
- Roční špička v pracovních dnech 6-22 hod
- Kvartální pásmo
- Kvartální pracovní špička 8-20 hod
- Měsíční pásmo
- Měsíční špička v pracovních dnech 8-20 hod
- Měsíční špička v pracovních dnech 6-22 hod

Do druhé kategorie patří speciální produkty jako například bílá elektřina, která nemá žádný předem určený diagram a obchodník si ji koupí určité množství, které poté může s určitým omezením rozepisovat na jednotlivé hodiny během roku. Dalším speciálním produktem jsou konkrétní diagramy výrobce. Tento produkt je zjednodušením obchodování malých výrobců, ke kterému jsme přistoupili, protože o jejich obchodech nemáme přesné informace. Diagram výrobců obsahuje informaci, kolik elektřiny v každé hodině výrobce nabízí. Obchodník si tento produkt může buď nekoupit nebo koupit jako celý diagram.

Omezení, které se vztahuje k produktu bílá elektřina je definováno v obchodních podmínkách společnosti ČEZ, a. s. Hlavní podmínka, kterou modelu obsahuje, spočívá v omezení maximálně odebraného množství v hodině,

$$P_{\max} = \frac{W}{15.d}, \quad (2-1)$$

kde

P_{\max} – maximálně odebrané množství v hodině v daném kalendářním měsíci

W – koupený objem elektřiny v daném kalendářním měsíci
d – počet pracovních dní v kalendářním měsíci

Toto omezení se vztahuje jenom na hodiny v pracovní den od 6-22 hodin. Další specialitou tohoto produktu je fakt, že obchodník si na ročním trhu koupí určité množství, které v průběhu roku rozděljuje do jednotlivých měsíců a poté v průběhu každého měsíce množství, které si na daný měsíc přidělil, rozděljuje do týdnů vždy s týdenním předstihem. Úskalí tohoto systému spočívá v tom, že když si obchodník rozdělí do měsíce takové množství, ze kterého v průběhu daného měsíce nedokáže rozepsat do týdnů aspoň 95 % objemu elektřiny, tak zaplatí za každý nerozepsaný MW 300 Kč. Tato situace může nastat například v důsledku teplotně nadprůměrného zimního měsíce. Obchodník si na tento měsíc přidělí určité množství silové elektřiny, ale protože je tento měsíc teplotně nadprůměrný, je menší spotřeba elektrické energie a obchodníkovi již koupená elektřina zbude.

2.1.2 Výrobci

Každý výrobce je definovaný svými nabízenými produkty, maximálním nabízeným množstvím a dále pak svým identifikačním číslem, jehož význam bude vysvětlen v odstavci 2.2.1. Import je v modelu reprezentován jedním speciálním zahraničním výrobcem.

2.1.3 Obchodníci

Obchodníci jsou charakterizováni poptávaným diagramem, který se snaží optimálně pokrýt. Poptávaný diagram je hodinový vektor, kde v každé hodině je hodnota poptávaného množství elektrické energie. Export je v modelu reprezentován jedním speciálním obchodníkem, který nakupuje elektřinu na domácím trhu a vyváží jí do zahraničí.

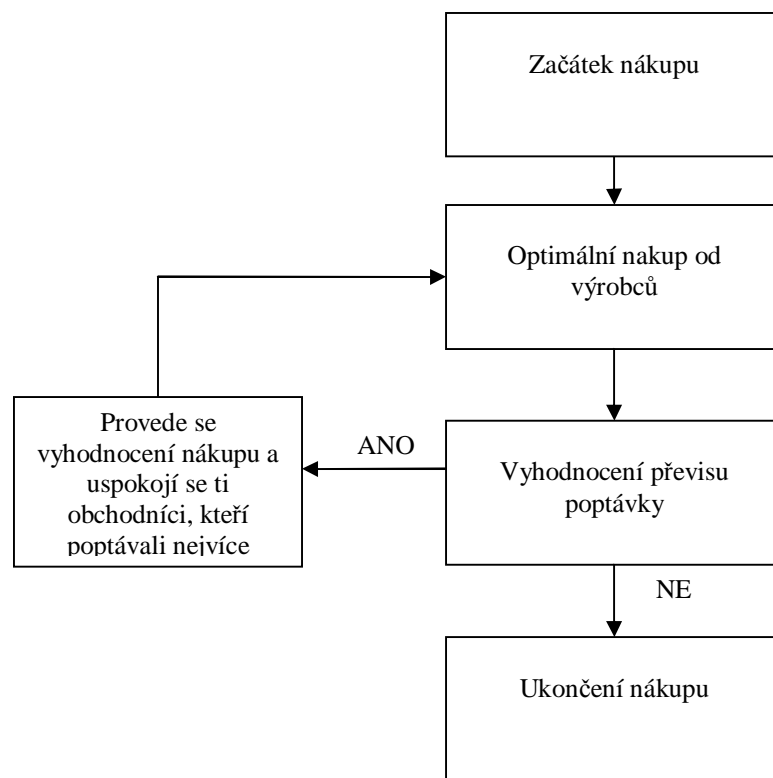
2.1.4 Ostatní důležité vstupy

Dalším vstupem ovlivňujícím rozhodování obchodníků jsou ceny profilu. Jsou to ceny, které zaplatí za pronájem profilu vedoucího přes hranice v případě, že chce elektrickou energii vyvážet (obchodník reprezentující vývoz) a nebo dovážet (obchodník z ČR kupující ze zahraničí). Velký vliv na konečný nákup má také cena za odchylku. Cena odchylky není známa rok dopředu, což je doba na kterou děláme simulaci, a proto jsme vycházeli z cen odvozených z historických dat. Tato předpověď je jenom orientační, ale skuteční obchodníci lepší informace v ročním horizontu také nemají, a proto se dá předpokládat, že s touto cenou kalkulují.

2.2 Algoritmus obchodování

Algoritmus nákupu obchodníka je znázorněn na Obr. 3. V prvním kroku se každý obchodník zvlášť snaží optimálně poskládat svůj diagram z nabízených produktů. Nabídka produktů se pro každého obchodníka upraví podle preferencí výrobců (odstavec 2.2.1) a také se zohledněním ceny profilu. Po provedení nákupu všech obchodníků se vyhodnocuje, zda nedošlo k převisu poptávky (výrobce v součtu prodal víc, než mu dovoluje diagram maximálně nabízeného množství). Může k němu dojít, protože omezení na maximálně nabízený diagram výrobců je aplikováno zvlášť pro každého obchodníka. Je proto nutné tuto situaci detekovat a řešit. Jestliže k převisu

dojde, jsou obchodníci uspokojováni postupně podle velikosti jejich nákupu (první je uspokojen obchodník, který chtěl koupit nejvíce), až do vyčerpání nabídky výrobce. Poté se optimalizace spustí znovu jenom s obchodníky, kteří způsobili převis a jejichž nákup nebyl při postupném uspokojování proveden. Před dalším průběhem simulace se upraví maximálně prodaný diagram výrobce podle toho, kolik už prodal v předchozím nákupu. Jestliže dojde opět k převisu, tak se celá situace opakuje, až do uspokojení všech obchodníků.



Obr. 3 - Algoritmus nákupu obchodníků

2.2.1 Preference výrobců

Preference nákupu od určitého výrobce jsou v modelu zastoupeny bází fuzzy pravidel, v nichž jsme se snažili zachytit ochotu obchodníků nakupovat produkty od určitého výrobce. Fuzzy pravidla jsou ve tvaru:

IF předpoklad₁ AND předpoklad₂ THEN výsledek

Například obchodník patřící do divize ČEZ, a. s., má velmi malou ochotu nakupovat od výrobců ze zahraničí, ale ochotu nakupovat pásové produkty od ČEZ, a. s., pochopitelně velmi velkou. Podklady pro vytvoření těchto pravidel jsme získali z konzultací s lidmi z praxe. V modelu se preference aplikují přenásobením cen produktů od nepreferovaných výrobců konstantou větší než jedna. Toto přenásobení ve výsledku způsobí, že obchodník si nepreferovaný produkt nekoupí, protože jeho cena je uměle navýšena.

2.2.3 Algoritmus optimálního nákupu

Každý obchodník se snaží svůj diagram pokrýt optimálně, to znamená minimalizovat částku, kterou zaplatí za produkty a částku, kterou zaplatí za odchylku způsobenou překupy nebo nedokupy. Tuto úlohu můžeme vyjádřit rovnicí (2-2):

$$\begin{aligned} & \min_Q (\text{cena za nakoupené produkty} + \text{cena za odchylku}) = \\ & = \min_Q \left(\sum_{i=1}^n K_{SEi} C_{SEi} Q_{SEi} + \sum_{h=1}^l C_{Bh} Q_{Bh} + \sum_{h=1}^l C_{REh} \left(\sum_{i=1}^n Q_{SEi} p_{SEi}(h) - d(h) \right) \right) \end{aligned} \quad (2-2)$$

kde SE označuje silovou elektřinu, RE regulační energii (systémovou odchylku) a

| | |
|---------------|--|
| n | počet silových produktů (dohromady od všech výrobců), |
| i | index produktu, |
| l | počet hodin simulačního intervalu, |
| C_{Bh} | cena bílé elektřiny v hodině h , |
| Q_{Bh} | koupené množství bílé elektřiny v hodině h , |
| C_{SEi} | cena silového produktu i (včetně případné ceny za profil), |
| Q_{SEij} | koupené množství silového produktu i , |
| C_{RE} | cena odchylky v hodině h (závislá na její velikosti a polaritě), |
| $p_{SEij}(h)$ | jednotková hodnota silového produktu i v hodině h (0 nebo 1), |
| $d(h)$ | diagram spotřeby obchodníka v hodině h . |

Koeficient K_{SE} vyjadřuje preference obchodníků k produktu, který nabízí určitý výrobce. Tento koeficient se zjišťuje na základě fuzzy pravidel, jejichž použití je popsáno v odstavci 2.2.1.

2.2.4 Implementace v Matlabu

K řešení lineárně optimalizační úlohy jsme použili nástroj Lpsolve [5]. Tento nástroj jsme zvolili, jelikož je volně dostupný pro nekomerční i komerční použití. K načítání vstupních dat a jejich zpracování do formátu použitého v nástroji Lpsolve jsme použili programové prostředí Matlab. Pro aplikaci fuzzy pravidel byl vybrán nástroj Fuzzy Designer.

Naše optimalizační úloha je popsána v rovnici (2-2). Vzhledem k tomu, že je cena odchylky závislá na polaritě a velikosti musíme náš problém rozepsat do tvaru lineárně optimalizační úlohy. Jak se provede, je znázorněno v jednoduchém příkladu:

Pro zjednodušení budeme uvažovat, že rok má jen 2 hodiny a máme pouze hodinové produkty (aktivní jenom v jednu hodinu), pak naše úloha by vypadala takto:

$$\min (c_1 x_1 + c_2 x_2 + \max(-c_{z1}(x_1 - d_1), c_{k1}(x_1 - d_1)) + \max(-c_{z2}(x_2 - d_2), c_{k2}(x_2 - d_2)))$$

kde c_i je cena silové elektřiny v dané hodině, x_i koupené množství v dané hodině, c_{zi} cena záporné odchylky v hodině i , c_{ki} cena kladné odchylky, d_i poptávaná hodnota výkonu v hodině i .

lze ji přepsat na tvar

$$\min (c_1 x_1 + c_2 x_2 + z_1 + z_2),$$

kde z_i představuje cenu, kterou obchodník zaplatí za odchylku v hodině i za podmínky:

$$\begin{aligned} -c_{z1}(x_1 - d_1) &\leq z_1 \\ c_{k1}(x_1 - d_1) &\leq z_1 \\ -c_{z2}(x_2 - d_2) &\leq z_2 \\ c_{k2}(x_2 - d_2) &\leq z_2 \end{aligned}$$

což lze přepsat na

$$\begin{aligned} -c_{z1}x_1 - z_1 &\leq -c_{z1}d_1 \\ c_{k1}x_1 - z_1 &\leq c_{k1}d_1 \\ -c_{z2}x_2 - z_2 &\leq -c_{z2}d_2 \\ c_{k2}x_2 - z_2 &\leq c_{k2}d_2 \end{aligned}$$

Vektor proměnných je tedy:

$$f = [x_1 \quad x_2 \quad z_1 \quad z_2].$$

Omezení se zapisuje ve tvaru:

$$Ax \leq b,$$

kde

$$A = \begin{bmatrix} -c_{z1} & 0 & -1 & 0 \\ c_{k1} & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -c_{z2} & 0 & -1 \\ 0 & c_{k2} & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

a

$$b = \begin{bmatrix} -c_{z1}d_1 \\ c_{k1}d_1 \\ -c_{z2}d_2 \\ c_{k2}d_2 \end{bmatrix}.$$

Účelová funkce problému vypadá po přepsání z původního vztahu (2-2) podle příkladu takto :

$$\min_Q \left(\sum_{i=1}^n C_{SEi} Q_{SEi} + \sum_{h=1}^l C_{Bh} Q_{Bh} + \sum_{h=1}^l Z_h \right), \quad (2-3)$$

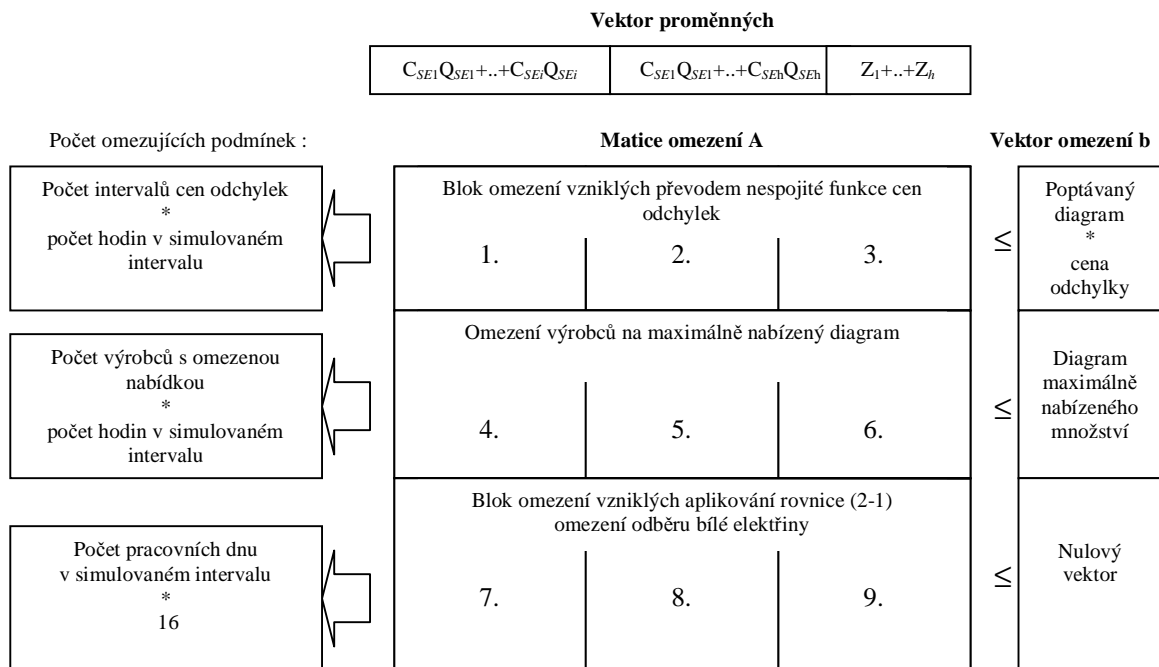
| | |
|------------|--|
| n | počet silových produktů (dohromady od všech výrobců), |
| i | index produktu, |
| l | počet hodin simulačního intervalu, |
| C_{SEi} | cena silového produktu i (včetně případné ceny za profil), |
| Q_{SEij} | koupené množství silového produktu i , |
| C_{Bh} | cena bílé elektřiny v hodině h , |
| Q_{Bh} | koupené množství bílé elektřiny v hodině h , |
| Z_h | suma kterou obchodník zaplatí za odchylku v hodině h |

Struktura matice omezení je zobrazena na Obr. 4. Každý blok matice omezení je dále rozdělen na 3 menší bloky, které reprezentují skupiny proměnných z účelové funkce a v obrázku jsou číslovány 1-9. Struktura takovýchto bloku je dobře vidět v příkladě (2-1) Blok 1 je tvořen diagramy produktů přenásobených cenou odchylky. Bloky 2 a 3 jsou totožné a tvoří je jednotková matice, což je vlastně diagram bílé elektřiny a odchylky, obě jsou totiž aktivní pouze v jedné hodině intervalu. Diagonální matice v 2 a 3 bloku jsou stejně jako v bloku 1 přenásobeny cenou odchylky. Převodem nespojitě funkce cen odchylek dostaneme pro každý interval cen odchylky tolik podmínek, kolik je hodin v simulačním intervalu (pro rok 2005 to činí 8760 podmínek).

Dalším blok znázorněný na Obr. 4 reprezentuje omezení na maximálně prodaný diagram výrobců, což znamená, že součet koupené silové elektřiny všech produktů, které výrobce nabízí, v každé hodině nesmí překročit maximálně nabízené množství v dané hodině. Toto omezení se tvoří pro každého obchodníka s omezením na maximálně nabízený diagram a jeho struktura je opět vysvětlena po menších blocích 4-6. Blok 6 je nulové matice, bloky 4 a 5 jsou tvořeny diagramy produktů a bílé elektřiny, které nabízí výrobce s omezením na nabízený diagram. Počet omezení je závislý na počtu výrobců s omezenou nabídkou, pro každého výrobce se vytvoří tolik podmínek, kolik je hodin v simulovaném intervalu.

Posledním blokem v matici omezení je omezení na odběr bílé elektřiny (odstavec 2.1.1). Omezení je vytvořeno tak, že v každé hodině, na které se omezení vztahuje, obchodník může odebrat maximálně množství upravené rovnicí (2-1). Bloky 7 a 9 jsou nulové matice a blok 8 je rozdělen na specifikované měsíce. Rozdělení po měsících je dáno charakterem omezení (odstavec 2.1.1). Každý řádek reprezentuje omezení pro jednu hodinu. Počet omezení způsobených omezením bílé elektřiny je závislý na počtu pracovních dní v měsících, po které děláme simulaci a pohybuje se kolem čísla 4200.

Celkový počet omezení se tedy pro tři intervaly cen odchylek kladné a záporné pohybuje okolo 50000.



Obr. 4 – Struktura matice omezení

Náš optimalizační problém je v důsledku velkého množství proměnných a omezení velmi časově náročný. V první části Tab. 1 je tato náročnost zobrazena pro jednoho obchodníka s různými nastaveními vstupních veličin. Simulace byly prováděny na počítači s procesorem Pentium 4 3,6 GHz, 2 GB RAM, operační systém Windows server 2003. Nákup České republiky se zahraničím reprezentujeme poptávkou 8 hlavních obchodníků, z čehož plyne, že se simulační čas při nastavení tří intervalů cen kladné a záporné odchylky vyšplhá přes hodinu a půl. Toto byl důvod, navzorkování problému. Při spuštění simulace si uživatel může vybrat ze čtyř druhů vzorkování:

- *Hodinové*
Při tomto nastavení proběhne simulace bez vzorkování tj. po hodinách.
- *Týdenní*
Neekvidistantní vzorkování po týdnech, ve kterém je každý týden reprezentovaný čtyřmi hodnotami, jimiž jsou průměrné hodnoty v „pracovní den“, „pracovní noc“, „nepracovní den“ a „nepracovní noc“. Nocí rozumíme dobu mezi 0-8 a 20-24 hodinou. Navíc se zvlášť vzorkují speciální dny, které vybočují z normálů, jako například vánoce nebo Silvestr. Tyto speciální dny jsou reprezentovány dvěma průměrnými hodnotami přes „noc“ a „den“.
- *Denní*
V tomto vzorkování je každý kalendářní den reprezentován průměrnou hodnotou pro den a pro noc.
- *Periodické*
V tomto posledním vzorkování si uživatel sám vybere, po kolika hodinách chce aby se den navzorkoval. Jestliže si vybere po 2 hodinách, bude každý den reprezentován 12 hodnotami.

Poptávané diagramy jsou vzorkovány průměrováním hodnoty po daný vzorkovací interval. Pro vzorkování cen odchylek, profilu a bílé elektřiny bylo použito sečtení hodnot po vzorkovací interval. To bylo učiněno po úvaze, že pokud si obchodník koupí bílou ve vzorkovaný interval znamená to, že si jí koupí ve všech hodinách, který tento interval obsahuje a tudíž zaplatí za všechny hodiny. Ta samá situace nastává při platbě za odchylku. Při vzorkování maximální hodnoty nabízené silové elektřiny se vybírá minimum v daný vzorkovaný interval a to z důvodu, aby se určitě nemohlo stát, že v některé hodině výrobce prodá více než mu umožňuje omezení. Při vzorkování diagramu produktu musíme zajistit, aby produkt byl ve vzorkovaném intervalu aktivní jenom v případě, když je nevzorkovaný diagram produktu aktivní ve všech hodinách vzorkovaného intervalu.

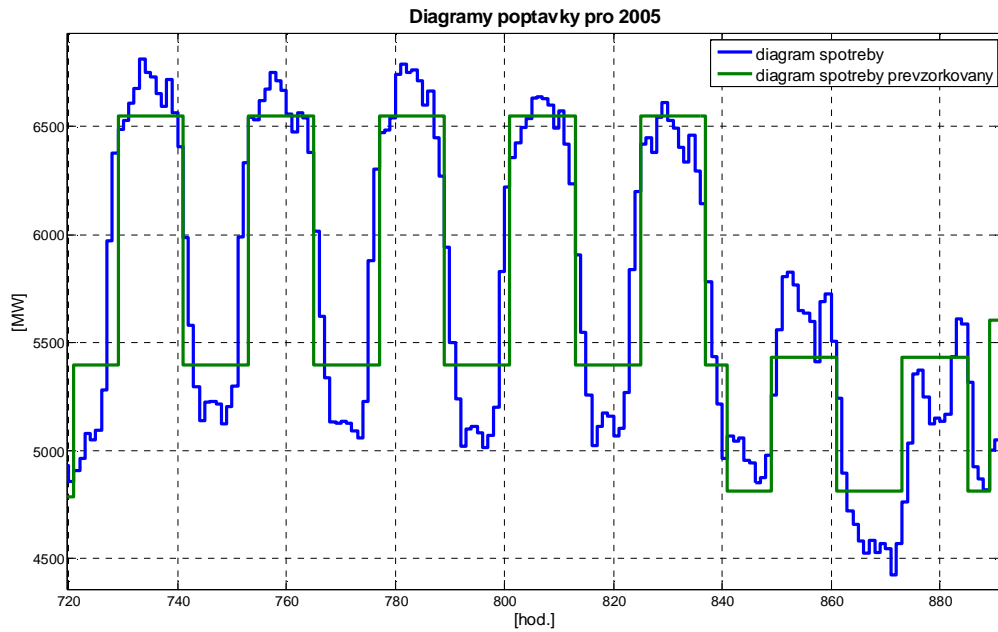
Ukázkám vzorkování a jejímu vlivu na předikovanou odchylku v soustavě se budu věnovat v odstavci 2.3. Na Obr. 5, Obr. 6 a Obr. 7 je znázorněno, jak se průměrování poptávaného diagramu projeví na jeho tvaru pro všechny typy vzorkování. Z obrázku je patrné, že k největší chybě dochází v ranních hodinách mezi 4. až 6. a poté ve večerních hodinách mezi 20. až 22. hodinou. V těchto hodinách totiž nastávají nejstrmější změny poptávky.

Tab. 1 - Časová náročnost problému nákupu jednoho obchodníka

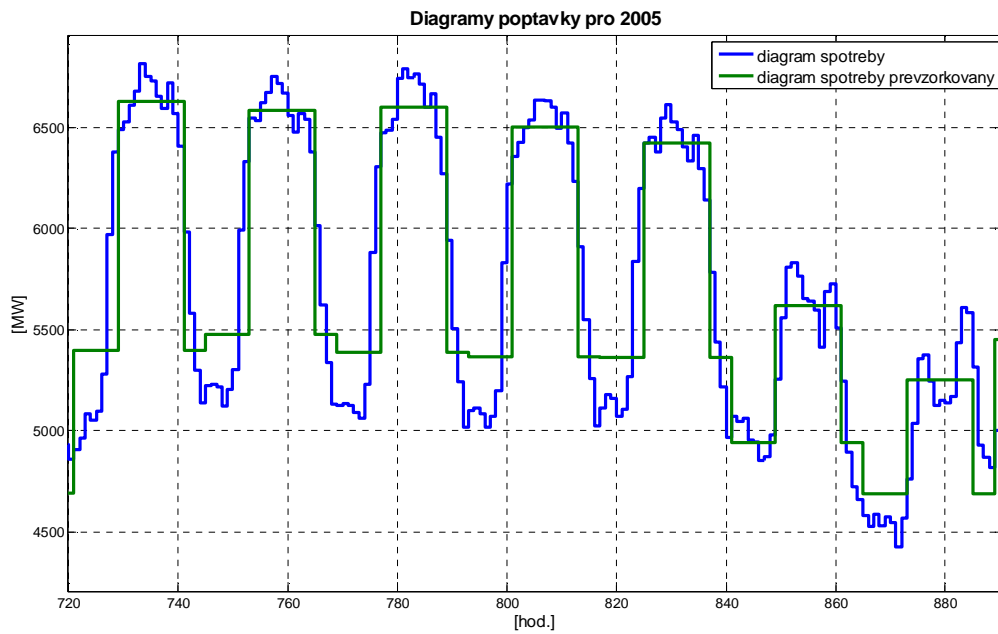
| Nastavení modelu | | S omezením na bílou elektřinu | | Bez omezení na bílou elektřinu | |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Počet použitých intervalu odchylek | vzorkování | Příprava dat | Lineární optimalizace | Příprava dat | Lineární optimalizace |
| 6 | hodinové | 50 s | 550 s | 33 s | 164 s |
| 4 | hodinové | 22 s | 440 s | 20 s | 110 s |
| 2 | hodinové | 15 s | 320 s | 12 s | 55 s |
| 6 | týdenní | X | X | 14 s | 0.1 s |
| 6 | denní | X | X | 34 s | 0.7 s |
| 6 | Periodické (2 hodinové) | 200 s | 140 s | 140 s | 34 s |

Z Tab. 1 je vidět, že nejvíce časově náročná je lineární optimalizace. Výjimku tvoří průběhy, kde bylo použito vzorkování a vstupy se tedy musely více upravovat. Snížení času potřebného na lineární optimalizaci za cenu zvýšení času potřebného na přípravu dat je pro nás přijatelné, jelikož se uplatní jenom jednou, a proto když bude nakupovat více obchodníků, tak se simulace prodlouží jenom o čas potřebný pro lineární optimalizaci dalšího obchodníka. Místa v tabulce označena křížkem znamenají, že omezení bílé elektřiny pro toto vzorkování není v modelu obsaženo. Je tak učiněno, protože při hrubším vzorkování (týdenním a denním) se omezení neuplatní, obchodník

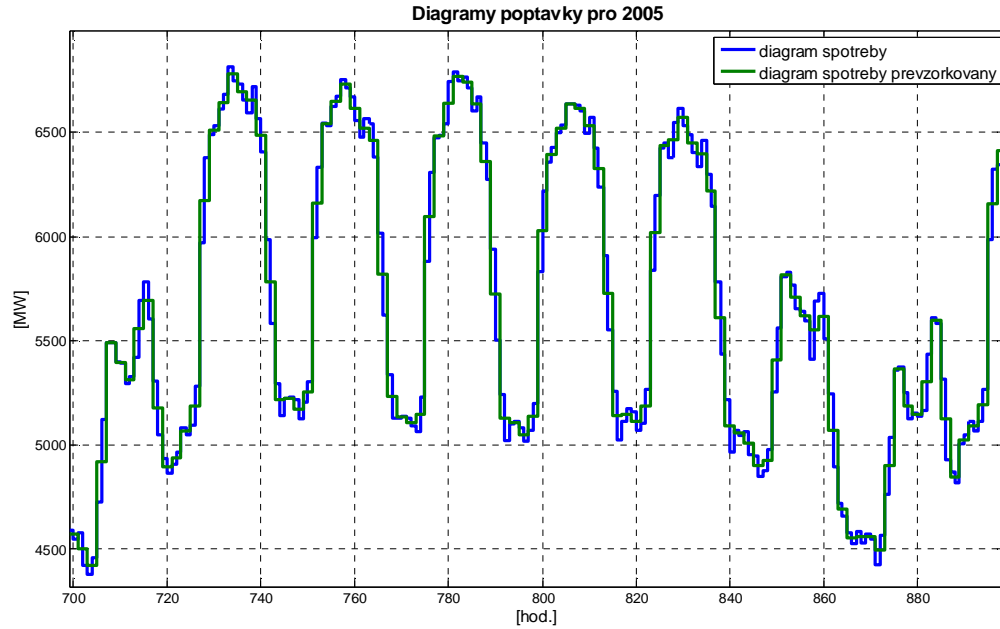
totiž bílou elektřinu nekoupí, protože se mu vyplatí diagram poskládat z jiných produktu.



Obr. 5 - Diagramy poptávky při týdenním vzorkování



Obr. 6 - Diagramy poptávky při denním vzorkování



Obr. 7 - Diagramy poptávky při periodickém 2 hodinovém vzorkování

2.2.5 Výstupy modelu trhu se silovou elektřinou

Z modelu vystupují tyto veličiny

- *Nakoupený diagram obchodníků*
Tento výstup je důležitý jenom v oblasti kontroly správné funkce modelu. V dalších částech modelu zajištění spolehlivosti elektrické soustavy se nepoužívá.
- *Diagram prodané silové elektřiny výrobce*
Využívá se v modelu nabídky SE (Obr. 1), kde tyto údaje ovlivňují výpočet množství nabízených podpůrných služeb.
- *Velikost predikované odchylky*
Hodinový diagram odchylky v soustavě způsobené optimalizací nákupu (Obr. 1), který dále vstupuje do odchylkového modelu elektrické soustavy a má vliv na výpočet potřebného množství podpůrných služeb pro zajištění spolehlivosti soustavy.

2.3 Testování modelu

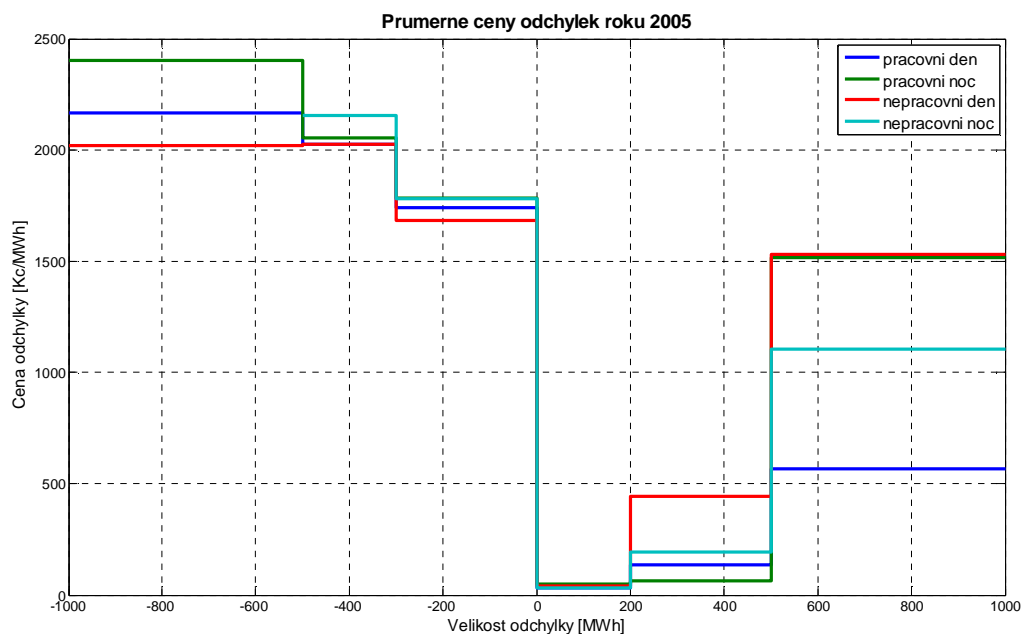
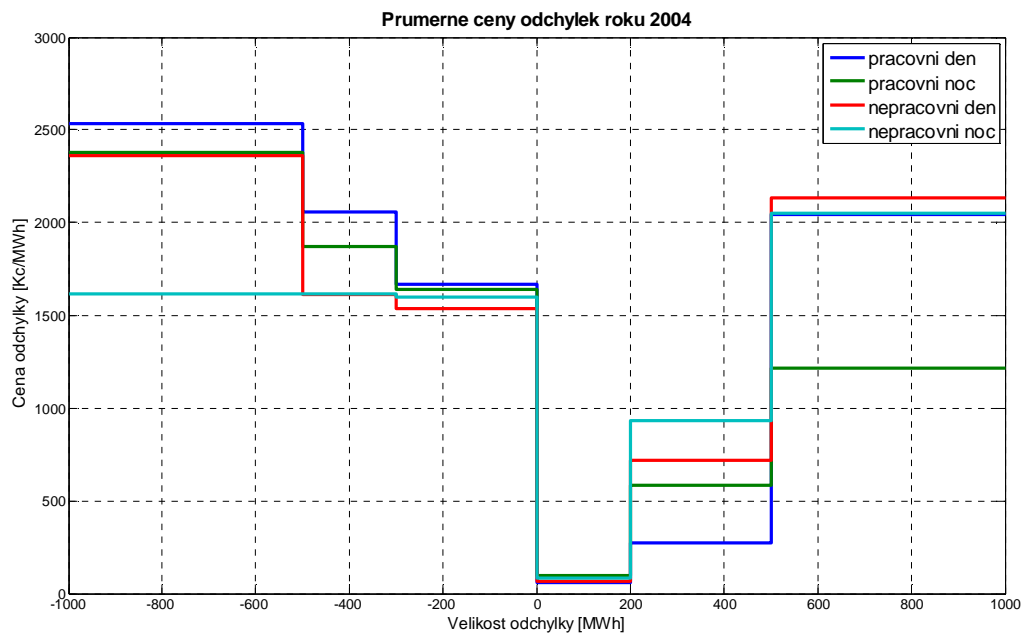
Testování modelu jsem prováděl pro roky 2004 a 2005 z důvodu možného porovnání výsledků simulace s reálnou situací na trhu získanou z historických dat. Abychom mohli výsledky našeho modelu s realitou srovnávat, snažíme se vstupní data co nejvíce přiblížit predikcím, které provádějí obchodníci při ročním obchodování.

2.3.1 Výchozí nastavení vstupů

Pro výchozí testování modelu byla použita data uvedená níže:

- *Nabídka produktů*
Nabídka společnosti ČEZ, a. s., v rámci duhové kampaně je veřejná a tudíž jsme použili data z ceníku pro daný rok, ceny jsou ukázány v příloze. U malých výrobců je situace složitější, jelikož jsou jejich obchody neveřejné. Použili jsme tedy jako nabízený diagram jejich skutečnou výrobu a nastavili jsme cenu nižší, než za jakou nabízí produkty ČEZ, a. s., jelikož víme, že malý výrobce v letech pro které děláme simulace, nastavil takovou cenu, aby jí obchodník přijmul.
- *Poptávané diagramy obchodníků*
Poptávané diagramy, které se obchodníci snaží pokrýt na ročním horizontu nejsou veřejné, a proto jsme se je pokusili sestavit ze známých dat. Navíc nemodelujeme nabídku silové elektřiny od všech výrobců na českém trhu, ale jenom těch největších, je tedy nutno poptávané diagramy snížit o spotřebu, která je pokryta z nemodelované části výroby a počítat s tím, že se celá prodala. Typický tvar poptávaného diagramu pro rok 2005 pro celou Českou republiku je vidět na Obr. 9. Na Obr. 10 jsem zobrazil diagram poptávky v detailu, abych ukázal, jak se mění v průběhu týdne. V simulacích byl použit diagram reprezentující poptávku celé České republiky místo 8 hlavních obchodníků, důvodem byl velký výpočetní čas, a fakt že pro účely testování funkčnosti a chování modelu, je přesnost takto získané předpovědi postačující.
- *Cena odchylky*
Použitá cena odchylky pro roky 2004 a 2005 je odvozena ze statistického vyhodnocení cen pro daný rok, které na svém webu zveřejnila společnost OTE. Cenu odchylky jsme rozdělili podle časových pasem (pracovní den, pracovní noc, nepracovní den a nepracovní noc). Učinili jsme tak z předpokladu, že se v těchto obdobích liší i cena regulační energie a tudíž se dá předpokládat, že bude i různá cena systémové odchylky. Cena odchylky je navíc rozdělena podle velikosti odchylky, jelikož při nárůstu odchylky je použita dražší regulace. Na Obr. 8. je vidět rozložení cen odchylky pro rok 2004 a 2005. Je ovšem nutno si uvědomit, že ceny pro velké odchylky jsou průměry pouze z malého počtu hodnot, jelikož z velkým odchylkám nedochází příliš často.
- *Cena za profil*
Cena profilu byla stanovena z historických cen proběhlých aukcí, zveřejněných na internetových stránkách společnosti ČEPS

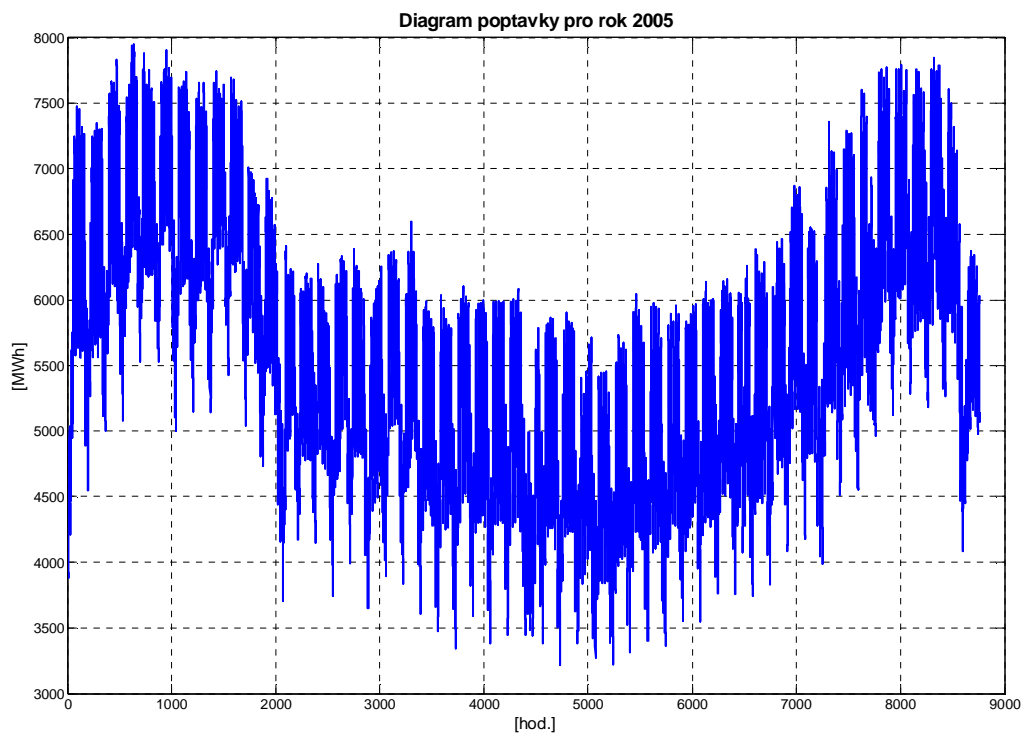
Bližší popis získání těchto dat je uveden v [4].



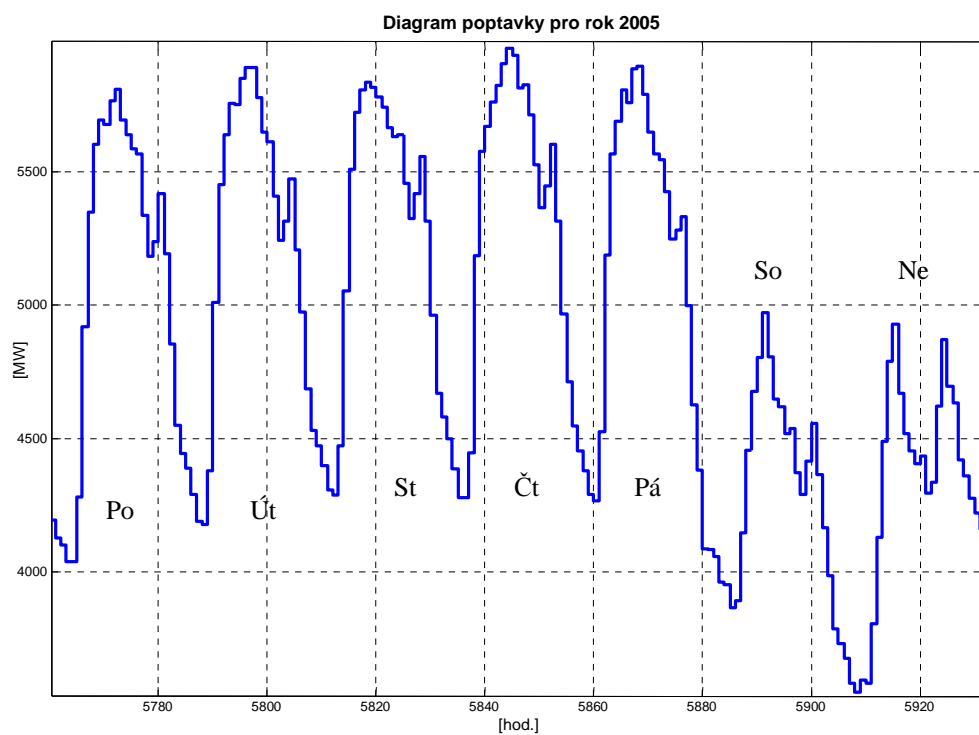
Obr. 8 - Ceny odchylek pro roky 2004 a 2005

Sledovaný výstup :

- *Diagram predikované odchylky*
 Důvod vzniku odchylky byl vysvětlen v úvodu. Můžeme jí do jisté míry srovnávat s reálnou odchylkou, která byla v soustavě změřena, avšak musíme si uvědomit, že reálná odchylka v sobě obsahuje velké množství vlivů, které v modelu nemůžeme postihnout a nedokážeme ani rozlišit, jak velká část odchylky byla způsobena ekonomickým chováním a jaká jinými vlivy. Proto při porovnávání hlavně sledujeme, aby se naše předpověď od reality nelišila příliš.



Obr. 9 - Diagram modelované poptávky silové elektřiny pro rok 2005 pro celou Českou republiku



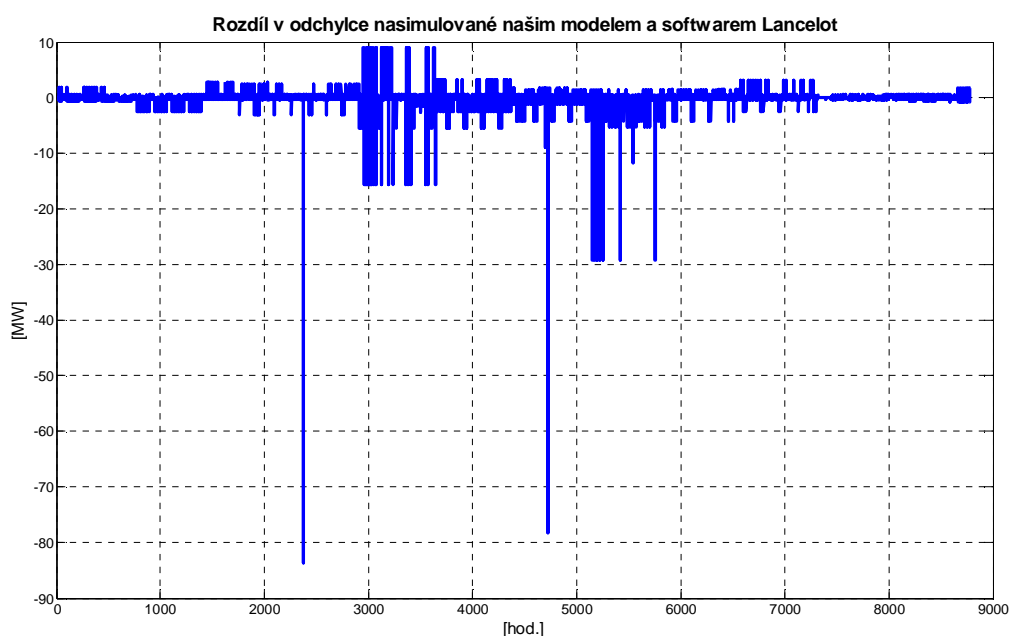
Obr. 10 - Diagram modelované poptávky silové elektřiny pro rok 2005 pro celou Českou republiku (detail)

2.3.2 Srovnání se softwarem Lancelot

Jako první bych ukázal porovnání našeho modelu s komerčním nástrojem Lancelot od firmy Cygni software, který lze použít mimo jiné i k plánování nákupu silové elektřiny na predikovaný diagram. Srovnání se softwarem Lancelot bylo provedeno z důvodu ověření správnosti výpočtu ekonomicky optimálního nákupu. Provedli jsme dvě série testů. Ceny odchylky, které jsme použili, jsou uvedeny v Tab. 2, a v každé sérii jsme udělali dva testy jeden s aplikovaným omezením nákupu bílé elektřiny a druhý bez tohoto omezení. V testech byly použity pouze duhové produkty ČEZ a obchodník reprezentoval poptávku pro celou Českou republiku.

Tab. 2 - Ceny odchylek

| Cena odchylky [Kč/MW] | Kladná (nedokup) | Záporná (překup) |
|-----------------------|------------------|------------------|
| první série | 2000 | 500 |
| druhá série | 1600 | 50 |



Obr. 11 - Rozdíl mezi odchylkou simulovanou modelem trhu a softwarem Lancelot

Testy pro nás dopadly příznivě, rozdíly v nakoupeném množství a predikované odchylce nasimulované našim modelem a softwarem Lancelot jsou minimální (průměr rozdílu nedosahuje ani 1MWh). Na Obr. 11 jsem zobrazil rozdíl těchto predikovaných odchylek. Z toho zjištění předpokládám, že se model chová ekonomicky optimálně.

Bohužel jsme nemohli provést testy s větším množstvím intervalů cen odchylek, protože software Lancelot takovéto nastavení neumožňuje. Software Lancelot je určen pro plánování pokrytí poptávaného diagramu jednoho obchodníka produkty duhové elektřiny. A není ho proto možné použít pro simulování chování celého trhu se silovou elektřinou.

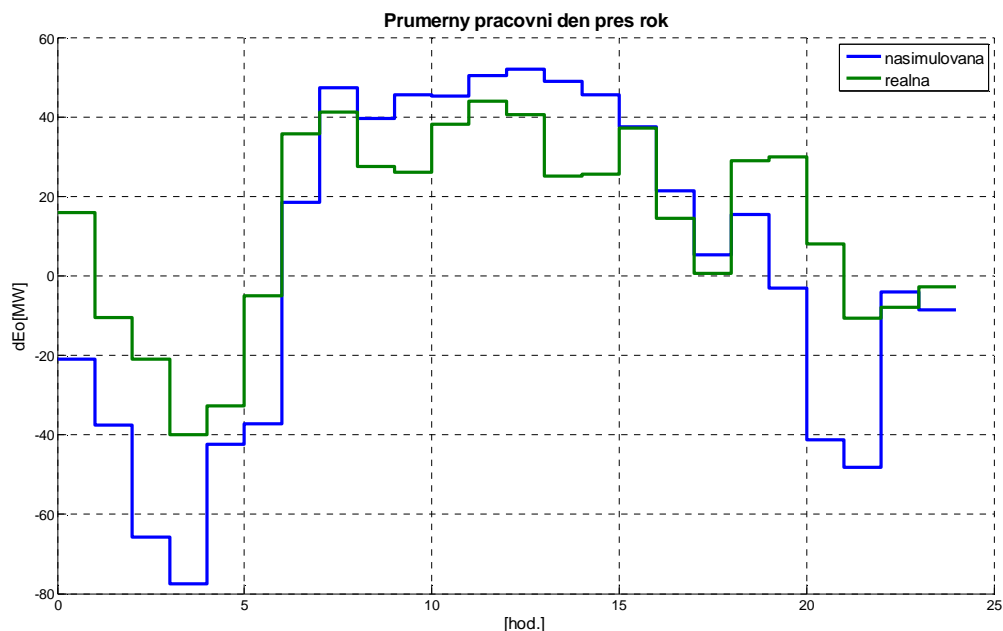
2.3.3 Testy s nastavením podle historických

Rok 2004

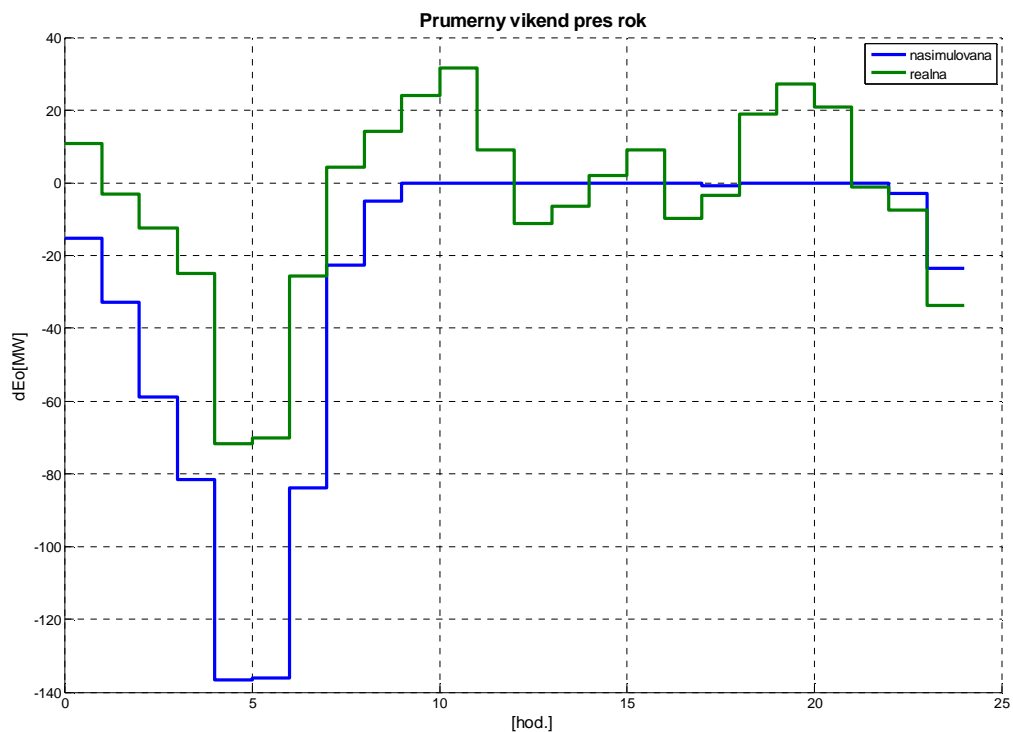
Nastavení cen odchylky vycházelo z průměrných cen znázorněných v diagramu na Obr. 8 nebo v Tab. 3. Pro porovnání simulované a skutečné hodnoty odchylky byly použity roční průměrné hodnoty pro pracovní a nepracovní dny. Srovnání průměrů může být zkreslující, ale na druhou stranu porovnááme veličiny, které nejsou úplně totožné. Skutečná odchylka totiž obsahuje kromě systematické složky i vliv náhodných jevů. Předpokládáme-li, že náhodné jevy mají střední hodnotu blízkou nule, získáme průměrováním skutečnou systematickou část, kterou má smysl porovnávat s predikcí z modelu.

Tab. 3 - Ceny odchylek pro rok 2004

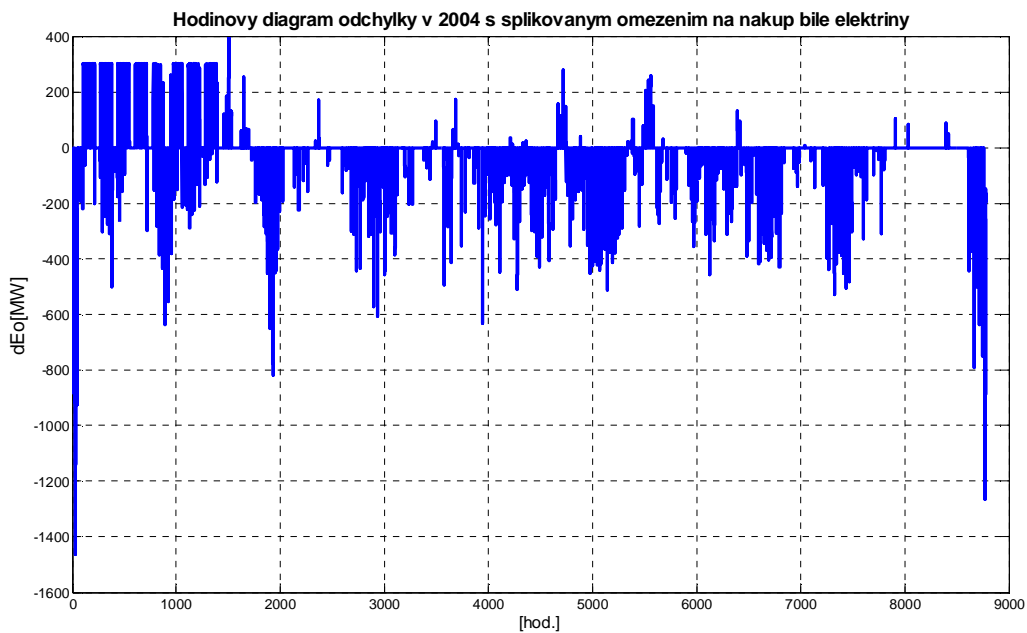
| | | Záporná odchylka (nedokup) | | | Kladná odchylka (překup) | | |
|-----------------------|----------------|----------------------------|-------------|-----------|--------------------------|------------|----------|
| | | 0 až -300 | -300 až 500 | -500 až ∞ | 0 až 200 | 200 až 300 | 500 až ∞ |
| Ceny odchylky [Kč/MW] | Intervaly [MW] | | | | | | |
| | Pracovní den | 1650 | 2000 | 2500 | 50 | 300 | 2000 |
| | Pracovní noc | 1600 | 1900 | 2300 | 50 | 600 | 1200 |
| | Nepracovní den | 1400 | 1600 | 2200 | 50 | 700 | 2000 |
| | Nepracovní noc | 1600 | 1600 | 2000 | 50 | 900 | 2000 |



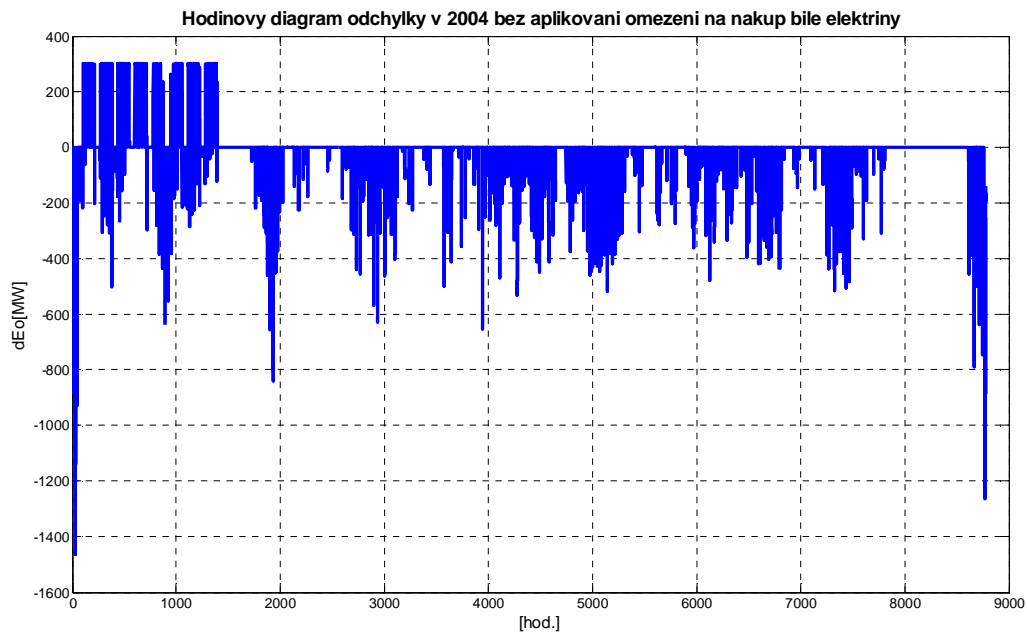
Obr. 12 - Průměrné hodnoty odchylky pro 2004 v pracovní den



Obr. 13 - Průměrné hodnoty odchylky pro 2004 o víkendu



Obr. 14 - Hodinový diagram obchodní odchylky pro 2004 s použitým omezením bílé elektřiny



Obr. 15 - Hodinový diagram obchodní odchylky pro 2004 bez použití omezení bílé elektřiny

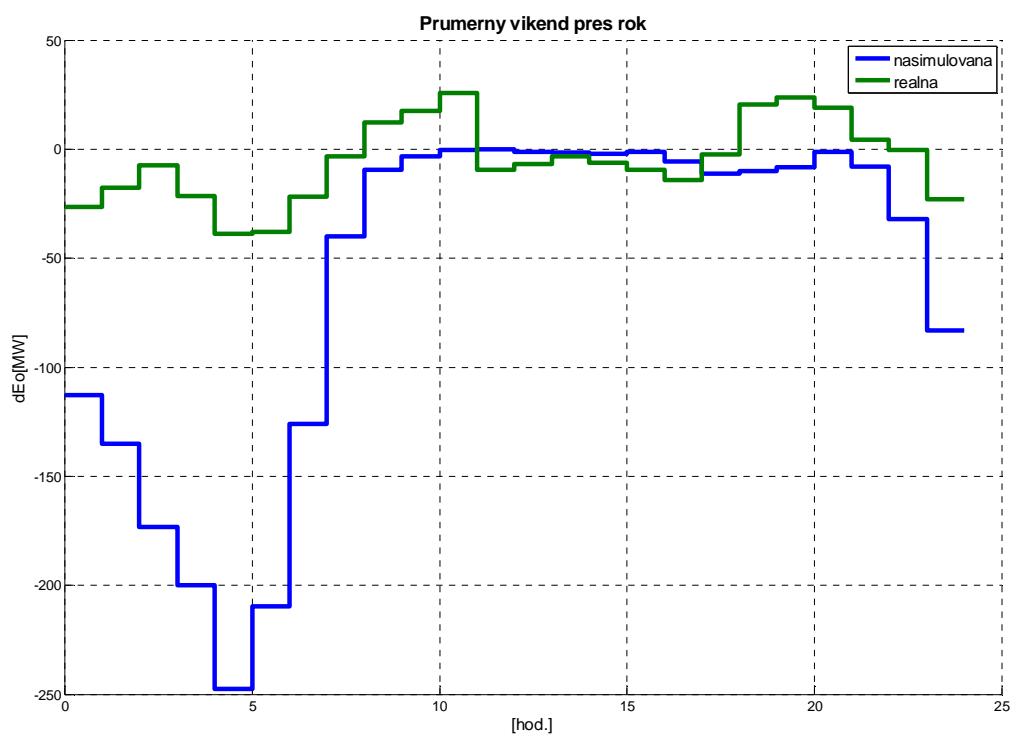
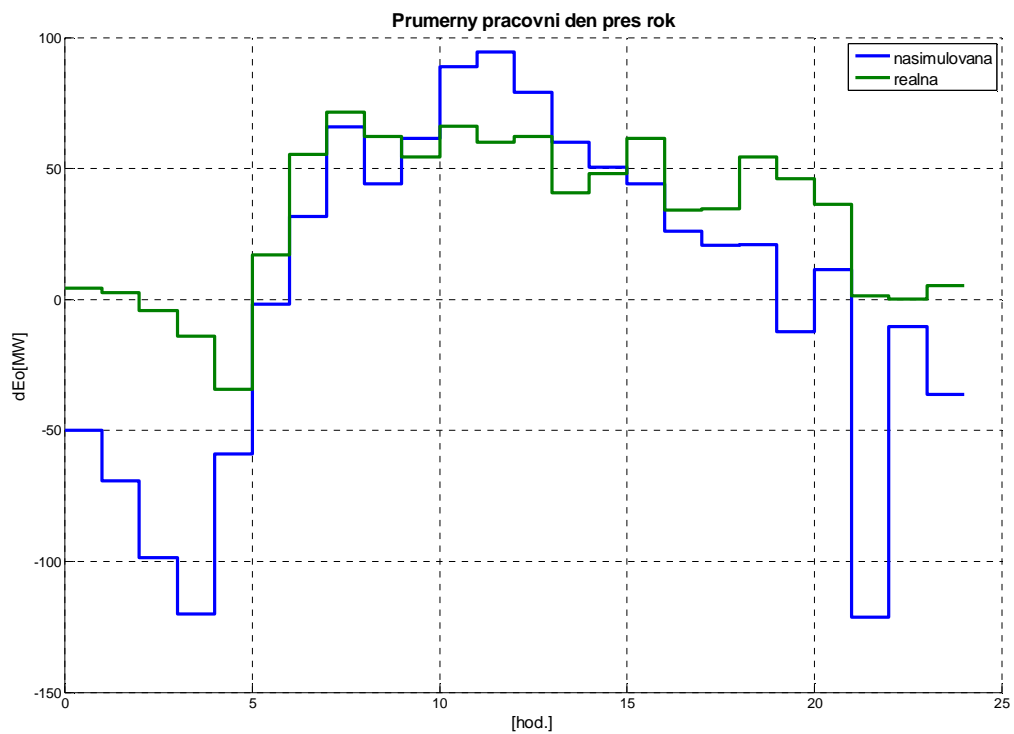
Rozbor výsledků bude proveden společně s rokem 2005.

Rok 2005

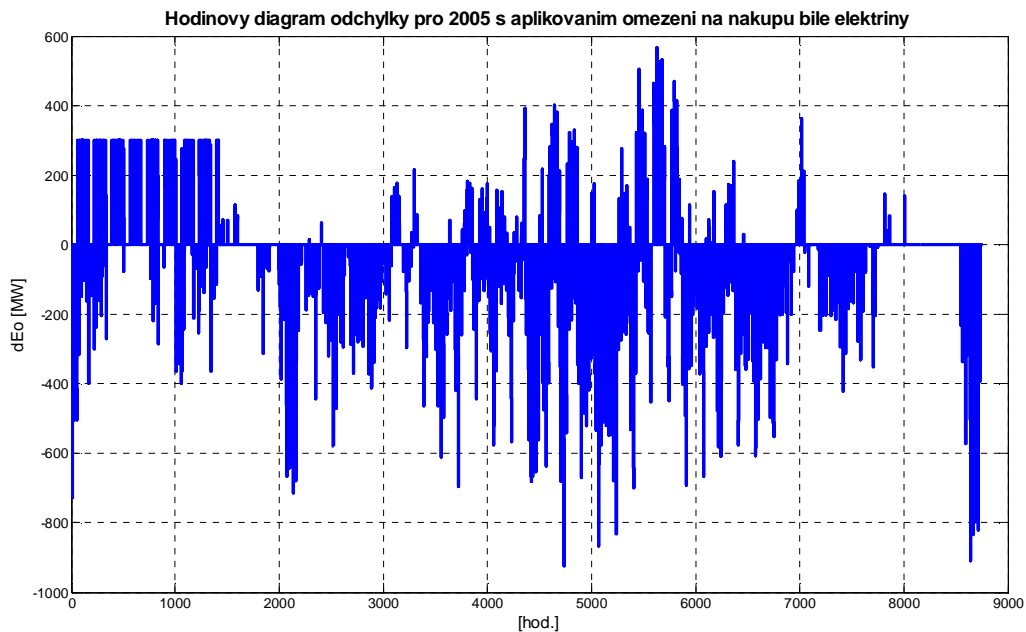
Stejně jako při testu pro rok 2004 jsem použil nastavení cen vycházející z průměrných historických cen zobrazených na Obr. 8. Ceny jsou také vidět v Tab 4.

Tab 4. Historické ceny odchylek pro rok 2005

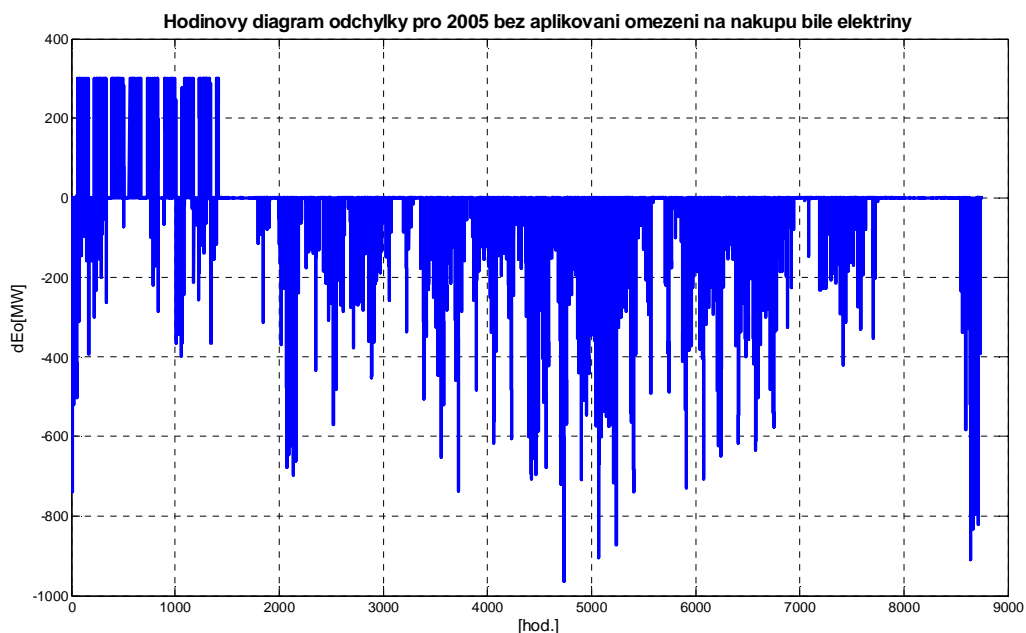
| Cena odchylky [Kč/MWh] | Záporná odchylka (nedokup) | | | Kladná odchylka (překup) | | |
|------------------------|----------------------------|--------------|-----------|--------------------------|------------|----------|
| | 0 až -300 | -300 až -500 | -500 až ∞ | 0 až 200 | 200 až 500 | 500 až ∞ |
| Intervaly [MW] | | | | | | |
| Pracovní den | 1650 | 2000 | 2150 | 50 | 150 | 600 |
| Pracovní noc | 1800 | 2050 | 2400 | 50 | 60 | 1500 |
| Nepracovní den | 1650 | 2000 | 2000 | 50 | 450 | 1500 |
| Nepracovní noc | 1800 | 2150 | 2200 | 50 | 200 | 1100 |



Obr. 16 - Průměrné hodnoty odchylky pro 2005



Obr. 17 - Hodinový diagram obchodní odchylky pro 2005 s aplikovaným omezením bílé elektřiny



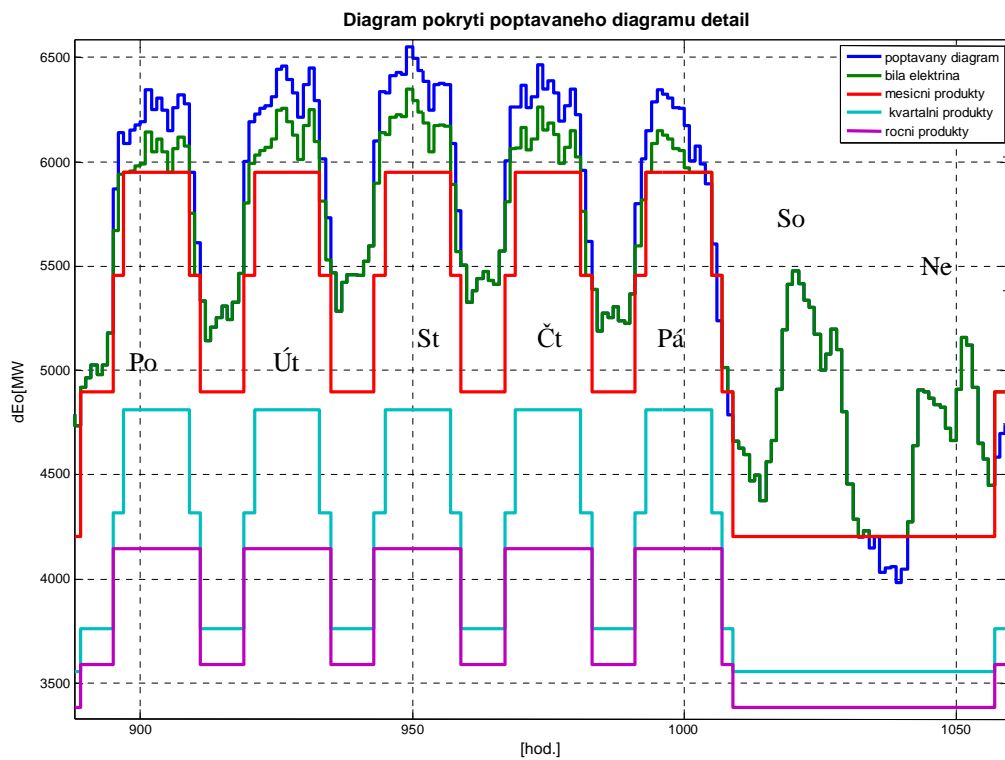
Obr. 18 - Hodinový diagram obchodní odchylky pro 2005 bez aplikování omezení bílé elektřiny

Obr. 12, Obr. 13 a Obr. 16 znázorňují výsledky simulace a porovnání se skutečnou situací v letech 2004 a 2005. Na obrázku jde vidět, že trendově se nám model docela dobře shoduje se skutečností. Neshody jsou rozebrány v odstavci 2.3.6.

Na Obr. 14, Obr. 15, Obr. 17 a Obr. 18 je pro roky 2005 a 2004 znázorněn vliv omezení nákupu bílé elektřiny na výsledném diagramu obchodní odchylky. Je vidět, že v některých hodinách se omezení projevilo a obchodník nemohl koupit dostatečné množství bílé elektřiny, aby poptávaný diagram pokryl bez vzniku odchylky i když byla její cena vyšší než cena bílé elektřiny. Bílá elektřina je během ledna a února dražší než odchylka o velikosti v intervalu 0 až -300 MW, a proto je pro obchodníka levnější

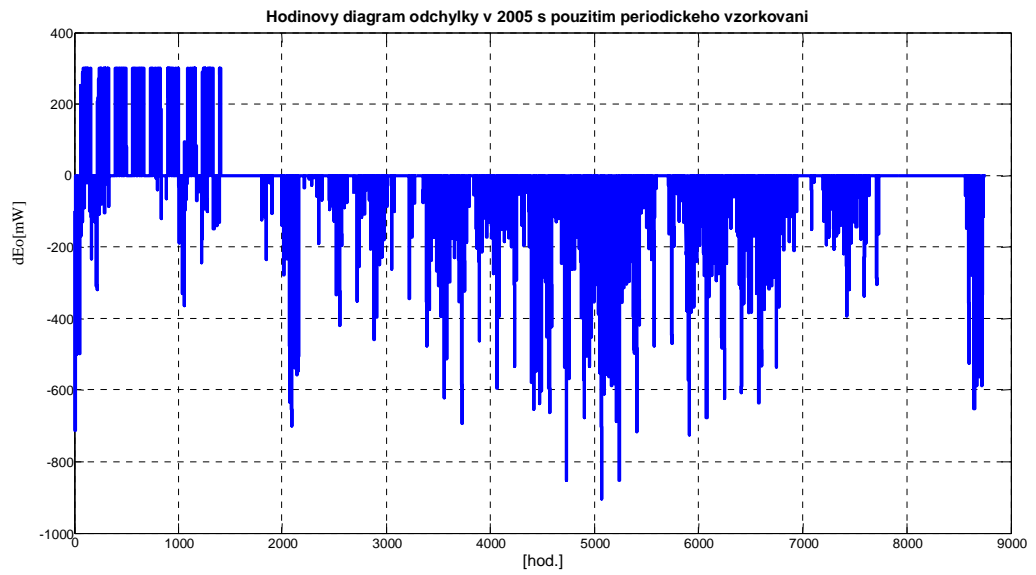
udělat nedokup a nakoupit jenom takové množství silové elektřiny, aby výsledná odchylka nepřekročila zmíněnou hranici 300 MW. Toto už se mu nevyplatí ve zbytku roku, protože se cena bíle elektřiny snížila a ta se tak stane levnější než odchylka.

Pro dokončení analýzy nákupu elektrické energie jsem na Obr. 19 zobrazil složení diagramu koupené elektrické energie z produktů na elektrickém trhu. Na obrázku je patrné, jak obchodník poskládal svůj poptávaný diagram. Je zde vidět také důvod proč přes víkendový den je predikovaná odchylka v soustavě konstantní, model ji totiž pokryje bílou elektřinou, u které není nijak omezen tvarem diagramu a navíc je cena bíle elektřiny o víkendech nižší než cena odchylky, proto víkend pokryje přesně.

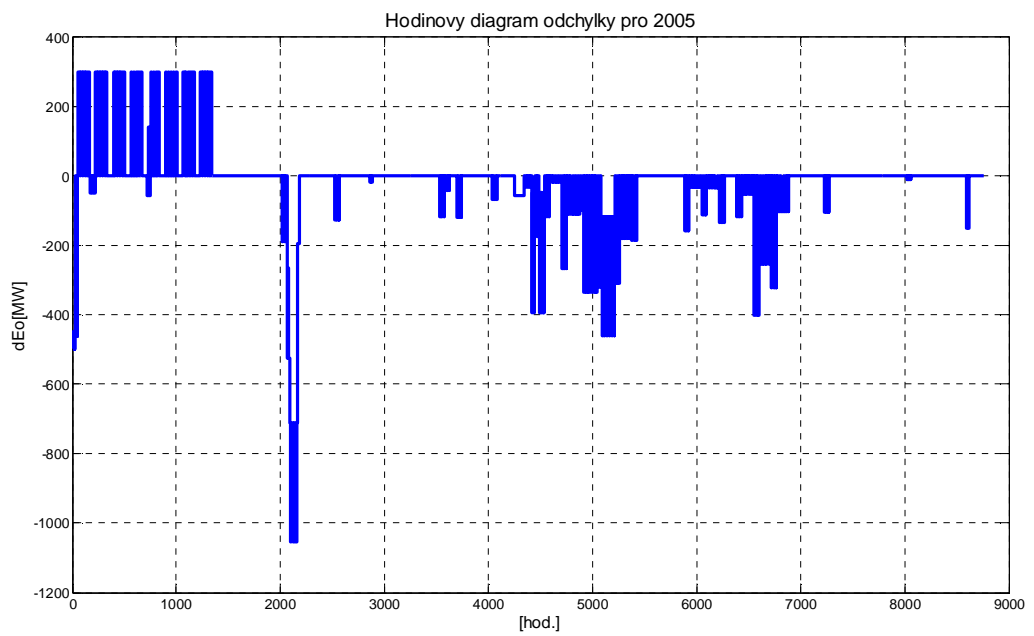


Obr. 19- Pokrytí poptávaného diagramu v roce 2005

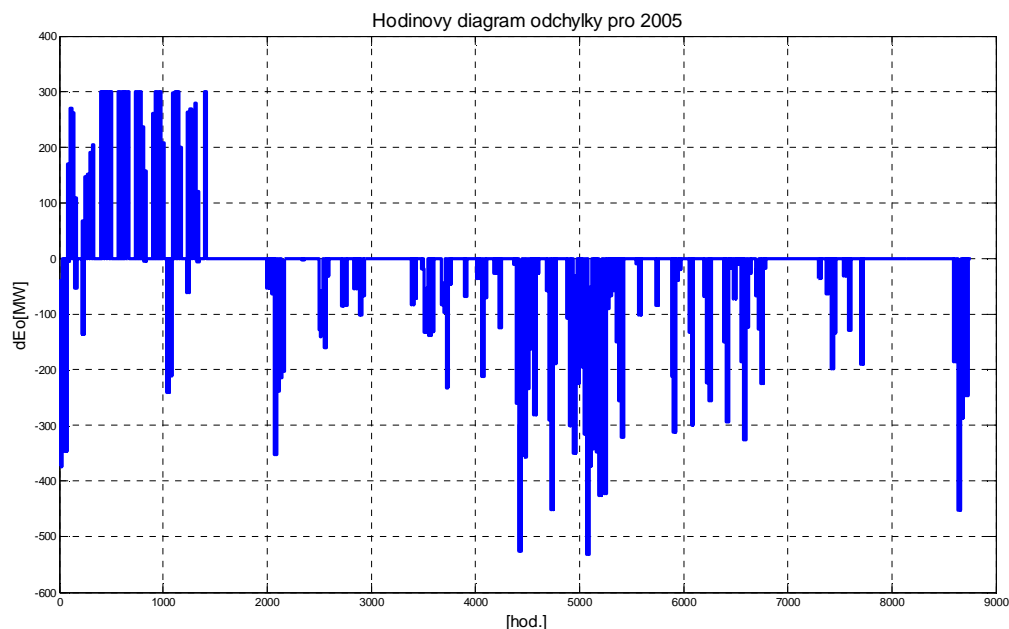
2.3.4 Ukázka vlivu vzorkování



Obr. 20 – Hodinový diagram odchylek pro 2005 s použitím periodického vzorkování



Obr. 21 - Hodinový diagram odchylky pro 2005 s použitím týdenního vzorkování

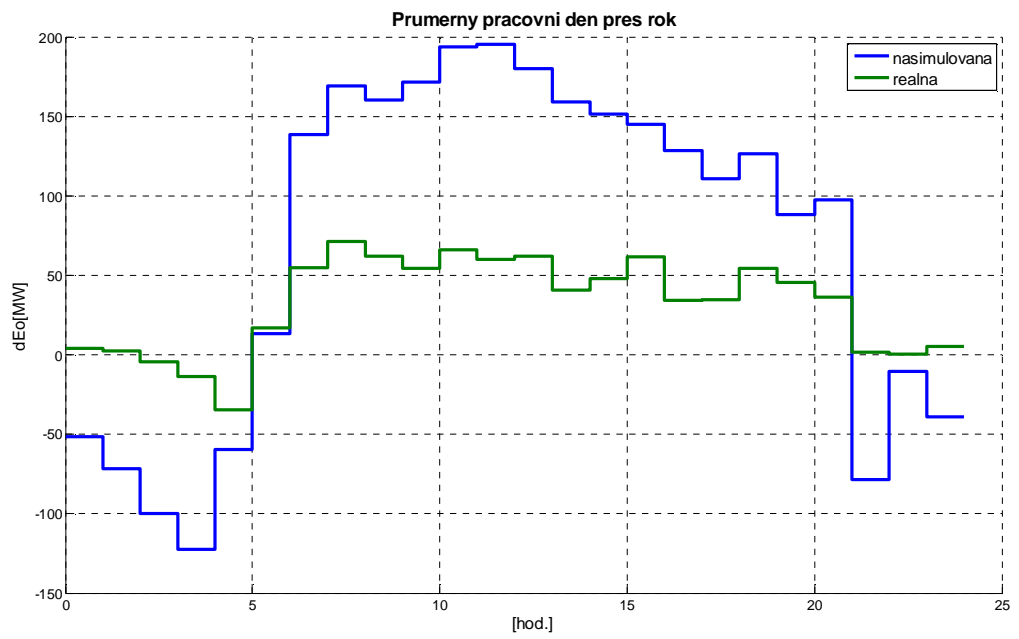
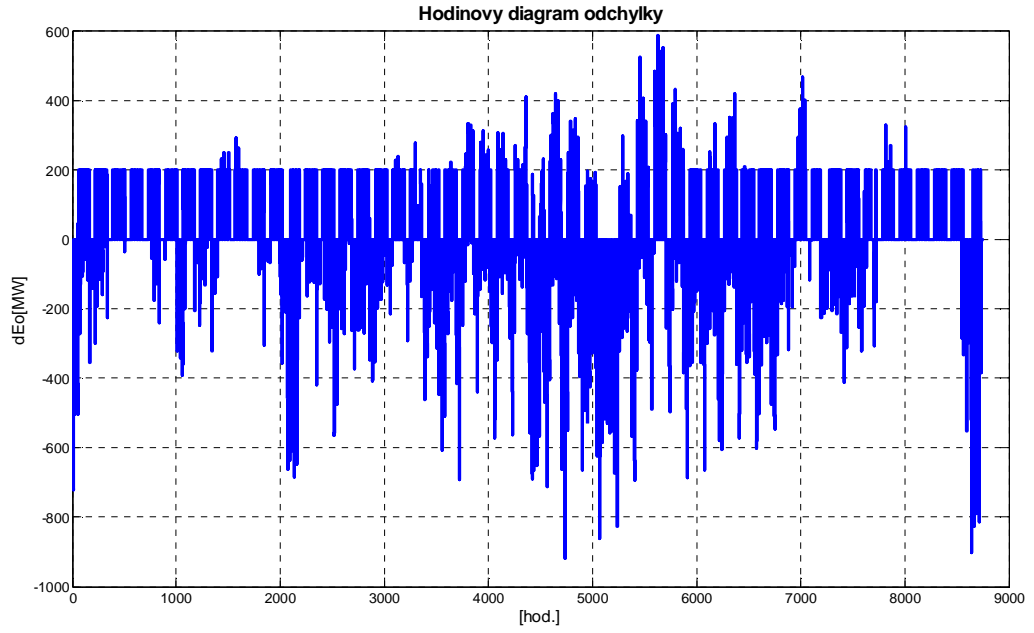


Obr. 22 - Hodinový diagram odchylky pro 2005 s použitím denního vzorkování

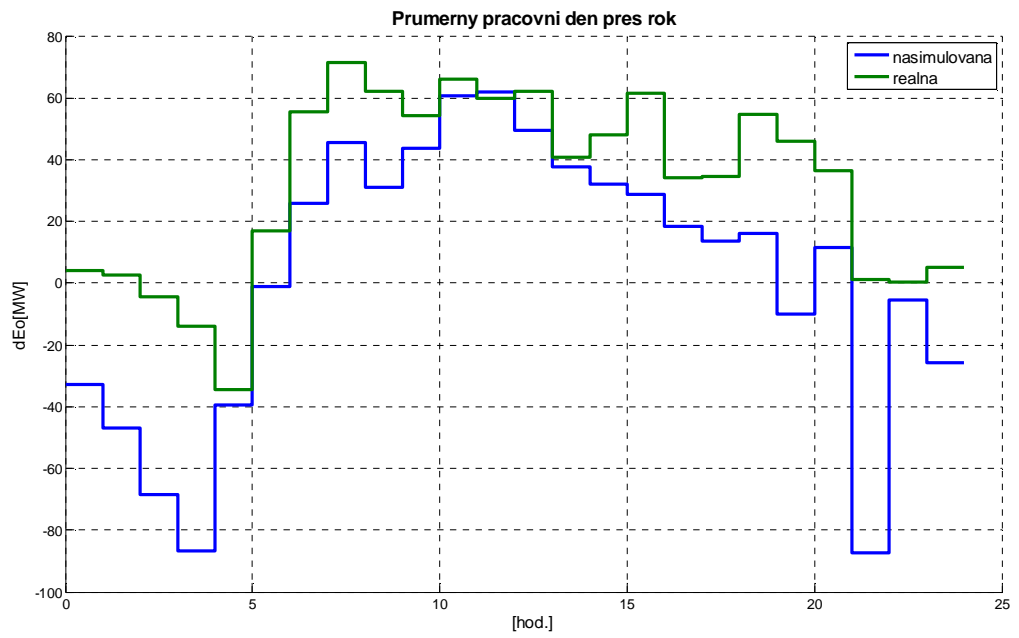
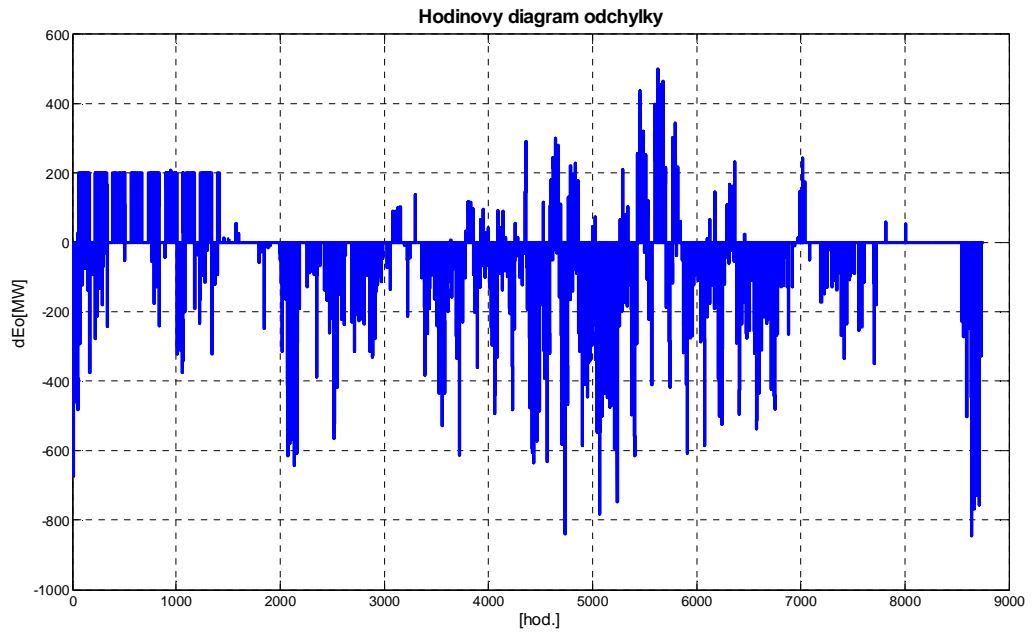
Na Obr. 20 je zobrazen vliv periodického vzorkování s periodou 2 hodiny (odstavec 2.2.4) na předikovanou odchylku v soustavě. Průběh na Obr. 20 se docela dobře shoduje s Obr. 18 což znamená, že toto nejjemnější vzorkování je použitelné pro budoucí simulace. To již se nedá říct o hrubším vzorkování, jehož vliv je na vidět na Obr. 21 a Obr. 22, tady už je rozdíl mezi diagramem odchylky získaným ze simulace, kde nebylo použito vzorkování (Obr. 18) značný a proto nepředpokládám další uplatnění hrubších vzorkování.

2.3.5 Citlivostní analýza

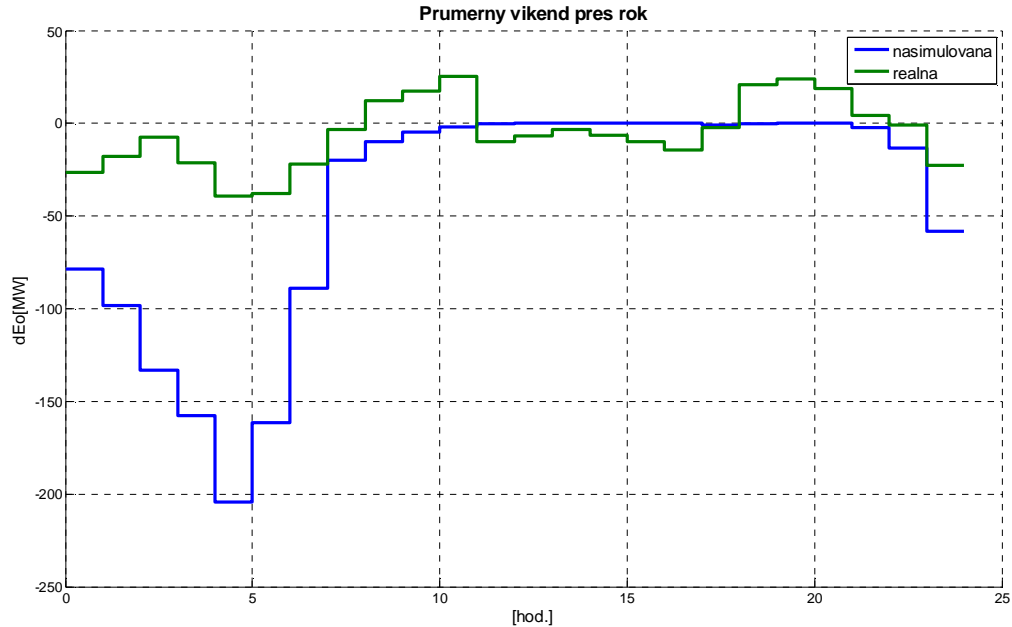
K dokončení prvních testů na modelu jsem ještě provedl analýzu na změnu cen a intervalu odchylky pro rok 2005. Zobrazil jsem ty průběhy, na které měla změna ceny viditelný vliv. Obr. 23 a znázorňuje situaci při snížení ceny záporné odchylky (nedokupu) o 300 Kč v intervalu 0 až -300 oproti původní ceně znázorněné v Tab 4. V simulaci na Obr. 24 a Obr. 25 jsem oproti původnímu nastavení cen zdražil kladnou odchylku o 300 Kč ve všech intervalech.



Obr. 23 – Vliv snížení cen za nedokup



Obr. 24 – Vliv zviřeni ceny za překup



Obr. 25 - Vliv zviřeni ceny za překup (pokračování)

Z obrázků je dobře viditelný vliv cen na konečnou velikost odchylky v soustavě. Citlivost na změnu ceny za zápornou odchylku je daná cenou za bílou elektřinu, která je přímou alternativou k odchylce a tudíž modelu stačí porovnat jejich ceny a podle toho se rozhodnout jestli se vyplatí koupit bílou elektřinu a nebo nechat odchylku. Na Obr. 23 je proto vidět, že po zlevnění odchylky o 300 Kč se její cena v pracovní den v intervalu 0 až 200 dostala pod cenu bílé elektřiny. Obchodník tedy udělal v pracovní den konstantní nedokup 200 MW. Rozbor citlivosti na změnu ceny kladné odchylky už není tak jednoduchý a tudíž není v mých silách posoudit výhody překupů v ročním horizontu. Při porovnání obou citlivostních testů, které byly provedeny, je vidět, že model je víc citlivý na změny ceny za zápornou odchylku, což způsobuje již zmíněná vazba na bílou elektřinu.

2.3.6 Vyhodnocení výsledků testů s počátečním nastavením

Po bližší analýze výsledků našich simulací pro roky 2004 a 2005 jsem shrnul neshody s realitou do několika hlavních bodů.

Hlavní problémy modelu:

- Ranní překupy od 0. do 6. hodin, které jsou větší než v realitě, ale z ekonomického hlediska nákupu na roční horizont výhodné. Model totiž nakoupí levnější pásové produkty místo špičkových produktů.
- Velký překup mezi 21. a 22. hodinou přes pracovní den. Tento překup je způsoben produktem pracovní špička 6-22 hod., kterým obchodník pokrývá velký náběh poptávky kolem 6 hodiny a tím překoupí, jelikož v době mezi 20. a 22. hodinou naopak nastává strmý pokles poptávky, a tudíž se mu zde vyplatí překoupit, protože cena za překup večer je menší než za nedokup ráno.
- Posledním problémem je tvar odchylky o víkendovém dni, kdy skutečná odchylka kopíruje víkendový diagram spotřeby zatímco v našem modelu se drží na nule.

Problémy a otázky, které z výsledků prvních testů vzešly, jsme konzultovali s odborníky z praxe, kteří se nákupem elektrické energie zabývají a mají tedy nejlepší informace. Došli k závěru, že v našem modelu špatně zacházíme s produktem bílá elektřina. Náš model ho využívá všude tam, kde je jeho cena menší než předpokládaná cena odchylky, což je ekonomicky optimální. Do uvažování obchodníků ale vstupuje faktor nejistoty přesnosti předpovědi poptávaného diagramu a speciální podmínky zacházení s bílou elektřinou (odstavec 2.1.1). Proto obchodník produkt bílá elektřina nakupuje pouze v menším množství a snaží se svůj diagram pokrývat jinými produkty, které se obchodují na krátkodobých trzích a v ročním horizontu se nevyskytují. Po tomto zjištění byly do našeho modelu přidány další produkty, jimiž jsou:

- Týdenní pásmo
- Týdenní pásmo pracovní dny
- Týdenní špička v pracovních dnech 8-20 hod
- Týdenní špička v pracovních dnech 6-22 hod
- Týdenní pásmo nepracovní dny
- Týdenní špička v nepracovních dnech 8-20 hod
- Denní pásmo
- Denní špička 8-20 hod.

Rozdíl v překupech našeho modelu a reality v ranních hodinách má také svoje vysvětlení. Obchodník i když ví, že se mu ekonomicky vyplatí udělat velký překup, ho v reálu neudělá, protože kdyby jeho předpověď byla mylná, tak by se mu vůči vedení firmy vysvětlovalo hůř, že koupil více, než ve skutečnosti potřebuje a zaplatil za elektřinu dvakrát (poprvé nákupní cenu a podruhé za kladnou odchylku) než když koupí méně a zaplatí pouze za záporou odchylku. Toto zjištění se dá v modelu zohlednit dvěma způsoby. Při jednodušším se zakomponuje nastavením velmi vysokou cenou překupu od určité hodnoty, kterou budeme považovat za maximální, kterou si obchodník dovolí udělat. Druhý způsob je spustit simulaci dvakrát po sobě a zjistit si kritické úseky v roce, kde nastává velký překup a v těchto dobách změnit (snížit) intervaly ceny odchylky, což by reprezentovalo strach udělat překup v dobách, kdy je pravděpodobné, že odchylka v soustavě bude velká (většině obchodníků se ekonomicky vyplatí v tuto dobu udělat překup).

2.3.7 Upravený model

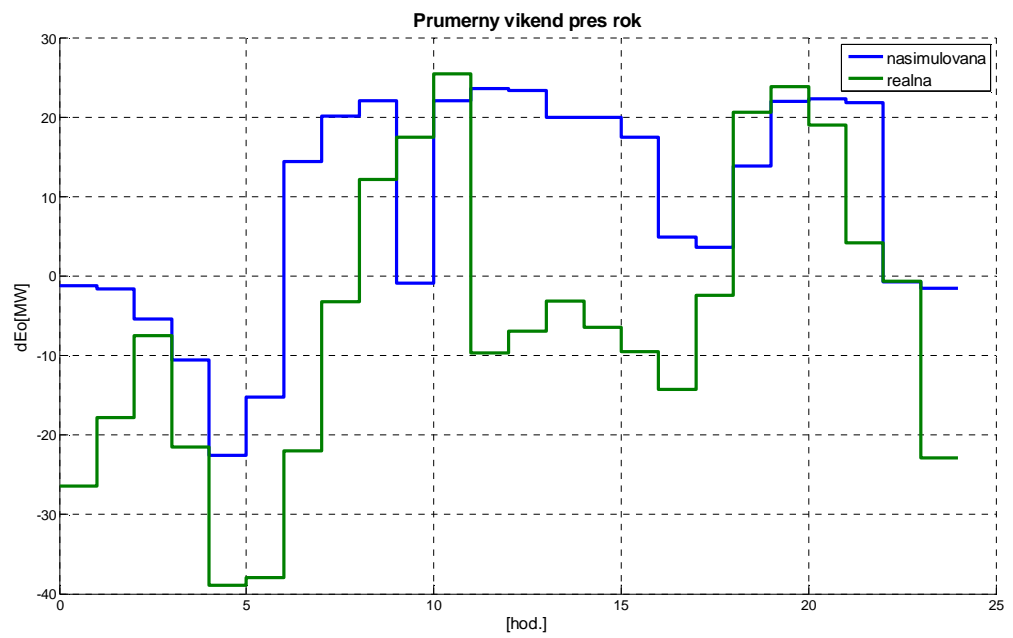
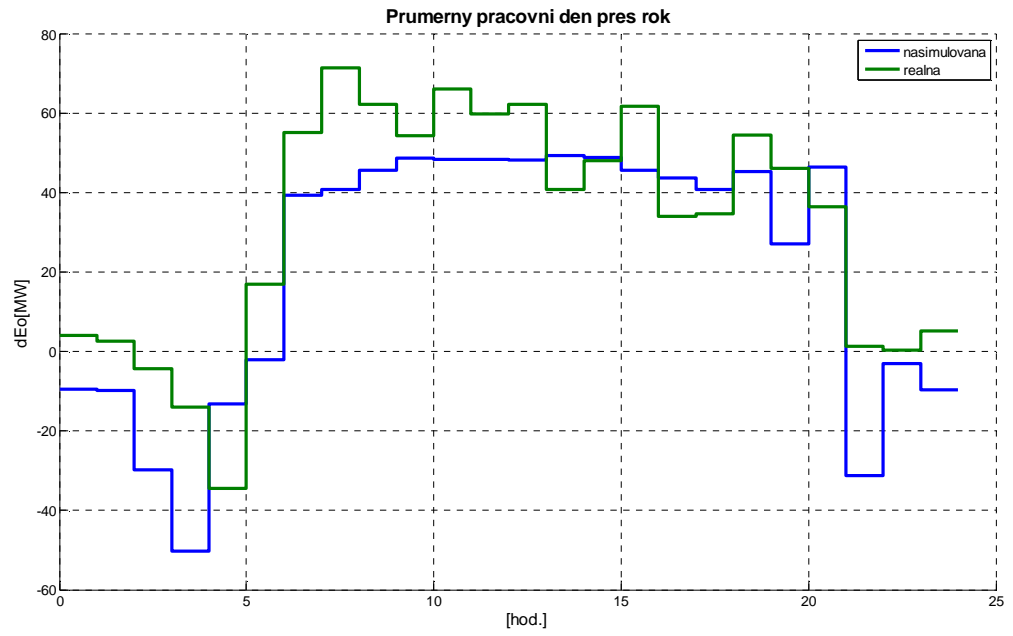
Zjištění z prvních testů a z konzultací byly implementovány do nové verze. Přidáním týdenních produktů bohužel do modelu vnášíme další nejistotu způsobenou nastavením cen týdenních a denních produktů. Nemůžeme rok dopředu vědět, za jakou cenu se na krátkodobých trzích v průběhu roku budou nabízet. V našem modelu jsme je proto odvodili odhadem od cen měsíčních produktů. Předpokládáme, že nákup elektřiny na týdenní a denní horizont musí být dražší než nákup stejného produktu v měsíčním horizontu, jelikož týdenním nebo denním produktem se může obchodník přesněji poskládat svůj poptávaný diagram. Takže kdyby byly kratší produkty stejně drahé a nebo dokonce levnější, neměl by obchodník důvod kupovat ty na delší horizont. Přesná tabulka cen krátkých produktu je v příloze.

Tab. 5 - Ceny odchylky použité v upraveném modelu

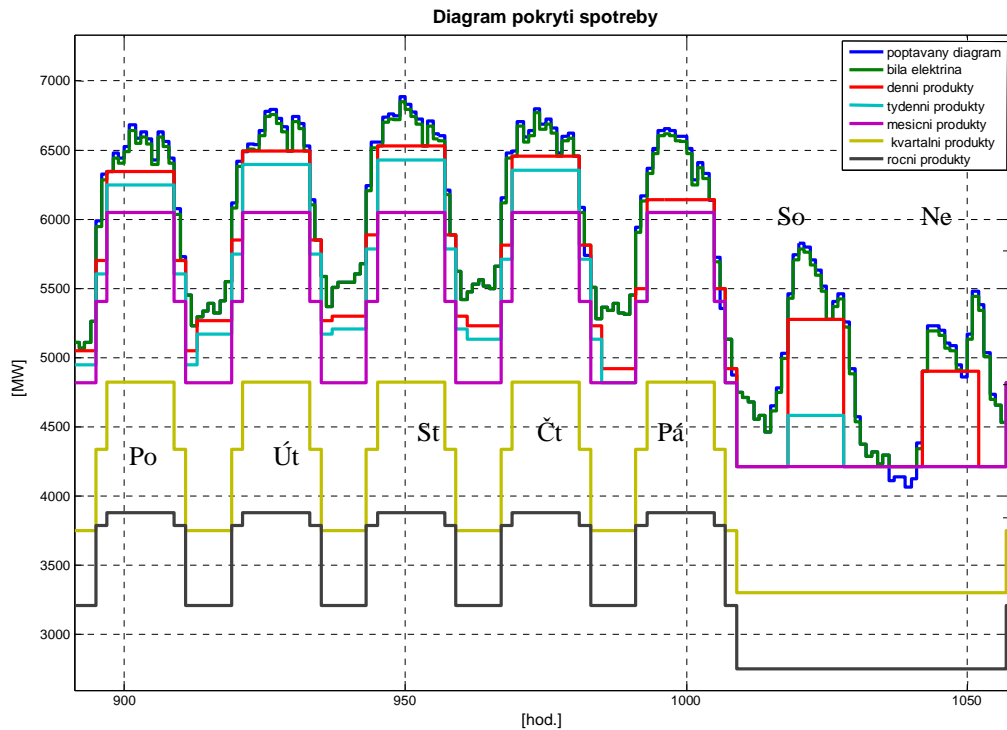
| | Intervaly[MW] | Záporná odchylka (nedokup) | | | | Kladná odchylka (překup) | | | |
|--------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------|------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|--------------------|
| | | 0 až - 50 | -50 až - 200 | -200 až - 500 | -500 až ∞ | 0 až 100 | 100 až 200 | 200 až 300 | 300 až ∞ |
| Ceny odchylky [Kč/MW] | Pracovní den | 1400 | 2000 | 2150 | 3000 | 300 | 1200 | 7000 | 500000 |
| | Pracovní noc | 1800 | 2050 | 2400 | 3000 | 50 | 800 | 5000 | 500000 |
| | Nepracovní den | 650 | 2000 | 2000 | 3000 | 50 | 800 | 5000 | 500000 |
| | Nepracovní noc | 1750 | 2150 | 2200 | 3000 | 300 | 1200 | 7000 | 500000 |

Další provedené úpravy se týkají cen odchylek, které jsou zobrazeny v Tab. 5. Ceny odchylek jsem změnil hlavně s přihlédnutím k faktu, že obchodník nenakupuje takové množství bílé elektřiny, aby pokryl poptávaný diagram úplně. Proto jsem nastavil cenu odchylky tak, aby si model nechával 50 MW rezervu a nesnažil se diagram pokrýt přesně, neboť k tomu v realitě také nedochází.

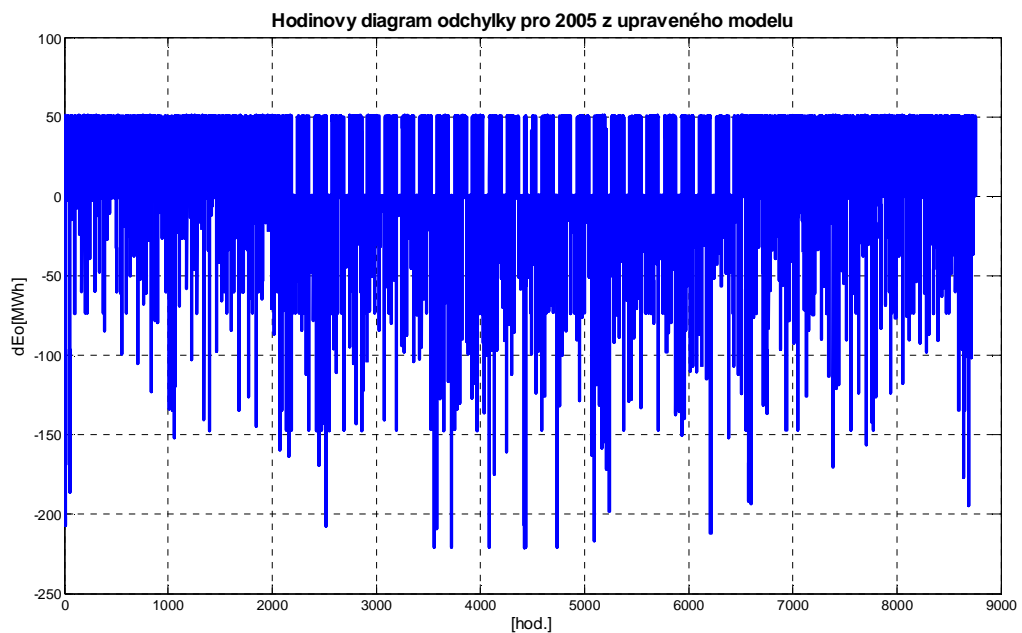
Další změnou v cenách odchylky jsem se snažil do modelu implementovat neochotu obchodníků dělat velké překupy, i když se ekonomicky vyplatí (odstavec 2.3.6). Abych tohoto výsledku docílil, zvedl jsem od určité velikosti cenu kladné odchylky na takovou hodnotu, aby ji obchodník nepřekročil. Hranici zvýšení ceny jsem si zvolil podle toho, kolik si myslím, že je pro obchodníka únosné. Překup větší než 200 MW jsem výrazně zdražil a limitní hranice je 300 MW, kde jsem cenu nastavil na 500000 Kč/MW. Ve výsledném tvaru odchylky je vliv takto upravené ceny znatelný zejména ve víkendové noci, kdy v předchozích případech docházelo k několikanásobně většímu překupu než nyní.



Obr. 26 - Průměrné hodnoty odchylky upraveného modelu 2005



Obr. 27 - Pokrytí poptávaného diagramu v roce 2005 (upravený model)



Obr. 28 - Hodinový diagram obchodní odchylky pro 2005 z upraveného modelu

Na Obr. 26 a Obr. 27 je také dobře viditelný vliv kratších produktů. Víkendy už nejsou pokrývány pouze bílou elektřinou ale i týdenními a denními produkty, což se projevilo na tvaru průměrné odchylky o víkend, kde už její hodnota přes den není konstantní, jak tomu bylo v původní verzi. Problém neshody v pracovní den mezi 21. a 22. hodinou přetrvával. Což znamená, že tento rozdíl není způsoben vlivy, které jsme do modelu

zahrnuli, ale může to být například tím, že obchodník může svoje překupy z části prodávat na krátkodobých trzích, které v tomto modelu zatím nejsou modelovány.

Na Obr. 28 je také vidět vliv změn velikosti intervalů a cen odchylek, které mají reprezentovat záměr obchodníka ponechávat si při nákupu rezervu 50 MW a jeho neochotu provádět větší překupy než 300 MW

3 Závěr

Cílem této práce bylo implementovat model chování obchodníků s elektrickou energií v liberalizovaném tržním prostředí České republiky. Tato práce navázala na principy již dříve zformulované v rámci jiného projektu, s cílem zdokonalit existující model, aby lépe odpovídal realitě.

Model, ve verzi která je dnes k dispozici, funguje dobře v oblasti nalezení ekonomicky optimálního řešení pokrytí poptávaného diagramu a z toho plynoucí systematické odchylky v soustavě. Při srovnání s reálnou situací v soustavě má však určité rezervy. Vypadá to tak, že se obchodník nechová ekonomicky optimálně, ať už z důvodu opatrnosti nebo zkušeností z minulých let. Abychom mohli predikovat skutečné chování, budeme muset znovu přehodnotit dosavadní znalosti a předpoklady o trhu s elektřinou. Po zběžném zkoumání tvaru reálné odchylky jsem došel k názoru, že systematická odchylka v ní je, ale velmi omezená. Vypadá to, jako by si obchodník v ročním horizontu nechával určitou rezervu, kterou se snaží dokoupit v kratších horizontech. To může činit v domněnku, že bude elektřina levnější, nebo že bude k dispozici produkt, který mu bude více vyhovovat. Úspěšnost jeho pozdějšího nákupu ale není stoprocentní. Toto chování má samozřejmě vliv na celkový tvar a velikost systematické odchylky v soustavě, který není modelován v nákupu na ročním horizontu.

Proto bude zřejmě nutné přehodnotit algoritmus obchodování, tj. přidat uvažování nákupu zbytkového poptávaného diagramu na kratších horizontech. V těchto nákupech se zohlední pravděpodobnost úspěšného dokupu elektřiny a simulace se bude spouštět několikrát s postupnou analýzou chování, při které by se vyhodnocovalo, jak velká bude poptávka konkurenčních obchodníků s následným vlivem právě na pravděpodobnost dokoupení elektřiny (jestliže většina obchodníků bude chtít v určité době dokoupit elektřinu, tak se šance na to, že se to každému povede, samozřejmě zmenšuje).

4 Literatura

[1] Kodex přenosové soustavy <http://www.ceps.cz/> (online)

[2] Kodousek, Martin: *Podpůrné a systémové služby v elektrizační soustavě* (dizertační práce), České vysoké učení technické v Praze, leden 2005

[3] Kolektiv autorů: *Norma spolehlivosti zajištění systémových služeb pro ES ČR*, Centrum aplikované kybernetiky, 2005

[4] Horáček, Janeček a kol.: *Metodika a modely spolehlivosti a ekonomie systémových služeb*.

[5] Eikland, Kjell - Notebaert, Peter – Bert, Juergen: *LP Solve reference guide* <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/> (online)

5 Příloha

Příloha 1 - Ceny duhové elektřiny pro roky 2004 a 2005 použité v modelu

Tabulka 1 - Ceny duhových produktů v roce 2004 použité v modelu

| Produkt <i>typ</i> | ČEZ | |
|--------------------------------------|---------------|-------|
| | Cena [Kč/MWh] | |
| | 2004 | 2005 |
| rok všechny dny | 837 | 905 |
| rok pracovní dny | 976 | 1 064 |
| rok pracovní dny 8 - 20 h | 1 350 | 1 424 |
| rok pracovní dny 6 - 22 h | 1 250 | 1 348 |
| rok nepracovní dny | 541 | 686 |
| rok pracovní dny 0 - 8 h a 20 - 24 h | 606 | 751 |
| kvartál všechny dny | 947 | 1 037 |
| | 759 | 874 |
| | 778 | 883 |
| | 904 | 999 |
| kvartální pracovní dny 8 - 20 h | 1 501 | 1 499 |
| | 1 265 | 1 350 |
| | 1 292 | 1 371 |
| | 1 453 | 1 499 |
| měsíc všechny dny | 986 | 1 098 |
| | 986 | 1 092 |
| | 900 | 950 |
| | 810 | 895 |
| | 741 | 833 |
| | 771 | 931 |
| | 769 | 873 |
| | 767 | 873 |
| | 845 | 940 |
| | 869 | 975 |
| | 970 | 1 043 |
| 906 | 1 012 | |
| měsíc pracovní dny | 1 146 | 1 235 |
| | 1 141 | 1 217 |
| | 1 021 | 1 065 |
| | 946 | 1 033 |
| | 873 | 958 |
| | 904 | 1 058 |
| | 904 | 1 036 |
| | 897 | 1 027 |
| | 984 | 1 079 |
| | 1 022 | 1 128 |
| | 1 118 | 1 175 |
| 1 041 | 1 160 | |

| | | |
|--|---------------------------------------|-------|
| měsíc pracovní dny 8 - 20 h | 1 559 | 1 597 |
| | 1 559 | 1 581 |
| | 1 423 | 1 407 |
| | 1 336 | 1 401 |
| | 1 223 | 1 304 |
| | 1 266 | 1 456 |
| | 1 264 | 1 380 |
| | 1 262 | 1 380 |
| | 1 381 | 1 464 |
| | 1 417 | 1 483 |
| | 1 536 | 1 572 |
| | 1 435 | 1 536 |
| | pracovní dny od 06:00 do 22:00 | 1 463 |
| 1 459 | | 1 519 |
| 1 319 | | 1 348 |
| 1 229 | | 1 342 |
| 1 122 | | 1 249 |
| 1 165 | | 1 395 |
| 1 165 | | 1 322 |
| 1 162 | | 1 322 |
| 1 275 | | 1 403 |
| 1 298 | | 1 420 |
| 1 434 | | 1 499 |
| 1 337 | | 1 471 |
| měsíc nepracovní dny | 661 | 826 |
| | 653 | 787 |
| | 570 | 690 |
| | 523 | 616 |
| | 494 | 569 |
| | 524 | 640 |
| | 524 | 642 |
| | 518 | 641 |
| | 540 | 650 |
| | 603 | 726 |
| | 633 | 742 |
| | 585 | 733 |
| měsíc pracovní dny 0 - 8 h a 6 - 22 h | 734 | 893 |
| | 724 | 868 |
| | 620 | 771 |
| | 555 | 690 |
| | 525 | 636 |
| | 552 | 724 |
| | 551 | 724 |
| | 548 | 724 |
| | 586 | 728 |
| | 669 | 812 |
| | 702 | 815 |
| 648 | 809 | |

Příloha 2 - Ceny bílé elektřiny v roce 2004 a 2005 použité v modelu

Tabulka 2 - Ceny bílé elektřiny pro rok 2004 použité v simulaci

| Období dle specifikace produktu | | Cena (Kč/MWh) ve všech dnech době od 04.00 do 06.00 | Cena (Kč/MWh) v pracovních dnech době od 06.00 do 22.00 | Cena (Kč/MWh) v ostatní době |
|---------------------------------|-------------|---|---|------------------------------|
| I. čtvrtletí | leden 04 | 600 | 1 682 | 793 |
| | únor 04 | 600 | 1 678 | 782 |
| | březen 04 | 600 | 1 517 | 670 |
| II. čtvrtletí | duben 04 | 500 | 1 414 | 600 |
| | květen 04 | 500 | 1 290 | 567 |
| | červen 04 | 500 | 1 340 | 596 |
| III. čtvrtletí | červenec 04 | 500 | 1 339 | 595 |
| | srpen 04 | 500 | 1 337 | 592 |
| | září 04 | 500 | 1 466 | 633 |
| IV. čtvrtletí | říjen 04 | 600 | 1 493 | 722 |
| | listopad 04 | 600 | 1 649 | 758 |
| | prosinec 04 | 600 | 1 538 | 700 |

Tabulka 3 - Ceny bílé elektřiny pro rok 2005 použité v simulaci

| Období dle specifikace produktu | | Cena (Kč/MWh) ve všech dnech době od 04.00 do 06.00 | Cena (Kč/MWh) v pracovních dnech době od 06.00 do 22.00 | Cena (Kč/MWh) v ostatní době |
|---------------------------------|-------------|---|---|------------------------------|
| I. čtvrtletí | leden 05 | 650 | 1 678 | 929 |
| | únor 05 | 650 | 1 656 | 903 |
| | březen 05 | 650 | 1 469 | 802 |
| II. čtvrtletí | duben 05 | 550 | 1 463 | 718 |
| | květen 05 | 550 | 1 361 | 661 |
| | červen 05 | 550 | 1 521 | 753 |
| III. čtvrtletí | červenec 05 | 550 | 1 441 | 753 |
| | srpen 05 | 550 | 1 441 | 753 |
| | září 05 | 550 | 1 529 | 757 |
| IV. čtvrtletí | říjen 05 | 650 | 1 548 | 844 |
| | listopad 05 | 650 | 1 634 | 848 |
| | prosinec 05 | 650 | 1 603 | 841 |

Příloha 3 - Ceny krátkých produktů

| pracovní dny | | | pracovní dny 8 - 20 h | | |
|--------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|
| Číslo měsíce | Týden | Den | Číslo měsíce | Týden | Den |
| 1 | 1 260 | 1 284 | 1 | 1 629 | 1 661 |
| 2 | 1 241 | 1 266 | 2 | 1 613 | 1 644 |
| 3 | 1 086 | 1 108 | 3 | 1 435 | 1 463 |
| 4 | 1 054 | 1 074 | 4 | 1 429 | 1 457 |
| 5 | 977 | 996 | 5 | 1 330 | 1 356 |
| 6 | 1 079 | 1 100 | 6 | 1 485 | 1 514 |
| 7 | 1 057 | 1 077 | 7 | 1 408 | 1 435 |
| 8 | 1 048 | 1 068 | 8 | 1 408 | 1 435 |
| 9 | 1 101 | 1 122 | 9 | 1 493 | 1 523 |
| 10 | 1 151 | 1 173 | 10 | 1 513 | 1 542 |
| 11 | 1 199 | 1 222 | 11 | 1 603 | 1 635 |
| 12 | 1 183 | 1 206 | 12 | 1 567 | 1 597 |

| pracovní dny 6 - 22 h | | | nepracovní dny | | |
|-----------------------|-------|-------|----------------|-------|-----|
| Číslo měsíce | Týden | Den | Číslo měsíce | Týden | Den |
| 1 | 1 570 | 1 601 | 1 | 859 | 892 |
| 2 | 1 549 | 1 580 | 2 | 818 | 850 |
| 3 | 1 375 | 1 402 | 3 | 718 | 745 |
| 4 | 1 369 | 1 396 | 4 | 641 | 665 |
| 5 | 1 274 | 1 299 | 5 | 592 | 615 |
| 6 | 1 423 | 1 451 | 6 | 666 | 691 |
| 7 | 1 348 | 1 375 | 7 | 668 | 693 |
| 8 | 1 348 | 1 375 | 8 | 667 | 692 |
| 9 | 1 431 | 1 459 | 9 | 676 | 702 |
| 10 | 1 448 | 1 477 | 10 | 755 | 784 |
| 11 | 1 529 | 1 559 | 11 | 772 | 801 |
| 12 | 1 500 | 1 530 | 12 | 762 | 792 |

| nepracovní dny 8 - 20 h | | |
|-------------------------|-------|-----|
| Číslo měsíce | Týden | Den |
| 1 | 867 | 909 |
| 2 | 826 | 866 |
| 3 | 725 | 759 |
| 4 | 647 | 678 |
| 5 | 597 | 626 |
| 6 | 672 | 704 |
| 7 | 674 | 706 |
| 8 | 673 | 705 |
| 9 | 683 | 715 |
| 10 | 762 | 799 |
| 11 | 779 | 816 |
| 12 | 770 | 806 |