ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

Diplomová práce

Optimální skladba podpůrných služeb pro řízení přenosové soustavy při změněné skladbě zdrojů

Tomáš Strnad

květen 2009

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Havel

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Tomáš Strnad**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (magisterský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření, blok KM1 - Řídicí technika

Název tématu: **Optimální skladba podpůrných služeb pro řízení přenosovésoustavy při změněné skladbě zdrojů**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s principy nákupu a použitím regulačních rezerv (podpůrných služeb) provozovatelem přenosové soustavy.
2. V návaznosti na [1] navrhněte další možnosti hledání optimální skladby podpůrných služeb pro požadovanou kvalitu regulace výkonové rovnováhy.
3. Definujte úlohu optimálního výběru podpůrných služeb z nabídek poskytovatelů a navrhněte její řešení.
4. Otestujte vliv připojení nového elektrárenského bloku na potřebu podpůrných služeb, s tím spojené náklady a kvalitu regulace.

Seznam odborné literatury:

[1] Filas, P.: Optimalizace výkonových rezerv pro řízení rovnováhy v přenosové síti, diplomová práce, ČVUT FEL, 2008.

Vedoucí: Ing. Petr Havel

Platnost zadání: do konce letního semestru 2009/10

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 27. 2. 2009

Prohlášení

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

V Praze, dne 21.5.2009 .....

.....
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 fungování trhu s podpůrnými službami v České republice nebo stylistických věcí v dokumentu. Dál bych rád poděkoval svým rodičům, kteří mi dopřáli vhodné prostředí k práci.

Anotace

V této práci byly navrženy a implementovány algoritmy pro plánování a nákup potřebného množství podpůrných služeb k řízení výkonové rovnováhy přenosové soustavě v České republice. Úloha plánování optimálního množství podpůrných služeb byla vyřešena iterační metodou používající algoritmus větví a mezí. Výsledkem je nejlevnější skladba podpůrných služeb, s kterou lze řídit přenosovou soustavu s požadovanou spolehlivostí. K výpočtu ekonomicky optimálního nákupu skladby podpůrných služeb ve výběrovém řízení bylo použito lineární optimalizace s celočíselnými poměnými. Výsledkem algoritmu je ekonomicky optimální nákup požadovaného množství podpůrných služeb. V poslední části této práce je analyzován vliv změny skladeb výrobních bloků elektrické energie na regulaci přenosové soustavy a s tím související požadavky na podpůrné služby.

Abstract

This thesis deals with design and implementation of algorithms for planning and purchasing of sufficient amount of ancillary services that ensures safe control of power balance in transmission system. The planning is performed by iteration method using branch and bound algorithm. The output is a set of ancillary services that minimizes the cost for reservations and, at the same time, ensures power balance control with required reliability. The economically optimal purchase of ancillary services is performed by a mixed integer and linear optimization. In last part of this work an influence of changes in power plants structure on the power balance control and corresponding ancillary services reservation costs is analyzed.

IMPLEMENTACE MODELU CHOVÁNÍ OBCHODNÍKŮ S ELEKTRICKOU ENERGIÍ V LIBERALIZOVANÉM PROSTŘEDÍ ČESKÉ REPUBLIKY ..... CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

1 ÚVOD **1**

1.1 PROVOZ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY V ČESKÉ REPUBLICE 1
1.2 NÁKUP PODPŮRNÝCH SLUŽEB 3
1.3 UKAZATELE KVALITY REGULACE 4
1.4 SIMULACE PROVOZU PŘENOSOVÉ SOUSTAVY 6
1.5 CÍLE PRÁCE 7

2 ITERAČNÍ PLÁNOVÁNÍ PODPŮRNÝCH SLUŽEB **8**

2.1 POPIS ITERAČNÍHO ALGORITMU 8
2.2 VSTUPY A VÝSTUPY ALGORITMU 13
2.3 VÝSLEDKY 16

3 PODPORA VÝBĚROVÝCH ŘÍZENÍ NA PODPŮRNÉ SLUŽBY **26**

3.1 VSTUPY A VÝSTUPY NÁSTROJE 26
3.2 FORMULACE OPTIMALIZAČNÍ ÚLOHY 27
3.3 POUŽITÁ DATA PRO TESTOVÁNÍ ALGORITMŮ 28
3.4 METODY ŘEŠENÍ OPTIMALIZAČNÍHO PROBLÉMU 29

4 VLIV VÝSTAVBY NOVÝCH ELEKTRÁREN NA REGULACI VÝKONOVÉ ROVNOVÁNY **41**

4.1 TESTOVANÉ SCÉNÁŘE 41
4.2 VÝSLEDKY 42

5 ZÁVĚR **47**

6 LITERATURA **49**

7 PŘÍLOHY **50**

1 Úvod

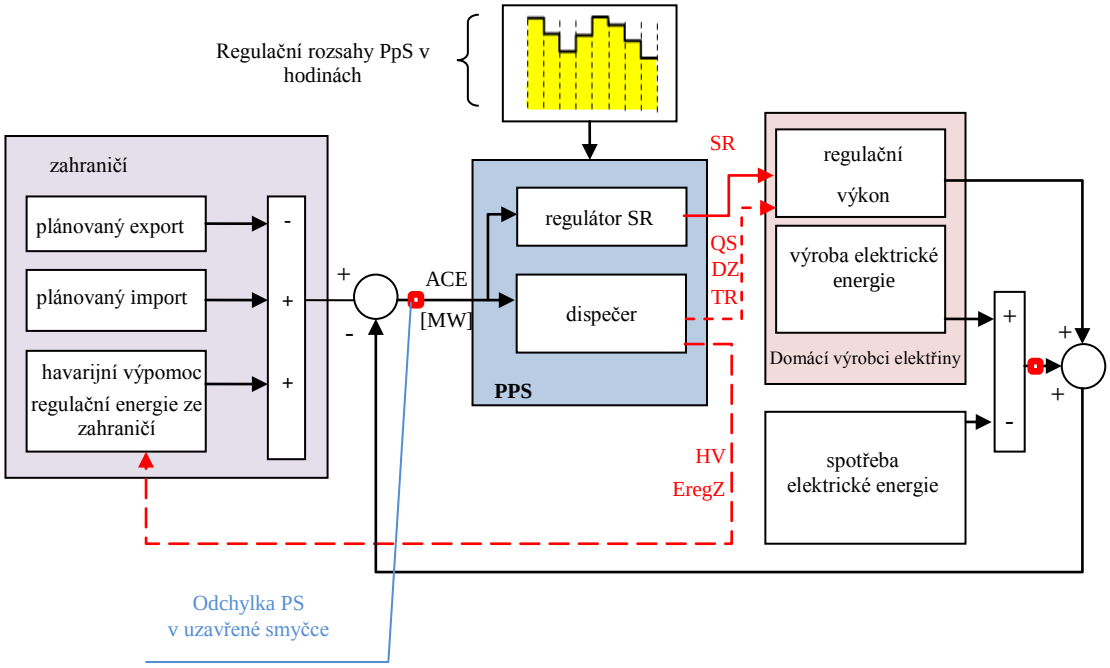
1.1 Provoz přenosové soustavy v České republice

Přenosová soustava (dále PS) je síť vedení velmi vysokého napětí propojující výrobce elektrické energie (domácího nebo zahraničního) s energetickými uzly (elektrické rozvodny), kde se transformuje velmi vysoké napětí na nižší. Vedení vysokého napětí vedoucího od elektrických rozvoden ke spotřebitelům je již součástí distribuční soustavy. Zajištění spolehlivého provozu PS 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 PS. Systémové služby představují kvalitu a spolehlivost dodávek energie.

1.2 Regulace výkonové rovnováhy v elektrické soustavě

Výkonová nerovnováha v PS vzniká, pokud není dodržena rovnost mezi vyrobenou a spotřebovanou elektrickou energii. Její hodnotu v každé minutě lze spočítat odečtením aktuální domácí spotřeby od domácí výroby elektrické energie a odečtením plánovaného exportu energie do zahraničí případně přičtením plánovaného importu ze zahraničí. Dále bude tato hodnota značena jako odchylka v otevřené smyčce (ACE_{OV}). Jelikož velikost této nerovnováhy přímo ovlivňuje kvalitu a spolehlivost dodávek elektrické energie, je v zájmu provozovatele přenosové soustavy (dále PPS) ji minimalizovat. V ideálním případě by se tedy měla okamžitá výroba elektrické energie rovnat spotřebě. Tato situace je v reálném případě nedosažitelná, jelikož nerovnováha může v PS vznikat z mnoha náhodných důvodů. Hlavní nepredikovatelné jevy způsobující nerovnováhu v PS jsou výpadek bloku elektrárny z důvodu technické poruchy, náhlá změna počasí nebo působení ochran přenosové soustavy, kdy se při závadě může odstavit celá část rozvodné sítě. Protože není možné výkonovou nerovnováhu zcela eliminovat, je cílem PPS ji minimalizovat. Na Obr. 1 je jednoduché schéma principu zpětnovazebné regulace výkonové nerovnováhy v PS.

K regulaci výkonové nerovnováhy používá PPS podpůrné služby (dále PpS), které nakupuje od domácích i zahraničních uživatelů PS. Podpůrné služby, které nabízejí výrobci elektrické energie, 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. V Tab. 1 jsou hlavní kategorie v současné době nejpoužívanějších PpS společně se způsobem aktivace. Podrobnější informace lze naleznout v Kodexu přenosové soustavy [6].



Obr. 1 – Zpětnovazební princip vyrovnávání výkonové nerovnováhy v PS

Tab. 1 – Kategorie hlavních používaných PpS

Původ služby (PpS)	Způsob aktivace	Popis
domácí	Automaticky	Primární regulace (PR)
		Sekundární regulace (SR)
	Dispečersky aktivované	Terciální regulace kladná (TR^+)
		Terciální regulace záporná (TR^-)
		Rychle startující záloha (QS)
		Dispečerská záloha (DZ)
zahraniční	Dispečersky aktivované	Havarijní výpomoc (HV)
		Regulační energie ze zahraničí (EregZ)

První zmíněnou službou je primární regulace (dále PR), kterou aktivuje P (proporcionální) regulátor v závislosti na odchylce frekvence v PS od požadované hodnoty. Je to nejrychlejší regulace, jelikož na většině velkých elektrárenských bloků, které jsou připojeny do PS, se nachází regulátor PR, který v případě odchylky frekvence okamžitě reaguje. PR je jediná podpůrná služba, které je aktivována mimo dispečink PPS.

Sekundární regulace (dále SR) je druhou nejrychlejší regulací, která se používá hlavně v situacích vykrývání rychlých fluktuací PS. Služba je aktivována PI

(proporcionálně integračním) regulátorem na dispečinku PPS. Stejně jako PR je tato služba symetrická, což znamená, že pokud má PPS rezervováno množství 200 MW, může službu aktivovat v intervalu $\langle -200MW, 200MW \rangle$.

Terciální regulace kladná a terciální regulace záporná (dále TR^+ a TR^-) představují rezervovaný výkon na elektrárenském bloku kladný nebo záporný. V praxi to znamená, že na povel z dispečinku PPS elektrárenský blok sníží nebo naopak zvýší vyráběné množství elektrické energie. Terciální regulace substituuje SR v situacích, kdy se v PS nachází větší výkonová nerovnováha po delší dobu. Tato substituce je velmi důležitá, protože se tím obnovuje SR, které dokáže lépe reagovat na případné rychlé fluktuace v soustavě.

Rychle startující záloha (dále QS) se aktivuje stejně jako oba druhy TR. Tato služba představuje studený výkon dostupný do 15 minut. V praxi je tato služba poskytována hlavně vodními zdroji elektrické energie, z čehož plyne omezení na velikost energie služby, kterou je možné nepřetržitě čerpat. Tato služba se využívá téměř výhradně na regulaci výkonového deficitu v PS způsobeného výpadky elektrárenských bloků, které by podle UCTE Operation Handbook [5] měly být vyrovnány do 15 minut. Vyrovnáním je zde myšleno snížení výkonového deficitu na hodnotu v intervalu $\langle -100MW, 100MW \rangle$.

Poslední službou poskytovanou domácími uživateli PS je dispečerská záloha (dále DZ). Tato služba představuje netočivou energetickou zálohu (např. bloky plynových elektráren), proto její aktivace trvá typicky 60 až 90 minut. DZ je nejpomalejší službou a tak se aktivuje jen v případech dlouhodobé energetické nerovnováhy. Její aktivace slouží hlavně k obnovení SR a TR^+.

U doposud zmíněných podpůrných služeb platí PPS za rezervovaný výkon, což je regulační rozsah, ve kterém může být služba v případě potřeby aktivována. Pokud dojde k aktivaci služby, platí se poskytovateli služby navíc částka za aktivaci. Tu ale v konečném vyúčtování již neplatí PPS, ale subjekt (výrobce nebo spotřebitel), který energetickou nerovnováhu způsobil. U PpS poskytovaných ze zahraničí se platí pouze za aktivaci. První využívanou PpS ze zahraničí je havarijní výpomoc (dále HV), která je poskytována v rámci vzájemných smluv s okolními PPS. Tato služba se využívá pouze ve výjimečných situacích, když regulace s rezervovanými PpS není dostačující. Poslední uvažovanou službou je regulační energie ze zahraničí (dále EregZ), tato služba představuje nákup energie od zahraničního obchodníka. Z principu je zřejmé, že tato služba bude značně nespolehlivá a navíc s velkým časovým zpožděním aktivace. Používá se stejně jako DZ v situacích dlouhodobé energetické nerovnováhy typicky způsobené dlouhým výpadkem elektrárenského bloku, případně kumulovanými výpadky několika bloků.

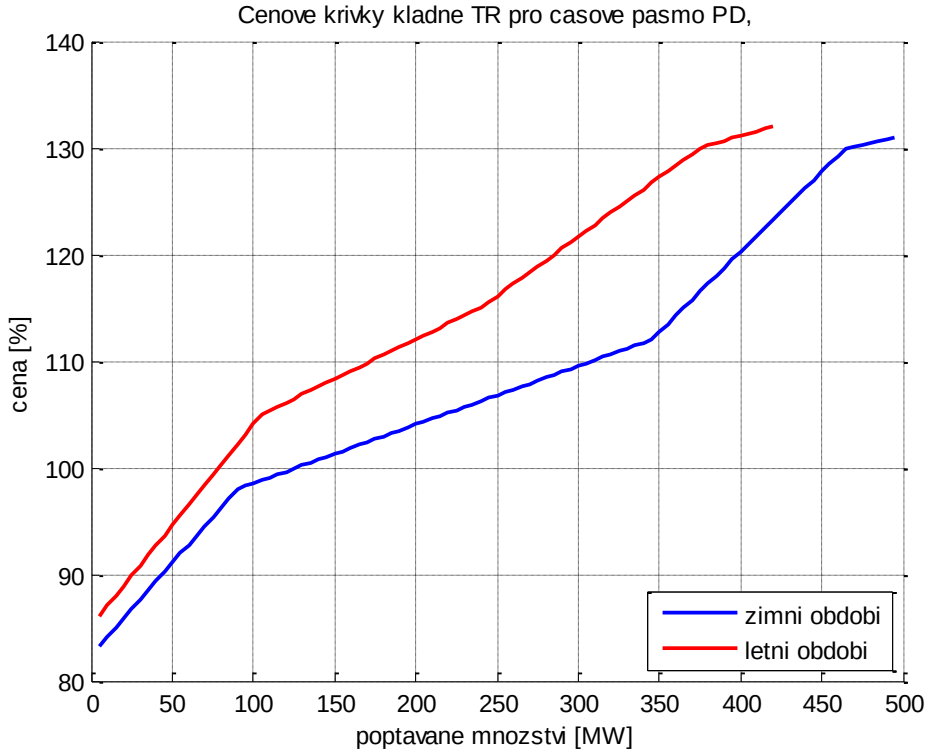
1.2 Nákup podpůrných služeb

Provozovatel přenosové soustavy nakupuje potřebné množství PpS buď dlouhodobými kontrakty, nebo na denním vyrovnávacím trhu. Dlouhodobé kontrakty se uzavírají na základě výběrových řízení, která PPS vypisuje pro každou kategorii PS zvlášť. Výběrové řízení je vždy vypsáno pro konkrétní PpS, množství této služby a časový interval nákupu. Tímto způsobem je nakoupeno zhruba 90 % všech PpS. Zbytek je nakoupen na denním trhu. Popis obchodování na denním trhu je v Kodexu přenosové soustavy [6] a protože se jeho fungování netýká této práce, nebudu se jim dále zabývat.

Pro účely plánování se cena za rezervaci jednotlivých PpS odhaduje pomocí cenových křivek, které při plánování nahrazují model trhu s podpůrnými službami. Obecně lze uvažovat, že cena za PpS závisí na poptávaném množství a také na čase. Tuto závislost lze popsat takzvanou elasticitou cen, která popisuje, jak se změní jednotková cena za 1MW rezervace PpS při změně poptávaného množství. Tuto závislost lze zapsat rovnicí.

$$elasticita = \frac{zmena\ jednotkové\ ceny}{zmena\ poptávaného\ množství}$$

Při výpočtech a analýzách provedených v této práci jsou k odhadům nákladů za nákup podpůrných služeb použity cenové křivky vytvořené expertním odhadem odborníků na trh s PpS. Ve tvaru uvažovaných cenových křivek jsou zachyceny rozdílné závislosti cen jednotlivých PpS na poptávaném množství během roku (letní a zimní) tak i během jednotlivých časových pásem v průběhu každého týdne. Uvažovaná časová pásma jsou pracovní den (PD), pracovní noc (PN), nepracovní den (ND) a nepracovní noc (NN). Časovým obdobím značeným jako noc je zde myšlena doba od 22:00 – 06:00 hodin. Na Obr. 2 jsou jako příklad možného tvaru elasticity ceny nákupu PpS zobrazeny cenové křivky TR^+ (podrobnější informace viz [2]). Na ose *y* obrázku je vynesena marginální cena vyjádřená v procentech referenční ceny.

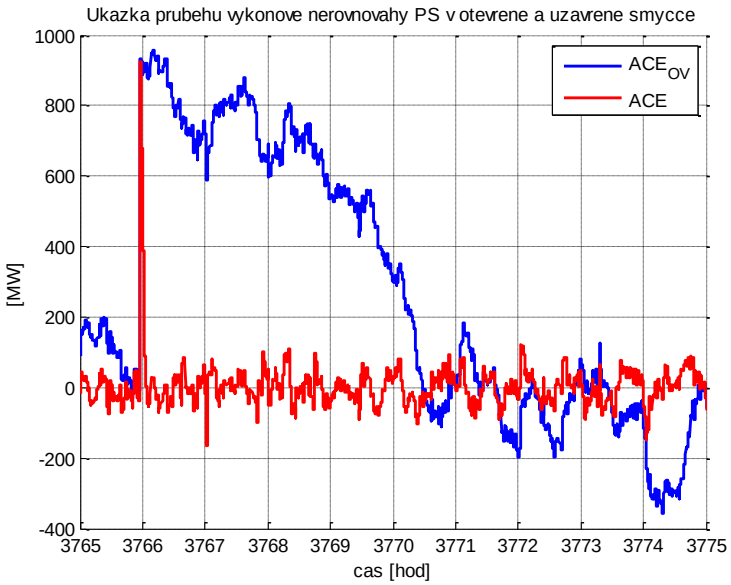


Obr. 2 – Ukázka elasticity TR^+ pro časové pásmo PD

1.3 Ukazatele kvality regulace

Jak už bylo řečeno v předchozí kapitole, PPS se snaží minimalizovat nerovnováhu v přenosové soustavě. K regulaci se používají PpS služby popsané v kapitole 1.3. Průběh, který získáme po odečtení regulačních zásahů jednotlivých PpS od ACE_{OV}, se nazývá výkonová nerovnováha v uzavřené smyčce (area control error, ACE). Na Obr. 3 je pro názornost uveden příklad výkonové nerovnováhy v PS v otevřené a uzavřené

smyčce. Na obrázku je zobrazena situace, kdy ve 3766. hodině vypadl 1000MW elektrárenský blok.



Obr. 3 – Ukázka průběhu odchylky v přenosové soustavě v otevřené a uzavřené smyčce

Aby bylo možné porovnávat různé průběhy ACE a tím srovnávat kvalitu regulace dosaženou s různým množstvím rezervovaných PpS nebo porovnávat, jak se mění kvalita regulace v jednotlivých letech, byly navrženy ukazatele spolehlivosti. Tyto ukazatele byly vytvořeny v rámci jiné práce v Centru aplikované kybernetiky [1]. V Tab. 2 jsou vyjmenovány základní typy ukazatelů spolehlivosti se stručným popisem.

Tab. 2 – Ukazatelé spolehlivosti

Jméno ukazatele	jednotky	Stručný popis
rP	[%]	Relativní počet případů (minut), kdy je absolutní hodnota ACE větší než 100 MW
rE	[%]	Relativní počet případů (hodin), kdy jsou absolutní hodnoty hodinových průměrů z ACE větší než 20 MW
n15	počet	Počet případů v daném intervalu, kdy hodnota ACE překročila 100 MW po dobu větší než 15 minut
μ_{dP}	[MW]	Střední hodnota průběhu ACE
σ_{dP}	[MW]	Směrodatná odchylka průběhu ACE
σ_{dE}	[MWh/h]	Směrodatná odchylka hodinových průběhů z ACE
E^2_{100}	[MWh^2]	Celková kvadratické energie událostí*).(Součet druhých mocnin hodnot energie jednotlivých událostí)

*) Událost je definována jako výkonová nerovnováha v PS, jejíž absolutní hodnota souvisle překračuje 100 MW po dobu nejméně 10 minut.

Úplný výčet ukazatelů spolehlivosti s podrobným popisem je uveden v [1]. Hodnoty vybraných ukazatelů spolehlivosti vypočítaných z historických průběhů z let 2003 – 2004 jsou pro názornost uvedeny v Tab. 3.

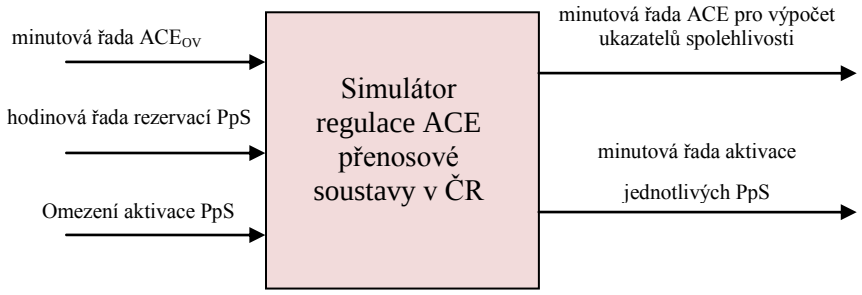
Tab. 3 – Historické hodnoty vybraných ukazatelů spolehlivosti

Jméno ukazatele	Historická hodnota ukazatele (počítáno z let 2003 - 2007)
rP	3.83%
rE	2.21%
n15	37
σ_{ACE}	48.41 MW

1.4 Simulace provozu přenosové soustavy

Pro účely analýz spolehlivosti přenosové soustavy v České republice byl v Centru aplikované kybernetiky ve spolupráci s PPS (společnost ČEPS, a. s.) v rámci projektu SESYS [1] vyvinut simulátor regulace ACE České přenosové soustavy. Jednoduché blokové schéma je na Obr. 4. Jedním z hlavních vstupů simulátoru je součet výkonové nerovnováhy nenarušeného provozu PS a výkonového deficitu způsobeného výpadky elektrárenských bloků. Součet těchto signálů je výkonová nerovnováha v otevřené smyčce ACE_{OV}. Tyto signály se generují ze statistických modelů výpadků elektrárenských bloků a provozu PS. Modely byly identifikovány z historických měření ACE_{OV} (viz [1]). Oba modely byly verifikovány a předpokládá se, že věrohodně popisují chování přenosové soustavy v České republice. Posledním důležitým vstupem simulátoru PS je rezervované množství jednotlivých PpS. V simulátoru jsou implementovány regulátory pro aktivaci PR a SR a dále je zde model dispečera PS, který aktivuje zbylé regulace popsané v kapitole 1.2.

Výstupem simulátoru je výkonová nerovnováha v uzavřené smyčce (ACE) a aktivace jednotlivých služeb. Z časového průběhu ACE se následně počítají ukazatele spolehlivosti. Spolehlivost PS je velmi závislá na náhodném chování ACE_{OV}. Aby byl minimalizován vliv této složky při výpočtech skutečných ukazatelů spolehlivosti, je provoz PS simulován opakovaně a ukazatele spolehlivosti se poté vypočítají zprůměrováním ukazatelů z jednotlivých simulací regulace výkonové nerovnováhy v PS. Popsaná metoda výpočtu se nazývá Monte-Carlo (dále MC). Minimální počet MC simulací pro odhad ukazatelů spolehlivosti byl stanoven na 50, což je kompromis mezi rychlostí výpočtu a dosahovanou přesností ukazatelů.



Obr. 4 – Jednoduché blokové schéma simulátoru provozu přenosové soustavy v ČR

1.5 Cíle práce

V rámci této práce byl vyvinut komplexní nástroj pro PPS, který umožňuje nalezení potřebného množství PpS zajišťující provoz PS s požadovanou spolehlivostí a následné optimální nakoupení tohoto množství ve výběrovém řízení. Nástroj pro plánování PpS je popsán v kapitole 2. Vývoj tohoto algoritmu navazuje na diplomovou práci Petra Filase [3] a výsledné řešení respektuje připomínky a návrhy, které byly vzneseny ze strany PPS. Algoritmus používá jiné metody hledání potřebného množství PpS než jaké použil Petr Filas. Stejné zůstaly pouze vstupy pro generování prostoru přípustných skladeb PpS popsané v kapitole 2.2. Druhá část této práce (kapitola 3) řeší úlohu optimálního nákupu PpS z nabídek vypsaných formou výběrového řízení.

Poslední část se zabývá tématem spolehlivosti přenosové soustavy v budoucích letech, kdy se počítá se zásadními změnami skladeb výrobních bloku elektrické energie a tím i s výrazně odlišným průběhem výkonové nerovnováhy v PS. K analýze byl mimo jiné použit nástroj iteračního plánování PpS z kapitoly 2. Na závěr úvodu ještě dodejme, že veškerá řešení a následné analýzy probíhaly v programovacím prostředí MATLAB®.

2 Iterační plánování podpůrných služeb

Iterační plánování podpůrných služeb má za cíl najít skladbu PpS s nejnižšími náklady na rezervaci pro definovaný optimalizační časový interval, která zároveň splňuje standardy spolehlivosti. K výpočtu nákladů za rezervaci jednotlivých PpS se používají cenové křivky, které nahrazují model trhu s podpůrnými službami (viz 1.2). Za skladbu splňující referenční ukazatele považujeme takovou skladbu, při jejímž použití k regulaci PS je dosaženo stejných nebo nižších hodnot ukazatelů spolehlivosti, než jsou hodnoty referenční. Referenční hodnoty ukazatelů lze zadat buď přímo, nebo pomocí referenční skladby PpS, potom jsou referenční hodnoty ukazatelů získány výpočtem z 500 realizací MC simulace provozu PS.

Iterační algoritmus hledá optimální skladbu PpS metodou větví a mezí (branch and bound). Na začátku je vygenerován diskrétní prostor přípustných kombinací PpS. Algoritmus poté tento prostor prohledává a vyhodnocuje ukazatele spolehlivosti jednotlivých PpS pomocí simulátoru regulace ACE v PS České republiky [1]. V algoritmu jsou implementovány heuristické metody pro prořezávání stavového prostoru řešení a výběr směru prohledávání. Podrobný popis algoritmu a potřebných vstupů je v následujících kapitolách.

2.1 Popis iteračního algoritmu

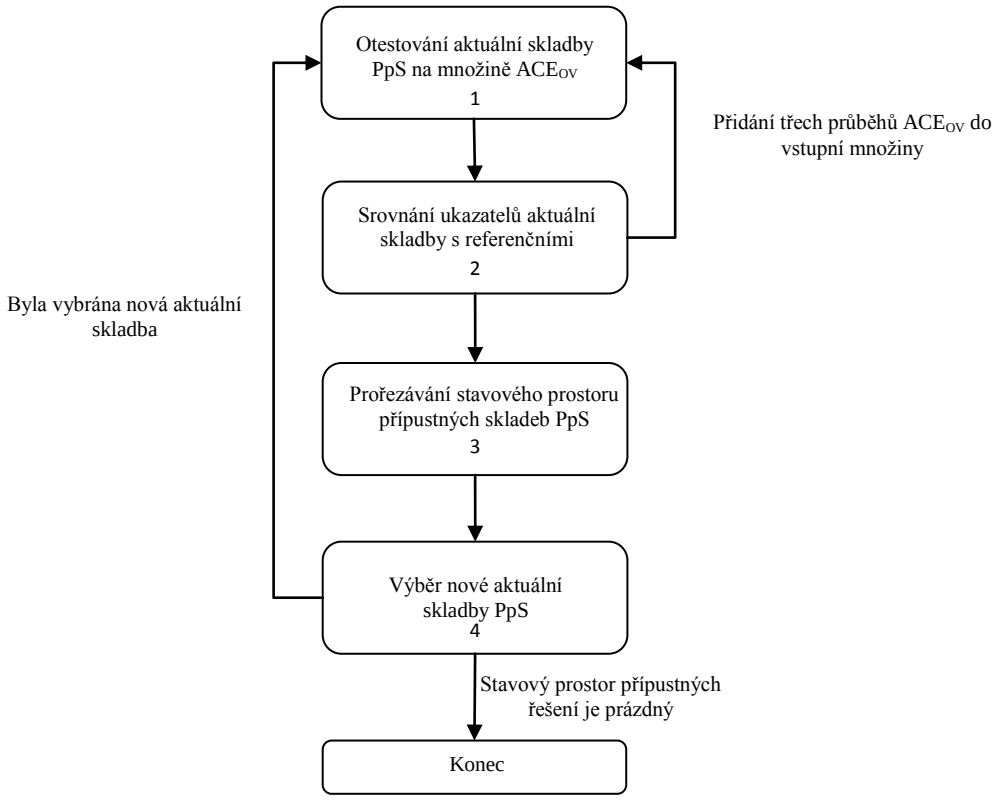
Při spuštění se vybere náhodně skladba z diskrétního prostoru přípustných řešení, která se stane aktuální skladbou PpS. Dále je běh algoritmu možné popsat podle následujících bodů, které se vztahují k vývojovému diagramu na Obr. 5.

1) Simulace provozu PS s použitím regulačních rozsahů z aktuální skladby PpS pro množinu vstupních průběhů ACE_{OV}. Při prvním otestování skladby se použije 6 průběhů ACE_{OV}. Následuje výpočet ukazatelů spolehlivosti pro všechny získané průběhy ACE. Šest průběhů ACE_{OV} pro první testování aktuální skladby je kompromis mezi rychlostí výpočtu a přesností odhadu ukazatelů spolehlivosti soustavy.

2) Následuje porovnání vypočtených ukazatelů s referenčními, které je podrobně popsané v kapitole 2.1.1. Pokud při porovnání ukazatelů není možné vzhledem k nejistotě rozhodnout, zda jsou referenční ukazatele splněny či nikoliv, jsou do množiny vstupních časových řad ACE_{OV} přidány další tři časové průběhy a algoritmus se vrací do bodu 1. Tím je docíleno, že následný výpočet bude přesnější (menší rozptyl odhadu středních hodnot ukazatelů, viz Obr. 7). Tento cyklus skončí, jakmile lze rozhodnout, zda aktuální skladba PpS splnila referenční ukazatele nebo pokud počet průběhů ACE_{OV} ve vstupní množině dosáhl maximálního počtu, který je v algoritmu nastaven na 51 z důvodů rychlosti výpočtu.

3) Prořezávání prostoru přípustných řešení zmenšuje počet skladeb PpS, které jsou během hledání optimální skladby testovány v simulátoru PS. Bez tohoto prořezávání bychom museli otestovat celý prostor přípustných řešení, což je časově neúnosné a značně neefektivní. Podrobný popis jak prořezávání probíhá je popsán v 2.1.2.

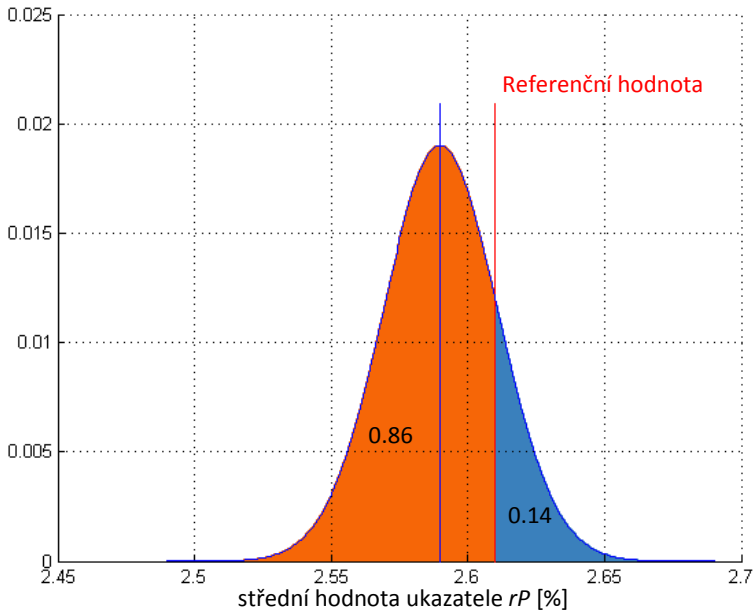
4) Výběr nové aktuální skladby pro další kolo testování. Podrobný popis viz 2.1.3. Pokud je úspěšně vybrána nová aktuální skladba algoritmu se vrací do bodu 1, jinak končí.



Obr. 5 – Blokové schéma iteračního algoritmu

2.1.1 Porovnání ukazatelů spolehlivosti

Cílem porovnání ukazatelů je zjistit, zda s aktuálně testovanou skladbou PpS lze splnit referenční ukazatele spolehlivosti. Z důvodu rychlosti algoritmu není k dispozici přesná hodnota ukazatelů spolehlivosti pro testovanou skladbu (jako dostatečně přesnou uvažujeme hodnotu získanou z alespoň 500 realizací MC), ale pouze její odhad počítaný z několika realizací MC (maximálně z 51). Testovaná skladba splní referenční ukazatele spolehlivosti, pokud na dané hladině významnosti je střední hodnota ukazatele menší než referenční. K výpočtu mezí, v nichž na dané hladině významnosti hodnota ukazatele leží, je použit oboustranný interval spolehlivosti, jehož odvození je uvedeno v [4]. Popsaná úvaha je zobrazena na Obr. 6, kde je porovnávána referenční hodnota ukazatele *rP* se střední hodnotou ukazatele vypočítané z 51 MC simulací provozu PS s nějakou skladbou PpS. Modrá křivka na obrázku je hustota pravděpodobnosti střední hodnoty ukazatele. Červená přímka představuje hodnotu referenčního ukazatele. Obrázek ilustruje situaci, kdy je střední hodnota ukazatele menší než referenční s pravděpodobností 0.86.



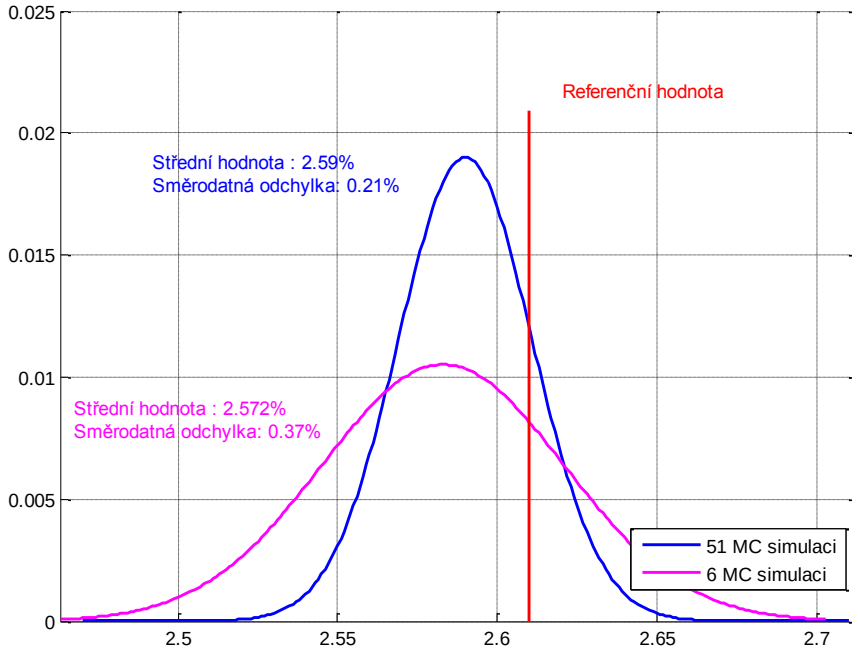
Obr. 6 – Příklad porovnání ukazatele *rP* v iteračním algoritmu

Při porovnávání odhadu středních hodnot ukazatelů a referenčních ukazatelů jednotlivých služeb mohou v algoritmu nastat tři situace, které jsou popsány v Tab. 4. Pokud při porovnání ukazatelů nastane možnost C, je potřeba zpřesnit odhad středních hodnot ukazatelů. Kvůli tomu se zvýší počet simulací provozu elektrické soustavy, z kterých je odhad počítán. Na Obr. 7 je příklad, jak se mění odhad střední hodnoty ukazatele *rP* v závislosti na počtu realizací ACE, z kterých je odhadován. Modrý a fialový průběh jsou hustoty pravděpodobnosti střední hodnoty ukazatele *rP*. Fialový průběh je odhad spočítaný z 6 simulací provozu PS a modrý průběh je odhad z 51 simulací. Na obrázku je vidět, jak se odhad střední hodnoty zpřesňuje (menší směrodatná odchylka) a díky tomu dochází i k zvětšování pravděpodobnosti, že je skutečný ukazatel menší než referenční.

Pokud i po otestování skladby PpS na 51 MC simulací nastane při porovnání možnost C, je skladba označena jako nerozhodnutá. V dalším kroku algoritmu nedochází k prořezání prostoru přípustných řešení a nová aktuální skladba se vybere způsobem, jako kdyby skladba nerozhodnutá PpS nesplnila ukazatele spolehlivosti (varianta B).

Tab. 4 – Možné výsledky porovnání odhadů středních hodnot ukazatelů s referenčními

A	Střední hodnoty všech ukazatelů jsou menší než referenční s pravděpodobností větší než zvolená hodnota. Testovaná skladba PpS splnila všechny ukazatele s požadovanou pravděpodobností.
B	Alespoň jeden ukazatel je větší než referenční ukazatel s pravděpodobností větší než zvolená hodnota. Testovaná skladba PpS nesplnila aspoň jeden ukazatel s požadovanou pravděpodobností.
C	Pravděpodobnost, že jsou ukazatele menší než referenční, je menší než zvolená hodnota a zároveň pravděpodobnost, že jsou ukazatele větší než referenční ukazatele, je také menší než zvolená hodnota. V tomto případě nemůžeme o skladbě rozhodnout.



Obr. 7 – Příklad zpřesnění odhadu hodnoty ukazatele rP

2.1.2 Prořezávání prostoru přípustných skladeb PpS

V iteračním algoritmu jsou implementovány dva způsoby prořezávání prostoru přípustných skladeb PpS, popsané v následujících dvou odstavcích. Jejich použití závisí na výsledku porovnání vypočtených ukazatelů s referenčními.

Jestliže aktuální skladba splnila všechny referenční ukazatele, je tato skladba nejlepší doposud nalezenou skladbou. V tomto případě je cena této skladby horním odhadem ceny optimální skladby PpS a z prostoru přípustných řešení jsou odstraněny všechny skladby s vyšší cenou, než je tento odhad.

Pokud je aspoň jeden ukazatel větší než referenční, neboli skladba nesplnila referenční ukazatele spolehlivosti, je množina přípustných řešení prořezána podle množství služeb. Podstata tohoto prořezávání je založena na monotónní závislosti hodnot ukazatelů na množství jednotlivých služeb PpS. To znamená, že pokud se sníží rezervace určité služby, nedojde k snížení hodnoty ukazatelů (není možné regulovat přenosovou soustavu lépe s menším regulačním rozsahem dané služby). Proto je možné z prostoru přípustných skladeb PpS vyřadit ty, které mají menší rezervaci dané služby a rezervace zbytku služeb se nezvýší. Tento předpoklad byl ověřen na výsledcích velkého množství simulačních výsledků získaných z práce Petra Filase [3]. Z jeho práce jsou k dispozici výsledky 50 ročních MC simulací provozu elektrické soustavy, ze kterých jsou spočteny ukazatele spolehlivosti pro velké množství různých skladeb PpS.

Monotónní závislost ukazatelů na množství jednotlivých služeb PpS neplatí vždy, a proto prořezávání prostoru přípustných řešení musí být provedeno obezřetně, aby nebyla vyřazena optimální skladba PpS. V tabulce Tab. 5 jsou shrnuty poznatky o monotónnosti používaných ukazatelů spolehlivosti.

Tab. 5 – Poznatky o monotónnosti závislosti množství rezervovaných PpS na hodnotě ukazatelů

Ukazatel	Poznatek
rP	Ukazatel není monotónní vzhledem k rezervovanému množství služeb TR^+a TR^-
rE	Ukazatel není monotónní vzhledem k rezervovanému množství SR
n15, σ_{dP}	Ukazatele jsou monotónní vzhledem ke všem službám
E^2_{100}	Nedodržuje monotónnost prakticky v žádné službě.

To, že monotónnost vůči ukazatelům *rP* a *rE* není zachována, je způsobeno pravidly, podle kterých simulátor regulace ACE v PS aktivuje jednotlivé PpS.Hlavně pak pravidly definující substitucí jednoho druhu PpS za jiný a rychlostí aktivace případně deaktivace jednotlivých služeb při rychlých fluktuacích výkonu v PS. Například při malém množství rezervované TR^+ během velkého výkonového deficitu je místo TR^+ aktivován QS (při dostatečném množství rezervace TR^+ se QS používá jenom na začátku výpadku bloku), který je nejrychlejší regulační energií a dokáže rychleji reagovat na případnou rychlou změnu výkonového deficitu než ostatní PpS. Tím je dosaženo menší protiregulace a menší hodnoty ukazatele *rP*.

Dopad těchto zjištění o monotónnosti je vysvětlen na následujícím příkladu. Jestliže aktuální testovaná skladba (např. Tab. 6) nesplní ukazatel *rE*, je možné vyřadit z prostoru přípustných řešení všechny skladby, které mají menší nebo stejnou rezervaci u služeb TR^+, TR^-, QS a DZ. Nemůžou se ale vyřadit skladby, u kterých je menší rezervace SR, protože je možné, že snížením rezervovaného množství SR by se hodnota ukazatele *rE* zmenšila a mohla by poté být menší než referenční.

Tab. 6 – Příklad skladby PpS

	SR [MW]	TR^+ [MW]	TR^- [MW]	QS [MW]	DZ [MW]
Aktuální skladba	300	260	100	600	0

2.1.3 Výběr aktuální skladby PpS

V iteračním algoritmu jsou implementovány dvě metody výběru nové aktuální skladby PpS. Jejich použití závisí stejně jako u prořezávání stavového prostoru přípustných řešení na výsledku porovnání ukazatelů aktuální skladby s referenčními ukazateli. Výběr nové skladby PpS může být také interpretován jako heuristický výběr směru prohledávání stavového prostoru řešení. Protože prostor přípustných řešení je konečný, může se stát, že ve vybraném směru se žádná přípustná skladba nenachází. Z tohoto důvodu se skládá každá metoda výběru nové skladby PpS z několika pravidel, která se použijí v pořadí, jak jsou uvedena v následujícím výčtu. Pokud pravidlo nelze aplikovat – tj. není v prostoru přípustných řešení skladba, která pravidlu vyhovuje – použije se pravidlo následující. Aby byla nová aktuální skladba vybrána vždy, pokud množina přípustných řešení není prázdná, je posledním pravidlem v každé metodě náhodný výběr skladby ze zbylého prostoru přípustných řešení.

Jestliže referenční ukazatele nebyly splněny, algoritmus vybírá novou skladbu PpS podle následujících pravidel:

1. Výběr skladby PpS z prostoru přípustných řešení, která má oproti aktuální skladbě PpS větší množství služby, která byla nejvíce používaná. Nejvíce používaná služba je ta, jejíž aktivace při simulacích provozu elektrické soustavy dosáhla nejčastěji rezervovaného množství (aktivace služby se dostala do saturace). Rezervace ostatních služeb zůstávají beze změny.
2. Náhodným výběr skladby PpS z prostoru přípustných řešení.

Pokud aktuální skladba splnila referenční ukazatele, algoritmus vybere novou skladbu PpS následujícími pravidly:

1. Výběr skladby PpS z prostoru přípustných řešení, která má oproti aktuální skladbě menší rezervované množství služby, která byla nejméně používaná. Nejméně používanou služba je ta, jejíž aktivace při simulacích provozu elektrické soustavy dosáhla rezervovaného množství v nejmenším počtu případů. Rezervace ostatních služeb zůstávají beze změny.
2. Výběr skladby PpS z prostoru přípustných řešení s nižším rezervovaným množstvím služby s nejvyšší cenou za MW.
3. Náhodným výběrem z přípustných řešení.

2.2 Vstupy a výstupy algoritmu

Vstupy iteračního algoritmu můžeme rozdělit na tři hlavní skupiny. První skupinu tvoří vstupy související s nastavením algoritmu hledání optimální skladby PpS. Druhá skupina obsahuje omezení hledané skladby PpS a v poslední skupině jsou vstupy potřebné pro spuštění simulace provozu PS pro výpočet ukazatelů spolehlivosti.

Parametry iteračního algoritmu společně se stručným popisem jejich významu jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 – Seznam parametrů iteračního algoritmu

Požadovaná spolehlivost porovnání ukazatelů	Hodnota z rozsahu 0 – 1 určující požadovanou pravděpodobnost při porovnání ukazatelů. (více viz kapitola 2.1.1)
Rozhodovací ukazatele	Výčet ukazatelů, které se používají pro porovnání testovaných skladeb PpS
Referenční skladba PpS	Skladba PpS, která se použije pro výpočet referenčních ukazatelů a zároveň její náklady tvoří omezení na maximální náklady hledané PpS
Referenční ukazatele	Referenční ukazatele omezující výběr optimální skladby PpS
Časové pásmo	Definice časového pásma, ve které provádím optimalizaci. Možná pásma jsou pracovní den, pracovní noc, nepracovní den a nepracovní noc (PD, PN, ND a NN).
Začátek a konec optimalizačního období	Společně s časovým pásmem vymezují období, pro které algoritmus hledá optimální skladbu PpS. Tento údaj je důležitý zejména při výpočtu cen jednotlivých skladeb PpS
Elasticita cen PpS	Relativních cenové křivky PpS pro jednotlivé služby (křivky jsou zadány pro každý týden a pásmo zvlášť).
Referenční ceny PpS	Referenční cena pro každou službu. Vynásobením relativních cenových křivek touto cenou dostaneme křivky absolutních cen služeb.

Druhá skupina vstupů definuje diskrétní prostor přípustných skladeb PpS, ve kterých algoritmus hledá nejlevnější skladbu PpS splňující referenční ukazatele spolehlivosti. Prvním vstupem z této skupiny je granularita PpS. Hodnota granularit společně s horní a dolní mezí pro jednotlivé PpS použité při výpočtech jsou uvedeny v Tab. 8. Další omezení skladeb PpS jsou zadány formou nerovnic (2-1), které každá skladba musí splňovat. První nerovnice reflektuje doporučení na minimální množství kladných PpS, které by PPS měl mít rezervováno vzhledem k velikosti největšího bloku v PS (pravá strana nerovnice). Toto doporučené množství je také známo jako pravidlo N-1 a mělo by zajistit schopnost PPS snížit výkonový deficit způsobený výpadkem největšího elektrárenského bloku do 15 minut. Při výpočtech byla použita přibližná hodnota 1000MW. Zbylé dvě nerovnice jsou pouze omezením prostoru přípustných řešení, které definoval zadavatel a které vychází z expertních znalostí o provozu PS. Diskrétní prostor uvažovaných řešení splňující definované nerovnice je tvořen 60476 různými kombinacemi služeb PpS.

Tab. 8 – Omezení stavového prostoru jednotlivých služeb PpS

Služba PpS	Horní mez [MW]	Dolní mez [MW]	Krok [MW]
SR	200	600	10
TR^+	0	700	50
TR^-	0	400	50
QS	300	1000	100
DZ	0	200	50

$$SR + \frac{1}{3}TR^+ + QS \geq 1000$$

$$SR + TR^+ + TR^- + QS + DZ \leq 2000 \qquad (2\text{-}1)$$

$$SR + TR^- \leq 600$$

Do poslední skupiny vstupů iteračního plánování patří množina časový průběhů ACE_{OV}. Časový průběh ACE_{OV} je hlavním vstupem simulátoru provozu PS. Aby bylo dosaženo větší přesnosti vypočtených ukazatelů spolehlivosti i s použitím malého množství testovaných průběhů ACE_{OV}, byly navrženy dvě metody jak testovací časové průběhy vybírat. Oba způsoby vybírají průběhy ACE_{OV} z velké množiny náhodně vygenerovaných průběhů, při testování algoritmu bylo v této náhodně vygenerované množině 500 průběhů ACE_{OV}. Výběr z této množiny probíhá po trojicích, důvodem je způsob, kterým jsou skladby PpS v iteračním algoritmu testovány (viz popis algoritmu v kapitole 2.1). Výběr probíhá těmito způsoby:

1. Všech 500 průběhů ACE_{OV} je seřazeno sestupně podle vypočtených ukazatelů spolehlivosti z těchto průběhů. Vybraná trojice průběhu ACE_{OV}

obsahuje první průběh, poslední průběh a medián ze seřazených průběhů ACE_{OV}. Tím je zajištěno, že vybraná trojice reprezentuje široké spektrum možných časových průběhů ACE_{OV}. Protože ukazatelů je více, byly průběhy ACE_{OV} seřazeny podle součtu ukazatelů spolehlivosti, které byly normovány na interval $\langle 0,1 \rangle$. Hodnota každého ukazatele je normovaná podle vztahu,

$$X_{in} = \frac{\|X_i\|}{\max\limits_{\forall i}(\|X\|)}, \tag{2-2}$$

kde X_i je hodnota daného typu ukazatele i-tého průběhu ACE_{OV}.

2. Náhodně vygenerované průběhy ACE_{OV} jsou seřazeny podle ukazatelů spolehlivosti v uzavřené smyčce vypočítaných z regulace průběhu ACE_{OV} referenční skladbou PpS. Seřazením průběhů podle ukazatelů v uzavřené smyčce přidáváme do výběru informaci o vlivu dynamiky jednotlivých služeb na výsledné ukazatele. Průběhy byly seřazený podle normovaného součtu hodnot jednotlivých ukazatelů spolehlivosti v uzavřené smyčce. Hodnoty byly normovány stejně jako v předchozí metodě podle vztahu (2-2). Průběhy ACE_{OV} byly opět vybrány po trojicích. Jako první byly vybrány průběhy s nejhoršími a nejlepšími ukazateli, třetí průběh byl vybrán tak, aby se průměrný ukazatel z dané trojice co nejvíce přiblížil průměru z 500 průběhů MC simulací. Tímto postupem se snažíme dosáhnout lepšího odhadu skutečné hodnoty ukazatelů s použitím menší množiny vstupních průběhů ACE_{OV}.

Hlavním výstupem algoritmu je nejlevnější skladba z prostoru přípustných skladeb, které splnila všechny referenční ukazatele spolehlivosti s požadovanou pravděpodobností. Dalším výstupem je množina nerozhodnutých skladeb PpS (definice viz 2.1.1)

2.3 Výsledky

Všechny výpočty iteračního algoritmu, které jsou v této kapitole prezentovány, proběhly s optimalizačním časovým intervalem jeden měsíc. Měsíc byl vybrán, protože časové řady výkonové nerovnováhy nenarušeného provozu jsou v modelu nenarušeného provozu v simulátoru regulace ACE v PS generovány s parametry, které se mění po měsících. Minimálně po měsících se také mění i dostupný disponibilní výkon pro autoregulaci výpadků elektrárenských bloků generovaných ve výpadkovém modelu. Disponibilní výkon je v podstatě volný výrobní výkon výrobce elektřiny, který zaktivuje v případě, že některý z jeho elektrárenských bloků vypadne, aby tím snížil výkonový deficit v PS, kterou výpadkem způsobí. V samotném iteračním algoritmu není hledání optimální skladby PpS časově omezeno a závisí pouze na vstupních časových řadách ACE_{OV}. Pro srovnání nalezených skladeb PpS z iteračního algoritmu jsou u výsledků uvedeny skladby PpS z předpokládané roční přípravy provozu pro rok 2009 (PRPP). Roční diagramy rezervovaného výkonu jednotlivých služeb z PRPP jsou uvedeny v příloze na Obr. 31 až Obr. 35. Prezentované ukazatele spolehlivosti skladeb PpS jsou hodnoty spočtené z 500 MC simulací provozu PS, proto je lze považovat za přesný odhad skutečných ukazatelů spolehlivosti (Tab. 9).

Tab. 9 – Maximální relativní chyba ukazatelů spolehlivosti spočtených z 500 MC simulací provozu PS na hladině významnosti 0.95

Jméno ukazatele spolehlivosti	Maximální relativní chyba ukazatelů [%]
rP	0,83
rE	2,1
n15	8,2
$\sigma_{d\tilde{P}}$	0,6

2.3.1 Test s referenční skladbou PpS

V tomto testu iterační algoritmus hledal optimální skladbu PpS pro měsíc leden. Vstupem algoritmu je lednová skladba PpS z PRPP (v tabulkách Ref. skladba). V prvním kroku algoritmu byly spočítány referenční ukazatele z 500 MC simulací provozu PS se vstupní referenční skladbou PpS. Referenční ukazatele jsou uvedeny v Tab. 10, tyto tipy ukazatelů byly vybrány, protože máme informace o monotonii závislosti jejich velikosti na rezervovaném množství PpS, které můžeme využít při prořezávání prostoru přípustných skladeb PpS. Úkolem algoritmu je nalézt skladbu PpS, která by splnila všechny referenční ukazatele a zároveň by byla levnější než zadaná referenční skladba.

Tab. 10 – Vypočítané referenční ukazatele pro měsíc leden

Jméno ukazatele spolehlivosti	*rP* [%]	*rE* [%]	*n15* [-]	σ_{dP} [MW]
Referenční hodnota	2.63	2.55	0.06	45.40

Problém byl řešen iteračním algoritmem s dvěmi různými sadami vstupních průběhů ACE_{OV} vybraných z 500 náhodně vygenerovaných časových průběhů metodami, které jsou popsány v kap 2.2. Ani v jednom případě iterační algoritmus nenašel skladbu PpS, která by byla levnější než referenční a zároveň by splnila referenční ukazatele spolehlivosti uvedené v Tab. 10 s pravděpodobností větší než 0.95. V takto zadané úloze tedy není dostatečný prostor pro cenovou optimalizaci. To může být způsobeno faktem, že referenční skladba definuje maximální cenu a zároveň hodnotu ukazatelů spolehlivosti a tedy i jejich vzájemný poměr. Tato úloha by měla řešení pouze v případě, že by referenční skladba byla navržena velmi špatně, což se u PRPP nestalo.

Protože nebyla nalezena optimální skladba PpS, jsou v Tab. 11 a Tab. 12 uvedeny nerozhodnuté skladby (definice viz kap 2.1.1). Z Tab. 11 a Tab. 12 je vidět, že všechny skladby označené jako nerozhodnuté při výpočtu iterativního algoritmu s průběhy ACE_{OV} vybranými podle ukazatelů v otevřené smyčce jsou obsaženy i v nerozhodnutých skladbách iterativního algoritmu s druhou sadou vstupů. Z toho vyplývá, že rozdíl ve vstupech způsobený zahrnutím vlivu dynamiky služeb do výpočtu se neprojeví výrazně odlišným výsledkem. Důvod, proč iterační algoritmus se vstupy vybranými podle ukazatelů v otevřené smyčce ponechal méně skladeb PpS v množině nerozhodnutých, je zřejmě vyšší průměr ukazatelů z vybraných průběhů ACE_{OV} v otevřené smyčce než je průměr z vybíraných 500 průběhů ACE_{OV}. To v podstatě znamená, že vybraná množina ACE_{OV} je obtížněji regulovatelná než průměrný průběh ACE_{OV} a proto iterační algoritmus bude s touto množinou vstupů více selektivní.

Podle ukazatelů prezentovaných v Tab. 11 a Tab. 12 vypadá v obou případech jako nejlepší skladba V4, která je o 1,08 % levnější než referenční skladba a zároveň všechny hodnot ukazatelů spolehlivosti jsou menší než referenční ukazatele. Ukazatele spolehlivosti skladby V4 jsou velmi blízko referenčním ukazatelům, což je důvod, proč nebyla skladba iteračním algoritmem, kde se provádí maximálně pouze 51 MC simulací provozu PS a rozptyl hodnot ukazatelů je tedy vyšší, označena jako optimální (hodnoty ukazatelů byly nižší než referenční s pravděpodobností nižší než 0.95).

Úspora 1,08% není velká, zvláště bereme-li v úvalu velkou řadu nepřesností ve vstupních datech, například v odhadnutých cenových křivkách jednotlivých služeb. Dalším problémem je předpoklad, že se nám navržené množství PpS podaří přesně nakoupit ve výběrovém řízení, což není zaručeno.

Tab. 11 – Nerozhodnuté skladby z iteračního algoritmu

(vstupy ACE_{OV} vybrané podle ukazatelů v uzavřené smyčce)

Označení skladby	PpS					Relativní naklady PpS
	RZSR	*RZTR+*	*RZTR-*	*RZSQ*	*RZDZ*	
[-]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[%]
Ref. skladba	290	260	111	570	166	100,0
V1	340	200	100	600	0	98,8
V2	290	150	150	700	50	99,6
V3	350	150	150	600	0	99,6
V4	320	250	100	600	0	98,9

	Ukazatele spolehlivosti							
	rP	*rE*	*n15*	$E2_{100}$	μ_{dP}	σ_{dP}	σ_{dE}	E_{100}
	[%]	[%]	[-]	[MW^2]	[MW]	[MW]	[MW/h]	[MW]
Ref. skladba	**2,63**	**2,55**	**1,89**	**1 024 875**	**-0,50**	**45,40**	**11,60**	**25 696**
V1	2,60	2,48	1,37	629 174	-0,05	45,41	12,00	25 682
V2	2,62	2,33	1,36	819 584	0,10	45,67	12,05	25 752
V3	2,59	2,07	1,14	894 767	0,30	45,71	12,22	25 719
V4	2,62	2,53	1,63	499 800	-0,27	45,23	11,59	25 679

Tab. 12 – Nerozhodnuté skladby z iteračního algoritmu

(vstupy ACE_{OV} vybrané podle ukazatelů v otevřené smyčce)

	Výsledek					
Označení skladby	PpS					Relativní naklady PpS
	RZSR	*RZTR+*	*RZTR-*	*RZSQ*	*RZDZ*	
[-]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[%]
Ref. skladba	290	260	111	570	166	100,0
V1	340	200	100	600	0	98,8
V2	310	100	150	700	50	99,6
V3	270	150	150	700	100	99,0
V4	320	250	100	600	0	98,9
V5	280	200	150	700	0	99,6
V6	290	150	150	700	50	99,6
V7	350	150	150	600	0	99,6
V8	300	300	100	600	0	98,9

	Ukazatele spolehlivosti							
	rP	*rE*	*n15*	$E2_{100}$	μ_{dP}	σ_{dP}	σ_{dE}	E_{100}
	[%]	[%]	[-]	[MW^2]	[MW]	[MW]	[MW/h]	[MW]
Ref. skladba	**2,63**	**2,55**	**1,89**	**1 024 875**	**-0,50**	**45,40**	**11,60**	**25 696**
V1	2,60	2,48	1,37	629 174	-0,05	45,41	12,00	25 682
V2	2,62	2,55	1,31	1 016 815	0,30	45,95	12,80	25 772
V3	2,65	2,54	1,59	642 575	-0,07	45,64	11,96	25 780
V4	2,62	2,53	1,63	499 800	-0,27	45,23	11,59	25 679
V5	2,65	2,27	1,54	873 588	0,06	45,82	12,23	25 797
V6	2,62	2,33	1,36	819 584	0,10	45,67	12,05	25 752
V7	2,59	2,07	1,14	894 767	0,30	45,71	12,22	25 719
V8	2,66	2,72	2,08	413 945	-0,51	45,28	11,64	25 724

Z výsledků prvního testu vyplývá, že obě metody výběru vstupních průběhů ACE_{OV} jsou srovnatelné, a proto z důvodů časové úspory budou další testy prováděny pouze s vstupní množinou ACE_{OV} vybrané podle ukazatelů spolehlivosti uzavřené smyčky.

2.3.2 *Optimální skladba PpS na měsíc leden podle historických ukazatelů spolehlivosti*

Úkolem iteračního algoritmu v tomto testu je najít optimální skladbu PpS pro měsíc leden. Vstupem algoritmu jsou referenční hodnoty ukazatelů spolehlivosti spočtené z historických průběhů ACE_{OV}. Historické hodnoty ukazatelů spolehlivosti pro jednotlivé měsíce (viz Tab. 13) jsou průměrné hodnoty ukazatelů daného měsíce z let 2003 až 2007. Hledání optimální skladby PpS v tomto testu není omezeno výší nákladů za rezervaci služeb. Skladba PpS nalezená iteračním algoritmem je spolu se skladbou z PRPP (Ref. skladba) uvedena v Tab. 14. Ukazatele spolehlivosti obou skladeb PpS jsou vypsány v Tab. 15. Z tabulek je vidět, že ukazatele spolehlivosti nalezené skladby PpS jsou vyšší než ukazatele skladby z PRPP, ale i tak skladba stále splňuje požadované referenční ukazatele definované historickými průběhy ACE. Náklady na rezervaci navržené skladba PpS jsou o 13 % nižší než náklady na rezervaci skladby z PRPP, což již přestavuje značnou úsporu při dodržení požadované spolehlivosti PS dané historií.

Tab. 13 – Historické hodnoty ukazatelů spolehlivosti

měsíc	*rP* [%]	*rE* [%]	n15 [-]	$\sigma_{d\tilde{P}}$ [MW]
1	4,73	4,50	4,50	53,24
2	4,60	1,55	3,75	48,89
3	4,17	2,32	2,00	47,49
4	3,63	2,03	0,75	46,41
5	3,32	1,11	2,25	52,54
6	2,50	1,16	8,25	48,77
7	2,89	0,79	1,50	40,74
8	3,06	1,54	3,75	43,54
9	3,67	2,09	1,50	46,80
10	4,90	3,15	3,75	57,10
11	4,59	3,85	1,25	49,23
12	3,93	2,42	3,75	46,15
Roční ukazatele	3,83	2,21	37	48,41

Tab. 14 – Výsledná optimální skladba PpS a skladba z RPP pro měsíc leden

Označení skladby	PpS					Relativní naklady PpS
	RZSR	*RZTR+*	*RZTR-*	*RZSQ*	*RZDZ*	
[-]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[%]
Ref. skladba	290	260	112	570	166	100,0
V1	250	150	150	700	0	86,9

Tab. 15 – Ukazatele spolehlivosti optimální skladby PpS a skladby z RPP pro měsíc leden

	Ukazatele spolehlivosti							
	rP	*rE*	*n15*	$E2_{100}$	μ_{dP}	σ_{dP}	σ_{dE}	E_{100}
	[%]	[%]	[-]	[MW^2]	[MW]	[MW]	[MW/h]	[MW]
Ref. skladba	2,63	2,55	1,89	1 024 875	-0,50	45,40	11,60	25 696
V1	2,87	3,30	3,02	3 274 154	0,46	48,43	16,64	26 284

2.3.3 Roční nákup PpS

Posledním testem iteračního algoritmu bylo najít optimální skladby PpS pro každý měsíc v roce. Navržené skladby mají zajistit, aby byla PS regulována se stejnou spolehlivostí po celý rok. Jedná se tedy o 12 nezávislých výpočtů iteračního algoritmu. Referenční hodnota ukazatelů pro každý výpočet je stejná a jedná se průměr historických ukazatelů pro jednotlivé měsíce. Hodnoty použitých referenčních ukazatelů jsou uvedeny v posledním řádku Tab. 13. K porovnání spolehlivosti jednotlivých skladeb byly v iteračním algoritmu použity ukazatele *rP*, *rE* a σ_{dP} . V Tab. 16 jsou pro srovnání se skladbou PpS navrženou iteračním algoritmem (Tab. 17) uvedeny skladby PpS z PRPP pro rok 2009. Roční diagramy nákupu navržené skladby PpS jsou na Obr. 11 až Obr. 15.

Tab. 16 – Skladby PpS pro jednotlivé měsíce z předpokládané roční přípravy provozu

Měsíc	PpS				
	RZSR	*RZTR+*	*RZTR-*	*RZSQ*	*RZDZ*
[-]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
1	290	260	112	570	166
2	290	257	106	570	166
3	290	265	113	570	166
4	290	267	109	570	166
5	290	261	104	570	166
6	280	249	103	570	166
7	280	247	103	570	166
8	280	248	103	570	166
9	290	261	109	570	166
10	290	267	113	570	166
11	290	267	106	570	166
12	290	260	128	570	166

Tab. 17 – Skladby PpS pro jednotlivé měsíce nalezené iteračním algoritmem

Měsíc	PpS					Relativní náklady PpS
	RZSR	*RZTR+*	*RZTR-*	*RZSQ*	*RZDZ*	
[-]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[%]
1	240	250	250	700	0	98
2	280	100	150	700	0	88
3	250	150	150	700	0	87
4	250	150	200	700	0	91
5	270	100	150	700	0	84
6	270	100	150	700	0	90
7	280	100	100	700	50	90
8	260	150	150	700	0	88
9	240	250	200	700	50	98
10	300	300	100	600	0	95
11	370	250	200	600	0	105
12	350	150	150	600	0	92

Srovnání dosažených ukazatelů spolehlivosti pro jednotlivé měsíce a skladby PpS je zobrazeno na Obr. 8 až Obr. 10. V posledním sloupci Tab. 17 je srovnání relativních nákladů na rezervaci PpS v jednotlivých měsících. Sto procent představuje náklady skladby PpS z PRPP pro daný měsíc. Na Obr. 8 až Obr. 10 jsou hodnoty ukazatelů spolehlivosti nalezené optimální skladby a skladby z RPP. Na obrázcích je také vyznačena referenční hodnota daného ukazatele. Z obrázku lze učinit několik závěrů o nalezených optimálních skladbách PpS:

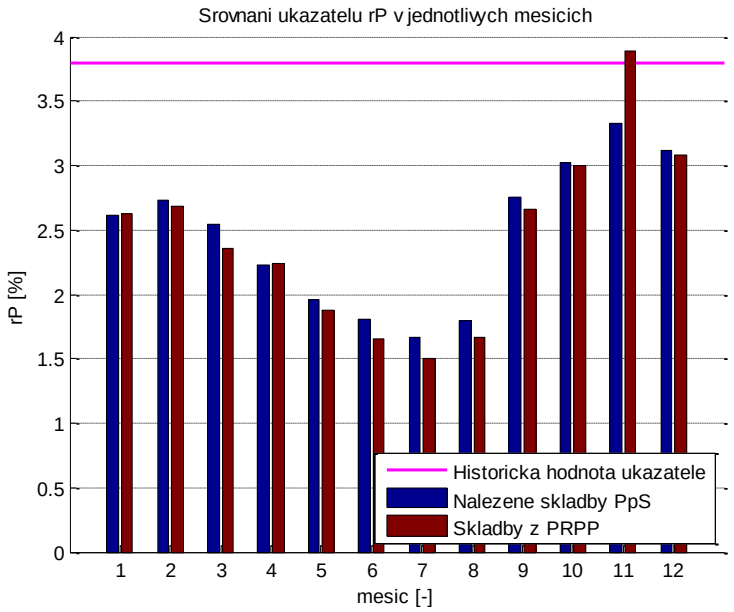
a) Na rozdíl od skladeb z PRPP, skladby PpS nalezené iteračním algoritmem vždy splnily referenční ukazatele spolehlivosti. Tato skutečnost naznačuje, že porovnání ukazatelů (viz kap 2.1.1) s požadovanou pravděpodobností 0.95 je dostatečné. Nedochází tedy k situacím, kdy by ukazatele vypočtené 500 MC simulacemi provozu PS s nalezenou skladbou PpS byly větší než referenční.

b) Náklady na rezervaci nalezených skladeb PpS jsou téměř ve všech měsících nižší, než jsou náklady na rezervaci skladeb PpS z PRPP. Jedinou výjimkou je měsíc listopad, ve kterém PRPP nesplnila ani jeden referenční ukazatel spolehlivosti. Aby byly referenční ukazatele splněny, musí být rezervován celkově větší objem PpS a hlavně pak drahé SR. Zajímavé jsou dále měsíce leden a duben, ve kterých se podařilo iteračnímu algoritmu nalézt skladby PpS, které na rozdíl od PRPP splnily všechny referenční ukazatele a navíc jsou tyto skladby levnější než PRPP.

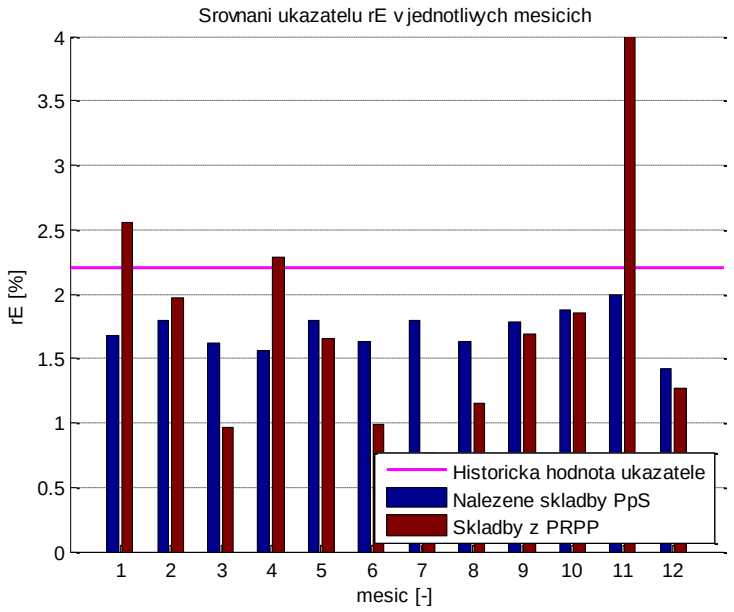
c) Ukazatele spolehlivosti provozu PS pro jednotlivé měsíce dosažené navrženými skladbami PpS mají menší rozptyl než ukazatele skladeb z PRPP, což odpovídá požadavku, aby byla PS regulována celý rok s přibližně stejnou spolehlivostí. Větší rozdíly hodnot ukazatelů pro jednotlivé měsíce nastaly u ukazatele *rP*, to je zřejmě způsobeno obtížnějším splněním ukazatele *rE*, který proto více ovlivňuje hledání optimální skladby PpS, a tím, že oba ukazatele nejsou nezávislé. Jinak řečeno, když se podaří skladbě PpS splnit ukazatel *rE* a ukazatel *rP* je splněn s velkou rezervou, nedokážu

s levnější skladbou PpS zvýšit hodnotu ukazatele *rP*, aby se zároveň nezvýšila i hodnota ukazatele *rE*.

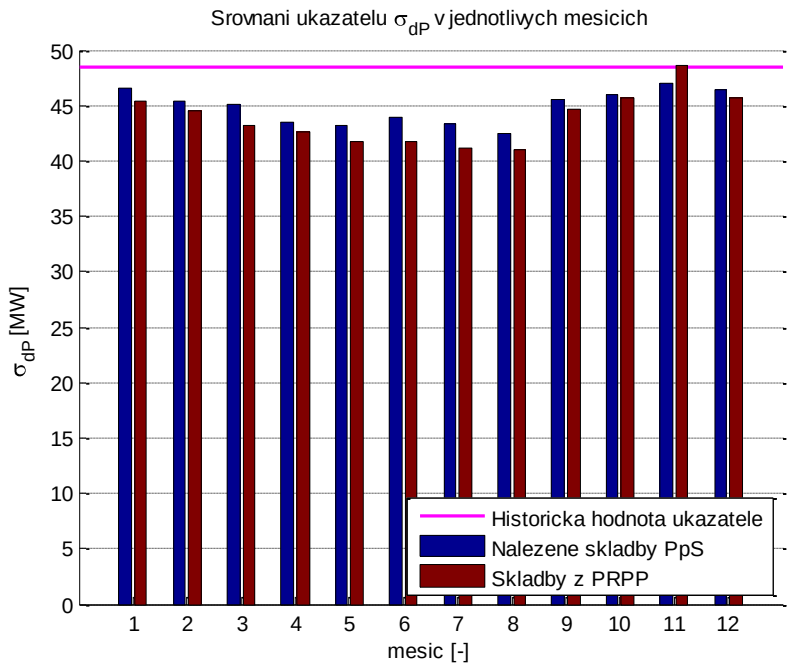
d) Relativně větší vzdálenost ukazatelů spolehlivosti navržených skladeb PpS od referenční hodnoty je způsobena požadavkem na pravděpodobnost, s jakou musí být ukazatelé menší než referenční aby skladba v iteračním algoritmu splnila referenční ukazatele (viz kap 2.1.1).



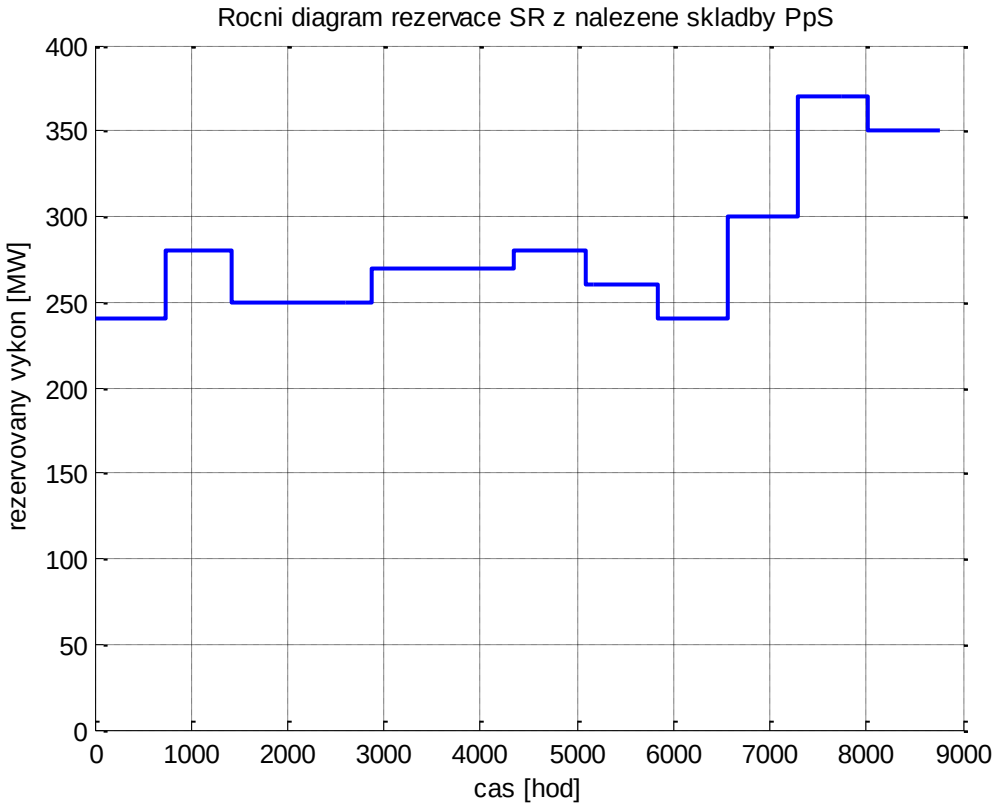
Obr. 8 – Srovnání ukazatele *rP* nalezené skladby se skladbou z PRPP



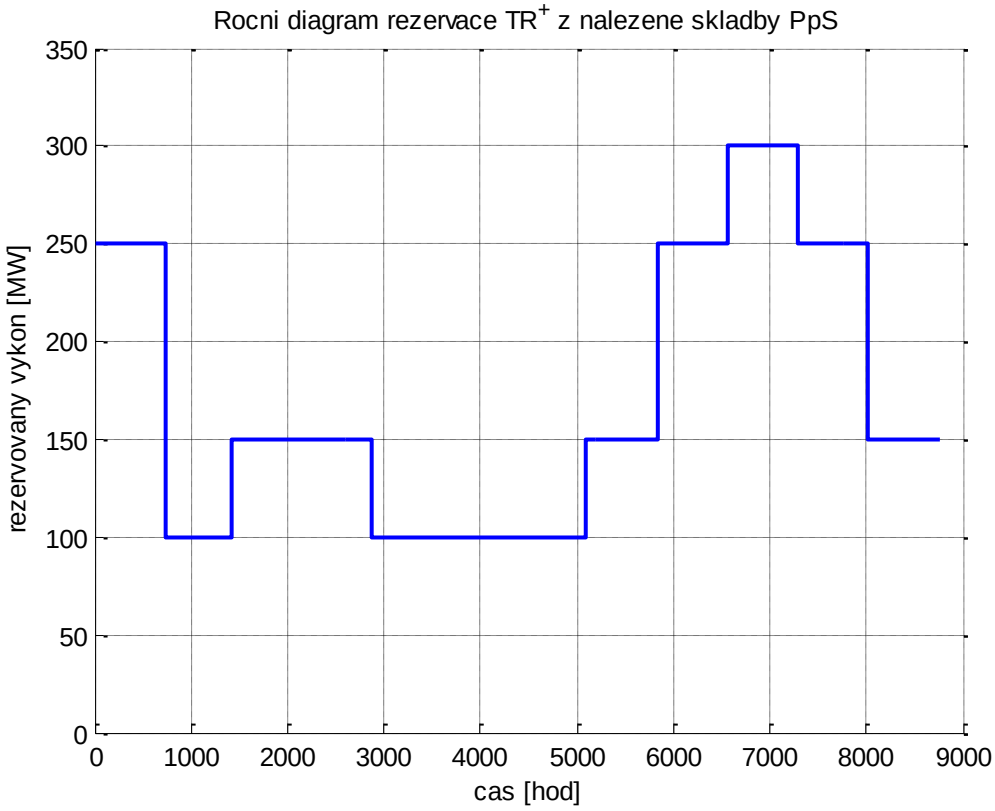
Obr. 9 – Srovnání ukazatele *rE* nalezené skladby PpS se skladbou z PRPP



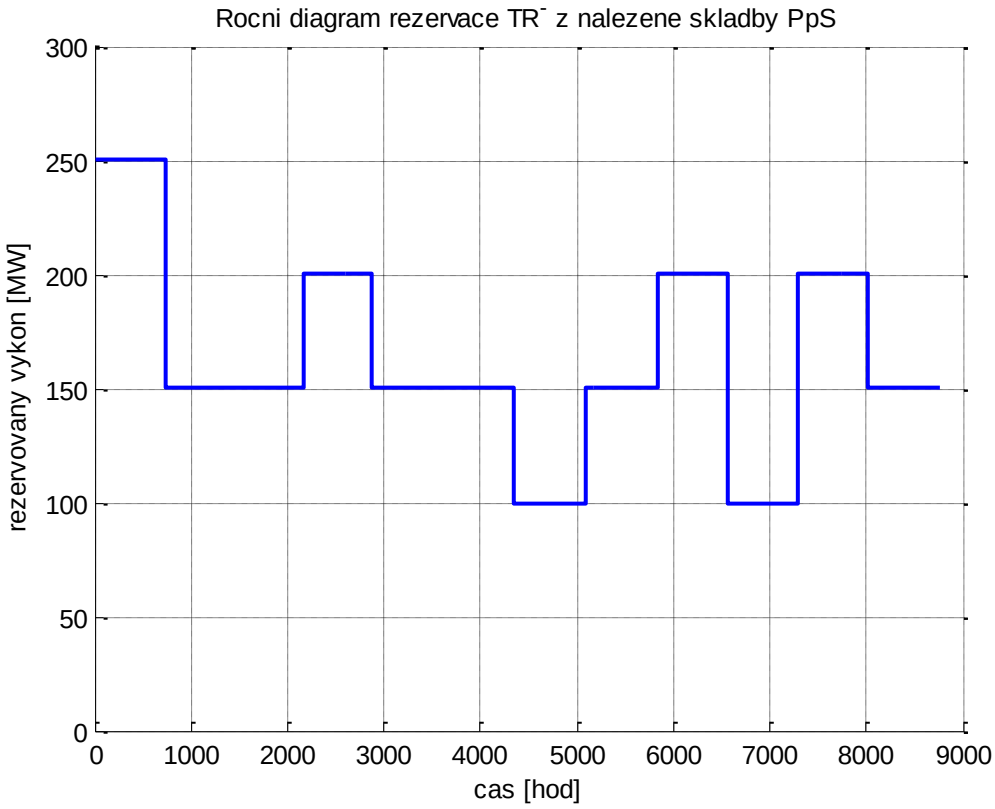
Obr. 10 – Srovnání ukazatele σ_{dP} nalezené skladby se skladbou z PRPP



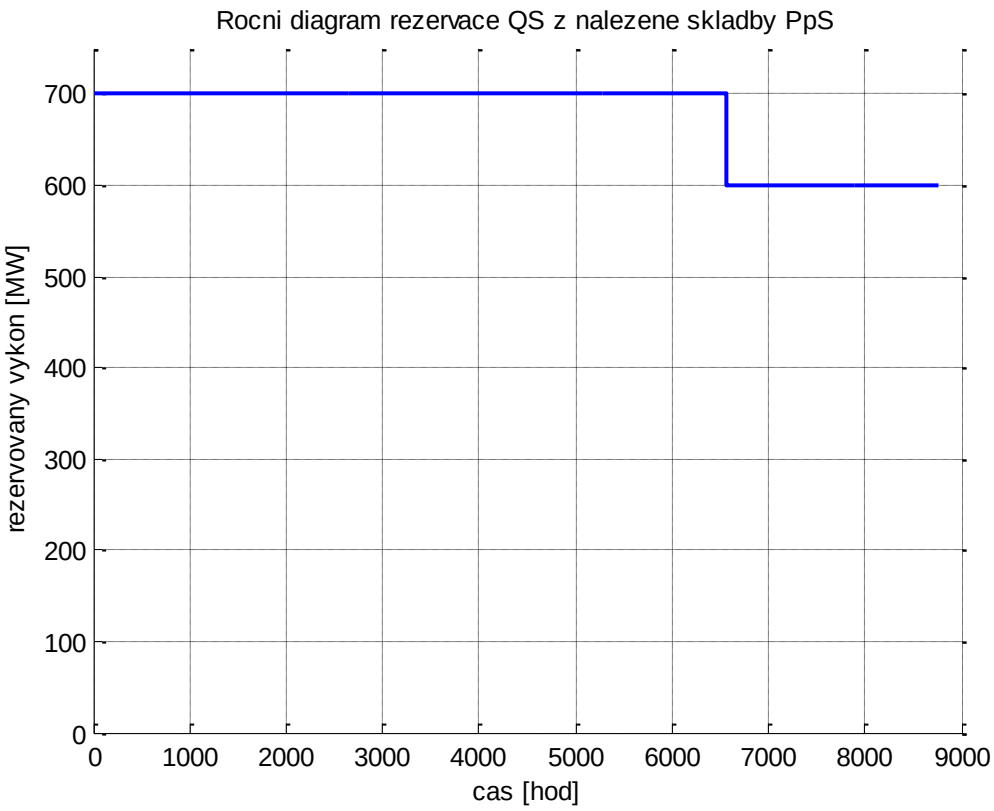
Obr. 11 – Roční diagram rezervace SR z nalezené skladby PpS iteračním algoritmem



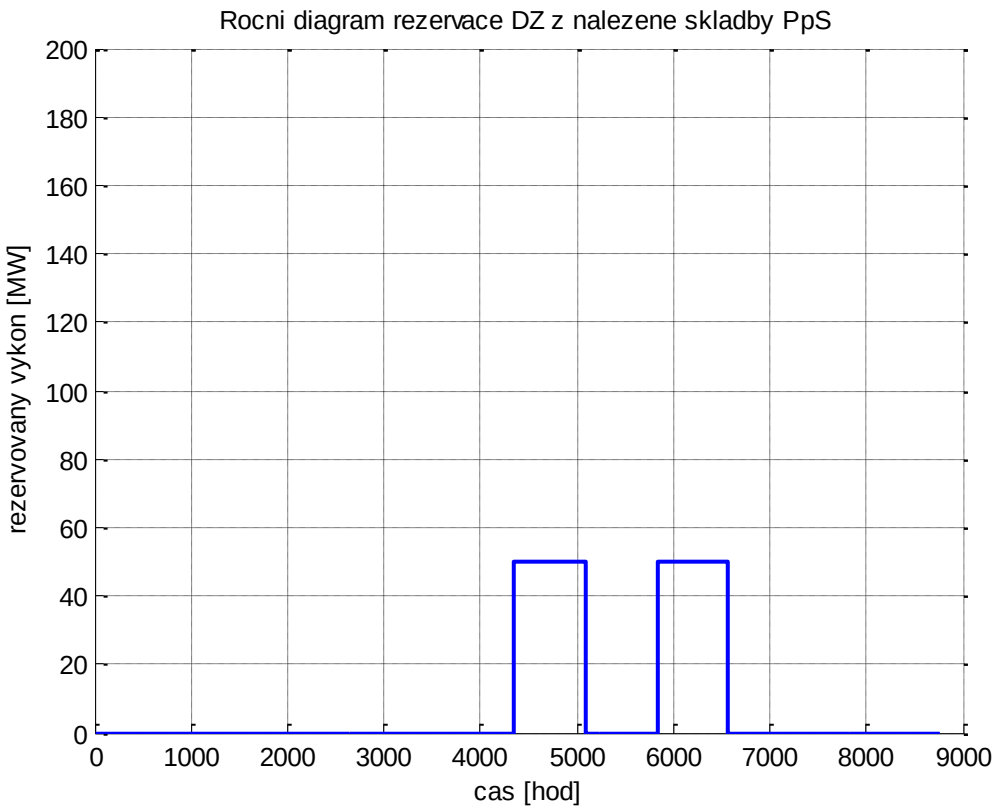
Obr. 12 – Roční diagram rezervace TR^+ z nalezené skladby PpS iteračním algoritmem



Obr. 13 – Roční diagram rezervace TR^- z nalezené skladby PpS iteračním algoritmem



Obr. 14 – Roční diagram rezervace QS z nalezené skladby PpS iteračním algoritmem



Obr. 15 – Roční diagram rezervace DZ z nalezené skladby PpS iteračním algoritmem

3 Podpora výběrových řízení na podpůrné služby

Nástroj pro podporu výběrových řízení má pomáhat vyhodnocovat výběrová řízení (VŘ), ve kterých společnost ČEPS nakupuje PpS. Vstupem jsou nabídky služeb jedné kategorie z aktuálního výběrového řízení, požadovaný nákup a již koupené množství služby z předchozích výběrových řízení. Požadovaný nákup je definován pásmem (horní a dolní hranicí), ve kterém chci, aby byl výsledný nákup zrealizován. Nástroj doporučí, které z podaných nabídek mají být akceptovány, aby byl výsledný nákup optimální z hlediska celkových nákladů na PpS s přihlédnutím k průměrné ceně za 1 MW služby.

3.1 Vstupy a výstupy nástroje

Hlavním vstupem jsou nabídky PpS v aktuálním výběrovém řízení a k nim příslušná poptávka vyjádřena formou pásma s maximální a minimální hranicí nákupu.

3.1.1 Nabídky PpS

Tento vstup se zadává ve formě excelovské tabulky. Příklad nabídek v použitém vstupním formátu je zobrazen v Tab. 18. Uvedené ceny jsou pro účely výpočtů odvozeny z průměrných cen uveřejněných na webu společnosti ČEPS, a. s. pro výběrové řízení na rok 2008.

Tab. 18 – Ukázka formátu vstupních dat

Číslo nabídky	Poskytovatel	Datum (dd.mm.yyyy)		Aktivní hodiny (hh - hh)	Aktivní ve dnech (P,N,A)	Nabízený výkon min [MW]	Nabízený výkon max [MW]	Krok výkonu [MW]	Nabídková cena [Kč/MW]	Kriteriální cena [Kč/MW]	Je dělitelný (1,0)	Koupeno [MW]
		od	do									
1	B	7.3.2009	13.3.2009	06-22	P	0	10	0	910	910	1	10
2	B	21.11.2009	27.11.2009	06-22	P	0	10	0	910	910	1	10
3	A	1.1.2009	2.1.2009	06-22	P	0	20	0	1300	1300	1	0
4	A	3.1.2009	9.1.2009	06-22	P	0	20	0	1300	1300	1	0
5	A	10.1.2009	16.1.2009	06-22	P	0	20	0	1300	1300	1	0
6	A	17.1.2009	23.1.2009	06-22	P	0	20	0	1300	1300	1	0
7	A	24.1.2009	30.1.2009	06-22	P	0	20	0	1300	1300	1	0
7	A	31.1.2009	6.2.2009	06-22	P	0	20	0	800	800	1	0
7	A	7.2.2009	13.2.2009	06-22	P	0	35	0	810	810	1	0
8	A	14.2.2009	20.2.2009	06-22	P	0	25	0	1900	1900	1	0
8	A	21.2.2009	27.2.2009	06-22	P	0	35	0	1900	1900	1	0

Význam jednotlivých sloupců tabulky vstupních dat je v Tab. 17. Pokud je nabídka dělitelná, je možné koupit její libovolné spojité množství, jinak je nutno nabídku koupit celou nebo vůbec. Poslední možnost omezení nákupu je nastavení kroku výkonu, v tomto případě je možné službu nakupovat pouze po definovaných výkonových krocích.

Do tabulky lze navíc zadat speciální nabídky. Ty se odlišují od standardních tím, že několik nabídek má stejné číslo nabídky. Při výpočtu se toto nastavení interpretuje tak, že nabídky se stejným číslem musí být akceptovány buď všechny nebo žádná.

Tab. 19 – Vstupní informace o nabídce

číslo nabídky	Identifikátor nabídky
Poskytovatel	Identifikace poskytovatele PpS, který učinil nabídku. Tato informace se dále v algoritmu nepoužívá.
Datum (od - do)	Období, ve kterém je nabídka aktivní
Aktivní hodiny (od – do)	Hodiny dne, ve kterých je nabídka aktivní
Aktivní ve dnech	Dny v aktivním období, kdy je nabídka aktivní (P – pracovní dny, N - nepracovní dny, V – všechny dny)
Nabízený výkon min	Minimální velikost nabídky v MW (kolik minimálně musím koupit, když se rozhodnu nabídku akceptovat)
Nabízený výkon max	Velikost nabídky v MW
Krok výkonu	Po jakých krocích je možné službu nakupovat (0 = spojitě)
Nabídková cena	Cena nabídky
Kriteriální cena	Cena upravená podle vlastností nabídky (např. zohlednění různých rychlostí aktivace nabízené služby)
Je dělitelný	Informace, zda je nabídka dělitelná (1 – ano, 0 - ne)
Koupeno	Koupené množství nabídky

3.1.2 Poptávané a dříve koupené množství služby

Poptávané množství se zadává formou dvou hodinových vektorů, které reprezentují maximální a minimální hranici požadovaného nákupu. Dříve koupené množství dané služby je ve formě jednoho hodinového vektoru.

3.1.3 Výstup

Výstupem nástroje je koupené množství služby z jednotlivých nabídek. Tento nákup je zaznamenán do sloupce koupeno ve stejné tabulce, ze které se načítají vstupy (Tab. 1).

3.2 Formulace optimalizační úlohy

Nejprve je nutné definovat, co se rozumí pod pojmem optimální nákup PpS ve VŘ. Jako dva základní pohledy na kritérium optimality lze zvolit

- minimalizace nákladů na nákup PpS,
- minimalizaci průměrné ceny akceptovaných nabídek PpS.

Pokud jako cíl zvolíme minimalizaci průměrné ceny nákupu, kde je zadán minimální požadovaný nákup, vede tato úloha na nelineární optimalizaci, pro kterou neexistuje exaktní postup řešení nebo je časově neúnosný. Proto bylo navrženo několik

algoritmů, které se pokusily úlohu s určitými zjednodušeními vyřešit i za cenu suboptimality.

Jelikož na počátku nebylo požadováno striktní omezení nákupu maximálním a minimálním množstvím, proběhlo testování algoritmů, které využívají lineární programování (spojitý nákup nabídek) a následné zaokrouhlení nedělitelných nabídek (kapitola 3.4.1). Protože tyto výsledky nebyly uspokojivé, byl do požadavků na řešení přidán interval, ve kterém má být výsledný nákup zrealizován. Pro řešení této složitější úlohy byly provedeny testy s využitím genetického algoritmu (kapitola 3.4.2), byl vyvinut iterační algoritmus (kapitola 3.4.3) a také způsob používající lineární programování s celočíselnými proměnnými (MILP) (kapitola 3.4.4).

Při výpočtech optimálního nákupu pomocí lineárního programování (LP) a lineárního programování s celočíselnými proměnnými (MILP) je kritériem optimality minimalizace celkových nákladů nákupu. Tuto úlohu můžeme vyjádřit rovnicí

$$\begin{aligned} &\min_{Q}(\textit{náklady na nakoupené nabídky} + \textit{penalizace odchylky}) = \\ &= \min_{Q}\left(\sum_{i=1}^{n} C_{NSi} K_{NS} Q_{NSi} + \sum_{h=1}^{l} C_{ODh}\left(\sum_{i=1}^{n} Q_{NSi} P_{NSi}(h) - d(h)\right)\right) \end{aligned} \tag{3-1}$$

kde

n	počet nabídek podpůrné služby,
i	index nabídky,
l	počet hodin v časovém intervalu, na který nakupuji,
C_{NSi}	cena nabídky i [Kč/MW],
K_{NS}	počet hodin, kdy je nabídka aktivní,
Q_{NSij}	koupené množství nabídky i,
C_{ODh}	cena odchylky v hodině h (závislá na polaritě) [Kč/MW],
$P_{NSij}(h)$	jednotková hodnota nabídky i v hodině h (0 nebo 1),
$d(h)$	poptávané množství služby,
Q_{NSi}	množství koupené nabídky.

Penalizace odchylky představuje pokutu za nedodržení požadovaného nákupu. V algoritmu se penalizuje jak záporná odchylka (menší nákup než požadovaný) tak i kladná odchylka. Jelikož požadovaný nákup služby není formulován jako ostrá optimalizační podmínka, byl by optimální nákup bez penalizace záporné odchylky nulový. Penalizace kladné odchylky zase zabraňuje velkému překoupení požadovaného množství, které by mohlo způsobit velký rozptyl nakoupeného množství v průběhu roku, což se po konzultacích se zadavatelem ukázalo jako nežádoucí.

3.3 Použitá data pro testování algoritmů

Pro účely testování navrhovaných algoritmu byl proveden testovací nákup terciární regulace. K dispozici bylo 211 nabídek, z toho 172 týdenních, 36 kvartálních a 3 roční. Všechny nabídky byly aktivní ve všech dnech a hodinách období, ve kterém byly

nabízeny. Z tohoto důvodu bylo možné testovací nákupy počítat s vyšší časovou granularitou než hodina. Granularita byla vybrána jeden týden, tím se optimalizační problém velmi zmenšil a bylo možné provádět testování algoritmů v kratším čase. Při testování se předpokládalo, že všechny nabídky jsou nedělitelné. Testovací nákupy byly provedeny na konstantní poptávku po celý rok z důvodu lepší analýzy získaných výsledků. Obecně je však možné navrhované způsoby řešení použít k nákupu poptávaného množství s libovolným tvarem přes rok a libovolnou časovou granularitou.

3.4 Metody řešení optimalizačního problému

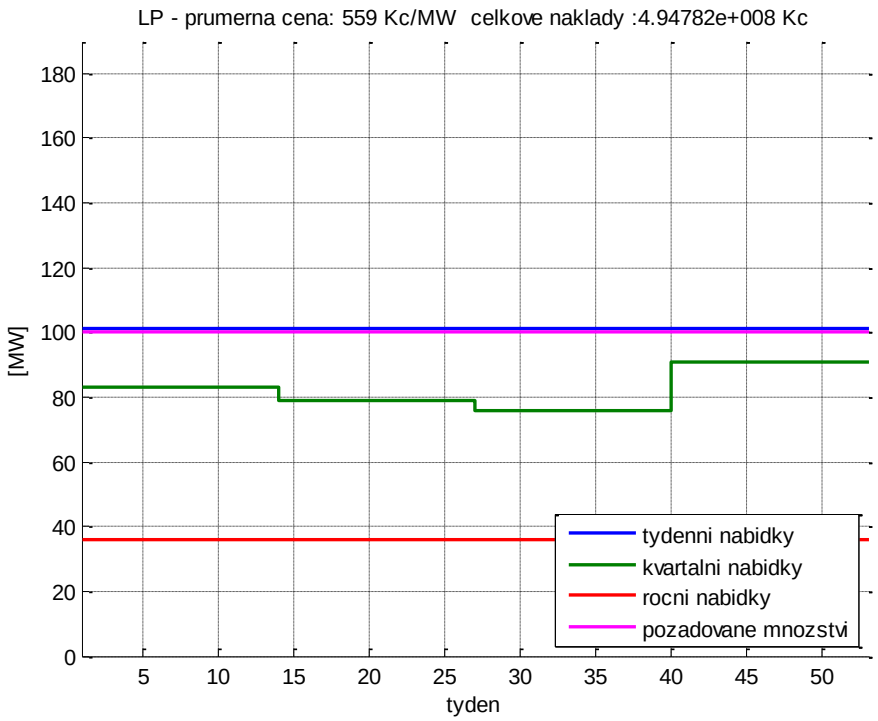
Během vývoje řešení problému optimálního nákupu PpS na výběrovém řízení bylo vyzkoušeno několik přístupů jak zadaný problém řešit. Výsledky byly prezentovány zadavateli a v závislosti na jeho připomínkách byly buď stávající metody modifikovány, nebo byly vyvinuty nové.

3.4.1 Lineární programování a varianty se zaokrouhlováním

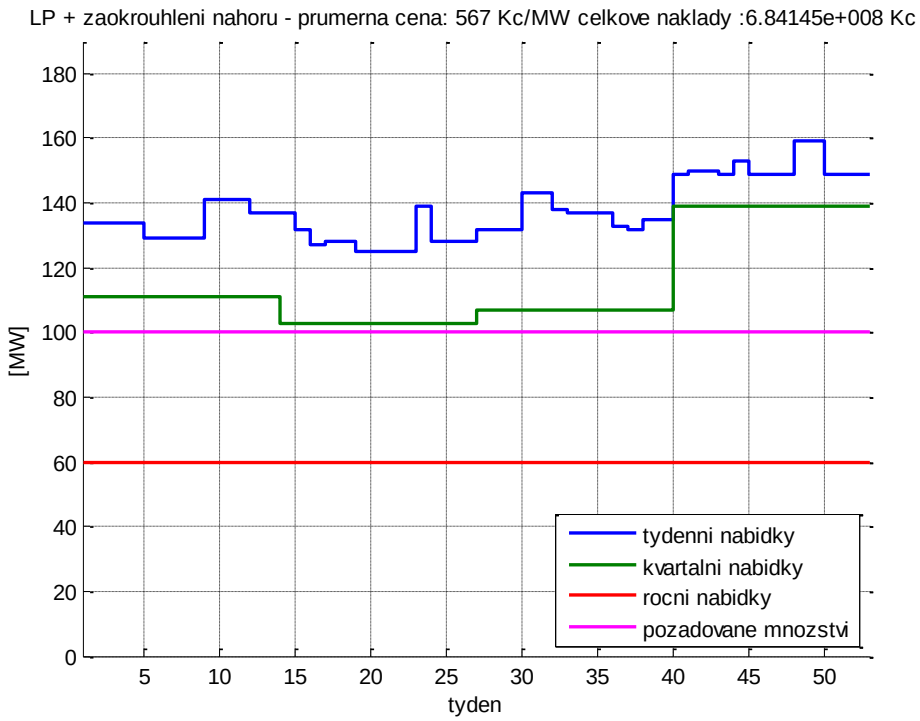
V první fázi byla vyzkoušena možnost řešit úlohu pomocí lineárního programování s následným zaokrouhlením částečně koupených nabídek, které jsou nedělitelné. Na Obr. 16 je znázorněn nákup vypočítaný metodou lineárního programování (LP) s použitím kritéria optimality *(3-1)*. Nákup z Obr. 16 je optimální z hlediska minimalizace nákladů i průměrné ceny za MW, ale nesplňuje podmínku nedělitelnosti nabídek (jedná se o teoretický, „ideální“ nákup). Pro splnění této podmínky byl nákup získaný LP zaokrouhlen. Na Obr. 17 je zobrazen nákup, kde všechny nabídky, které byly aspoň z části koupeny, byly následně koupeny plně (zaokrouhlení nahoru). Naproti tomu u nákupu na Obr. 18 byly plně koupeny jenom ty nabídky, kterých se při LP koupila alespoň polovina jejich nabídky, ostatní nebyly koupeny vůbec (matematické zaokrouhlení).

Z příkladů na Obr. 17 a Obr. 18 byly identifikovány hlavní problémy výpočtu nákupu pomocí zaokrouhlování. V prvním případě došlo k velkému překupu a zhoršení průměrné ceny za 1 MW, jelikož před zaokrouhlením bylo koupeno 5 MW drahé roční nabídky (585 Kč/MW) a zaokrouhlením bylo koupeno 30 MW, což značně zhoršilo průměrnou cenu a způsobilo velkou část překupu.

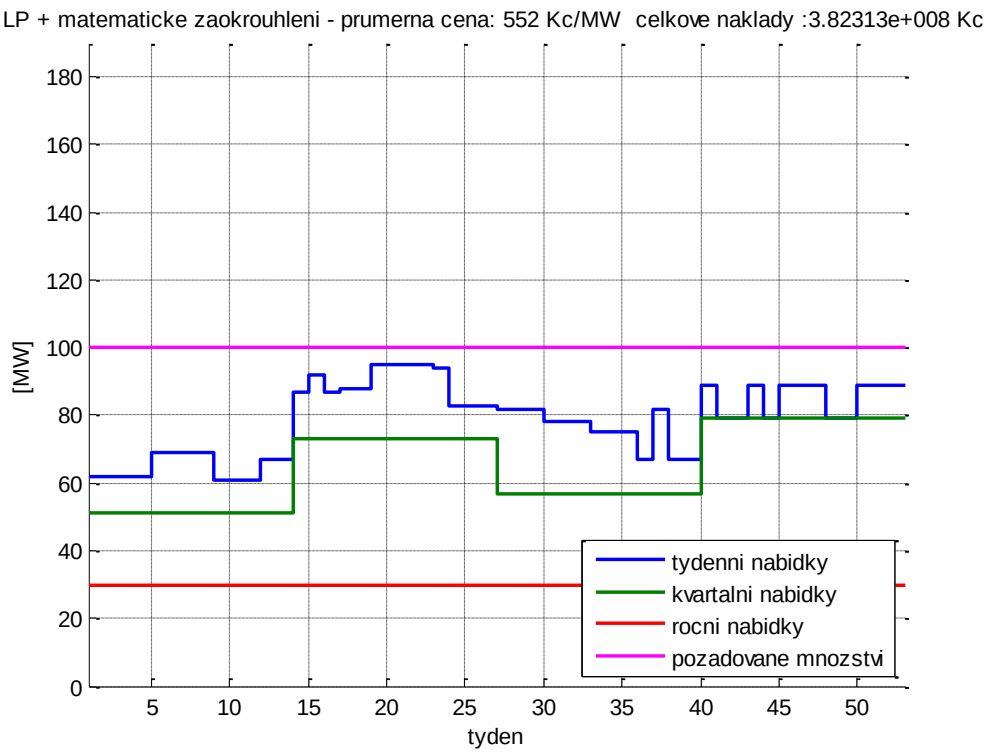
Z důvodů analýzy byla také otestována situace, kdy byla zmíněná roční nabídka ze vstupů smazána. V tomto případě byla roční nabídka ve výsledném nákupu nahrazena kombinací kvartálních nabídek. Výsledné náklady a průměrná cena byly před zaokrouhlením vyšší než u nákupu s aktivní roční nabídkou. Přes tuto skutečnost byl nákup po zaokrouhlení levnější s nižší průměrnou cenou za MW. Tato situace nastala, protože kvartální nabídky byly částečně koupené již v lineárním nákupu s aktivní roční nabídkou a jejím odebráním došlo v nákupu k navýšení podílu kvartálních nabídek. Takto vzniklý rozdíl v nákupu kvartálních nabídek se odstranil zaokrouhlením nahoru. Takto vznikla situace, při které se výsledné nákupy lišily pouze nákupem drahého ročního produktu. Jelikož tato nebo podobná situace může velmi snadno nastat a velmi tím zhoršit výsledky, byla tato metoda zavrhnuta.



Obr. 16 – Nákup provedený lineárním programováním (všechny nabídky dělitelné)



Obr. 17 – Nákup provedený zaokrouhlením lineárního nákupu nahoru



Obr. 18 – Nákup provedený matematickým zaokrouhlením lineárního nákupu

Řešení, kde bylo použito LP a následné matematické zaokrouhlení nedělitelných produktů je z řešení používající LP s následním zaokrouhlením nejlepší z hlediska průměrné ceny za MW. Bohužel je nákup značně nižší, než byla požadovaná hodnota. Hlavním problém tedy zůstává rozptyl nakoupeného množství mezi jednotlivými hodinami a to, že nedokážeme případný nákup dále zpřesňovat, což by bylo žádoucí v případech, kdy obchodník v pozdějších kolech výběrových řízení zná poptávku přesně. Metody zmíněné v této podkapitole se tedy ukázaly jako nedostatečné a do požadavků na řešení byla přidána možnost zadávat požadovaný nákup formou pásma s maximální a minimální hranicí nákupu.

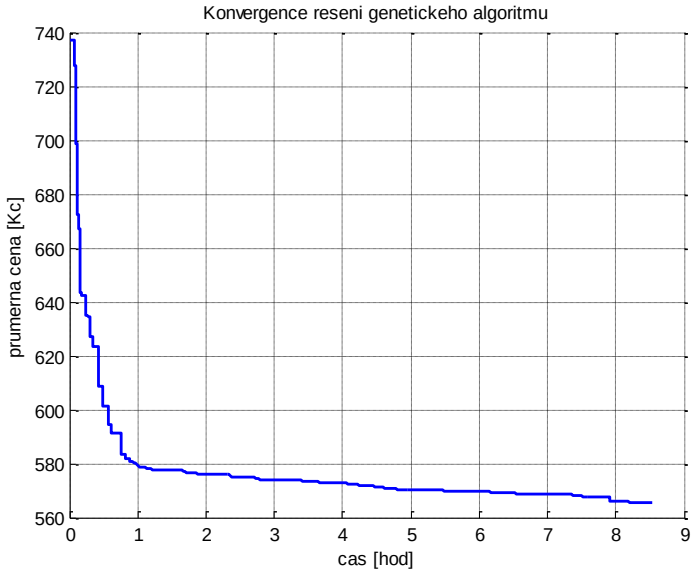
3.4.2 Genetické programování

Pro úlohu minimalizace průměrné ceny nákupu v zadaných mezích neexistuje exaktní postup řešení, které by nevyžadovalo procházení celého stavového prostoru možných řešení, a proto byla otestována možnost řešit tuto úlohu pomocí genetických algoritmů.

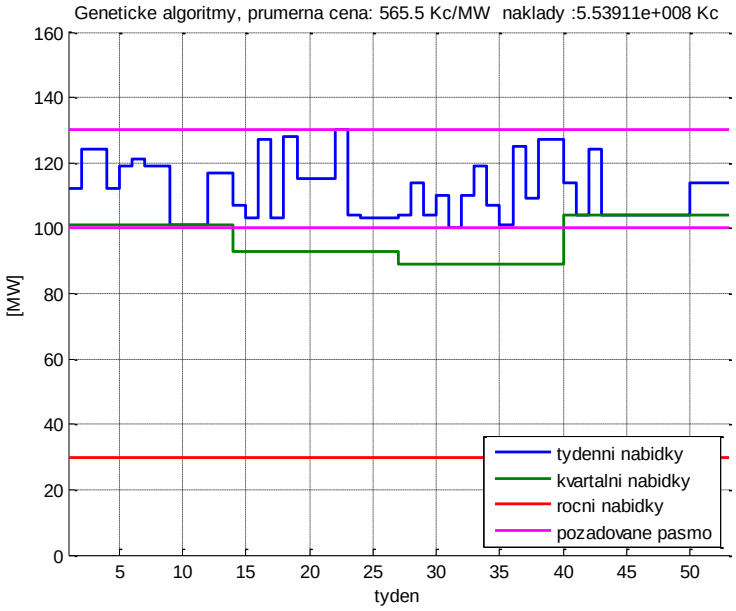
Jedinec v populaci je reprezentován binárním vektorem, kde každý prvek představuje právě jednu nedělitelnou nabídku. Jestliže je hodnota prvku reprezentující určitou nabídku rovna jedné, je tato nabídka akceptována. V algoritmu bylo použito vícebodové křížení a mutace. Hlavními parametry genetického algoritmu jsou rozsah křížení a rozsah mutace. Hodnoty těchto parametrů lze nastavit od nuly do jedničky a představují poměrnou velikost aktuální populace, na kterou je aplikované křížení nebo mutace. Dalším parametrem je velikost mutace, kterou lze také nastavit od nuly do jedničky a která ovlivňuje maximální počet zmutovaných chromozomů při jedné mutaci (u kolika nabídek lze změnit stav z nepřijmout na přijmout nebo opačně). Selekce jedinců byla provedena pomocí metody ruletového kola. Fitness funkce, které oceňuje

jedince v populaci, počítá průměrnou cenu a při výpočtu silně penalizuje překročení zadaných mezí nákupu.

Na Obr. 20 je zobrazen nákup vypočítaný genetickým algoritmem pro požadovanou hranici nákupu 100 až 130 MW. Hlavní problém této metody je velmi špatná konvergence řešení a tím daná velká časová náročnost pohybující se v řádu hodin bez garance nalezení optimálního řešení. Příklad konvergence genetického algoritmu je na Obr. 4. Jelikož tento nástroj má sloužit jako konzultační prostředek pro zkoušení různých variant nákupu, měl by být výpočetní čas minimální. Zejména z tohoto důvodu bylo použití genetických algoritmů zavrhnuto.



Obr. 19 – Ukázka konvergence řešení genetickým algoritmem



Obr. 20 – Nákup genetickým algoritmem (pro pásmo 100 – 130 MW)

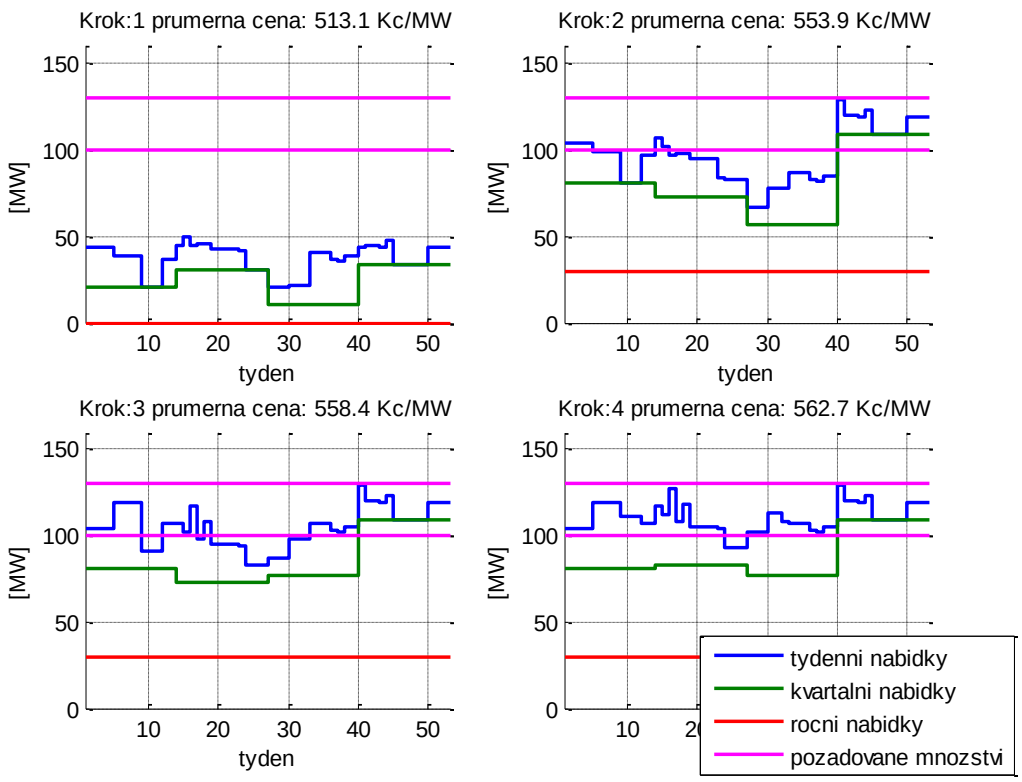
3.4.3 Iterační metoda s použitím LP

Po testech s genetickými algoritmy byl vyvinut iterační algoritmus, který nalezne doporučený nákup v několika optimalizačních krocích, při kterých se počítá minimalizace nákladů podle rovnice *(3-1)*. V každém kroku se provedou následující operace.

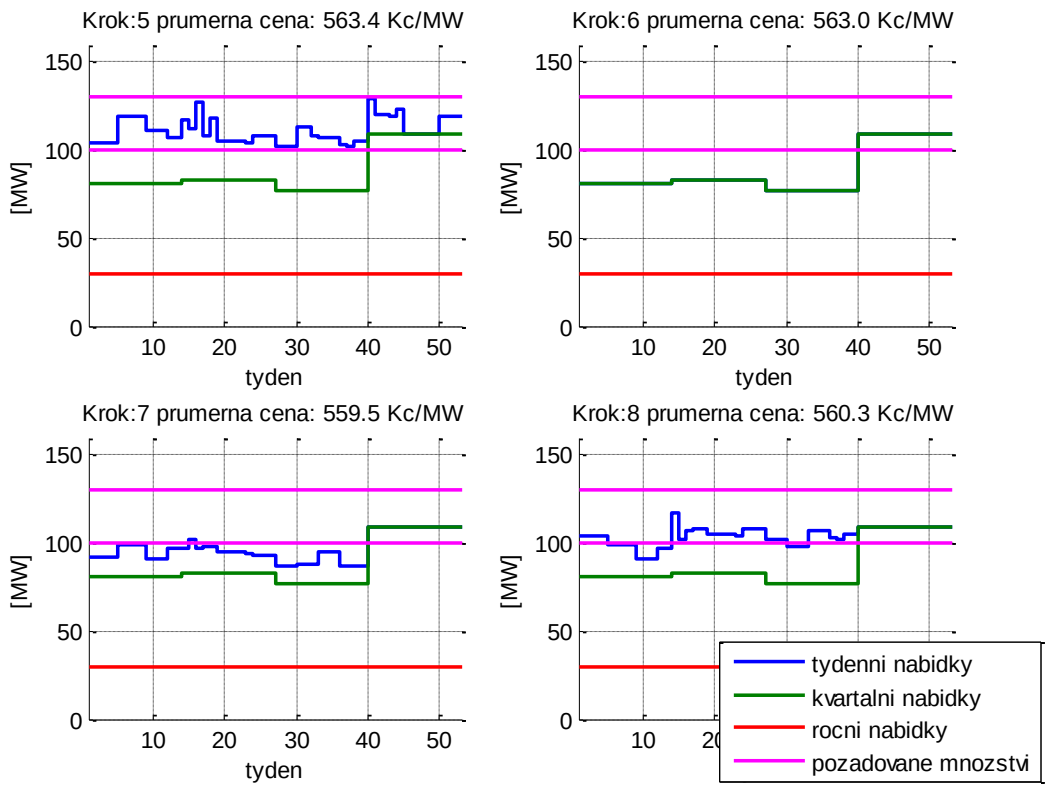
1. Z nabídek se vyřadí všechny produkty, které nejsou dělitelné a jejichž nabídka je v nějaké hodině větší než maximální hranice nákupu v této hodině.
2. Proběhne lineární optimalizace nákupu podle kriteria *(3-1)*, kde požadovaný nákup je minimální hranice zadaného pásma.
3. Pro každý aspoň částečně koupený produkt se spočítá průměrná cena nákupu v období, kdy se produkt vyskytuje. Například pro měsíční produkt se spočítá průměrná cena nákupu z akceptovaných měsíčních nabídek aktivních ve stejný měsíc a všech dalších kratších nabídek, které jsou aktivní ve stejném období.
4. Ze všech aspoň částečně nakoupených nabídek vybereme pouze ty, jejichž cena za 1 MW je menší nebo rovna průměrné ceně spočtené v předchozím kroku.
5. Takto vybrané nabídky se seřadí podle ceny za MW od nejlevnější po nejdražší a postupně se plně kupují (v případě, že koupení nabídky způsobí překročení maximálního nákupu, je tato nabídka vynechána).
6. Od požadovaného množství se odečte koupené množství v aktuální iteraci. Algoritmus pokračuje od bodu 1. se zbytkovým digramem (nepokrytou poptávkou) namísto původně poptávaného množství.

Jestliže je nákup v aktuální iteraci nulový, což znamená, že již není potřeba nakoupit další nabídky a algoritmus by skončil, provede se vyhlazení nákupu. Toto vyhlazení se provádí z důvodu vymazání koupených týdenních produktů, které byly koupeny kvůli výhodné ceně, ale zaokrouhlením se staly nadbytečnými a tedy nákup je i bez nich větší než minimální požadované množství. Při vyhlazení se odstraní všechny koupené týdenní nabídky a algoritmus se spustí opět z bodu 1. Vyhlazení se provede pouze jednou, pokud tedy nastane opět situace, kdy je nákup v aktuální iteraci nulový, algoritmu se ukončí.

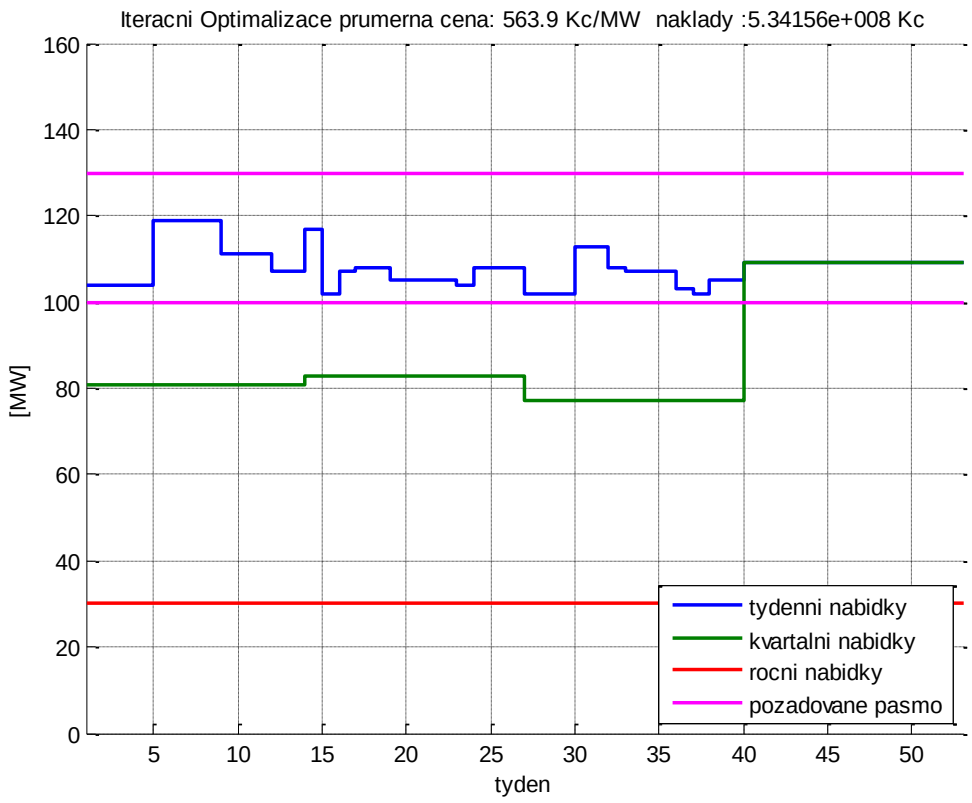
Na Obr. 22 je vidět, jak iterační algoritmus postupoval při požadavku, aby byl výsledný nákup mezi 100 až 130 MW. Poslední (výsledný) krok algoritmu je na Obr. 23. Z důvodu srovnání s dalším algoritmem bylo vypočítáno několik scénářů nákupu se stejnými nabídkami, ale s různým rozmezím požadovaného nákupu (70 – 100 MW, 90 – 100 MW a již zmíněných 100 – 130 MW). Výsledky těchto scénářů jsou na Obr. 23 až Obr. 25.



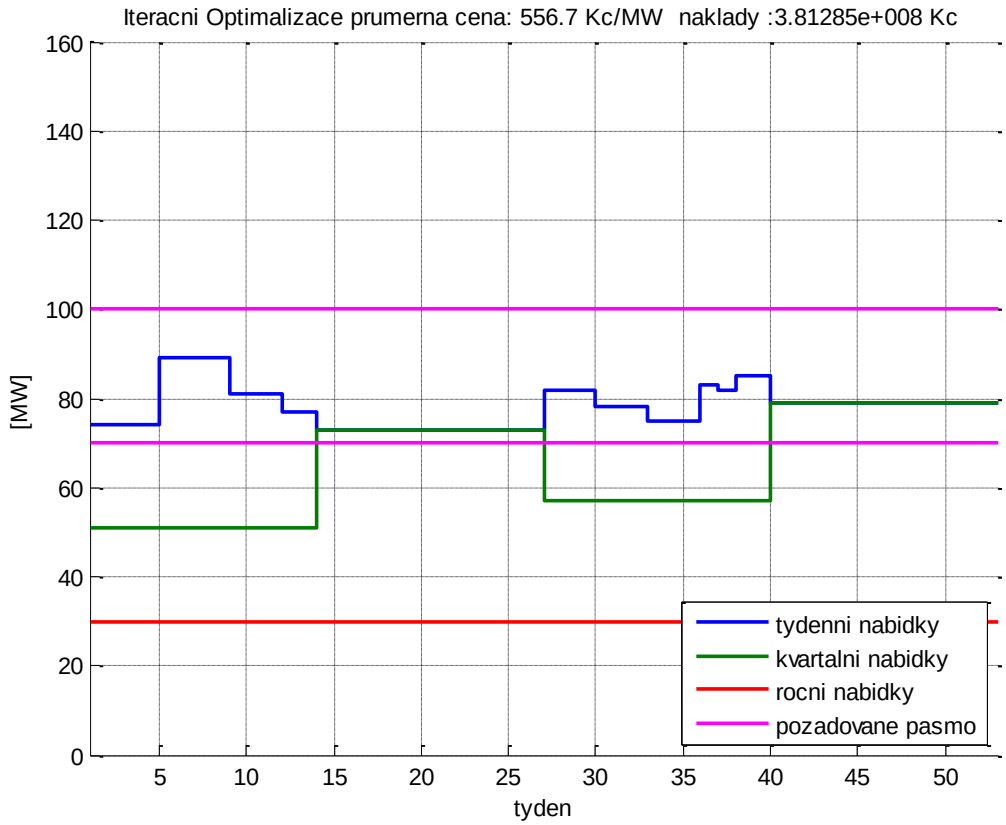
Obr. 21 - Výpočet iteračního algoritmu pro nákup pro pásmo 100MW – 130MW (kroky 1-4)



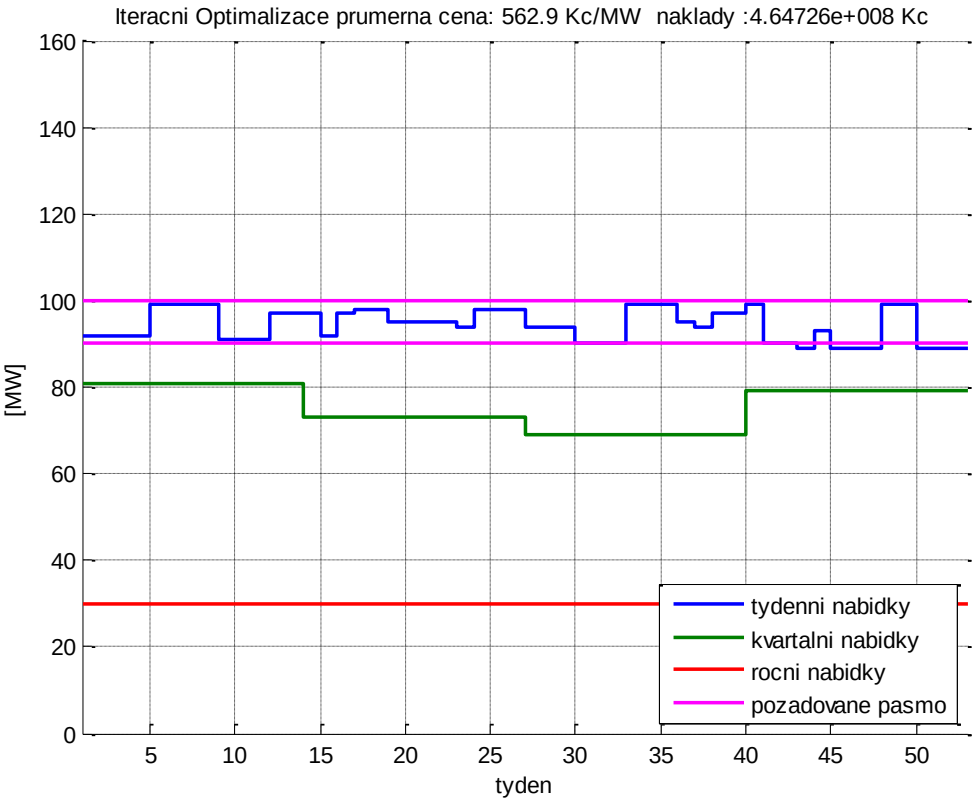
Obr. 22 – Výpočet iteračního algoritmu pro nákup pro pásmo 100MW – 130MW (kroky 5-8)



Obr. 23 – Nákup iterační algoritmus (100MW - 130MW)



Obr. 24 – Nákup iterační algoritmus (70MW - 100MW)



Obr. 25 – Nákup iterační algoritmus (90MW - 100MW)

Z Obr. 23 až Obr. 25 je vidět, že algoritmus našel až na poslední případ akceptovatelné řešení. Důvod, proč v posledním případě nebylo nalezeno řešení splňující pásmo požadovaného nákupu, i když takovéto řešení existuje (viz. Obr. 27), je dán iterační podstatou algoritmu a faktem, že už jednou koupené roční a kvartální nabídky nelze v pozdějších iteracích přeorganizovat. Tato skutečnost je daň, kterou zde platíme za velkou rychlost výpočtu a za to, že algoritmus využívá pouze lineární programování. Když srovnáme řešení spočítané genetickým algoritmem z Obr. 20 a iteračním algoritmem na Obr. 23, tak zjistíme, že nákup vypočítaný iteračním algoritmem má nižší průměrnou cenu za MW služby a byl spočítaný za 5 s, zatímco genetický algoritmus řešení počítal 8,5 hodiny.

3.4.4 Algoritmus používající MILP

Řešení pomocí lineárního programování s celočíselnými proměnnými (MILP) bylo navrženo z důvodu větší robustnosti řešení. Algoritmus najde vždy řešení v požadovaných mezích nákupu, jestliže takové řešení existuje. Mezi hlavní nevýhody patří vyšší cena solveru potřebného k řešení MILP, aby byla úloha řešitelná v akceptovatelném čase. Dalším problémem je samotný výsledek, který je optimální z hlediska minimalizace nákladů, ale již ne nutně co se týče průměrné ceny. Aby bylo nalezeno optimální řešení v daných mezích nákupu s vlivem průměrné ceny za MW služby, byl navržen tento postup:

Optimální nákup je nalezen v několika optimalizačních krocích. V každém kroku se vypočítá nákup minimalizující náklady podle kriteria (3-1), kde požadované množství je dáno maximální hranicí nákupu. Minimální hranice nákupu je v optimalizaci nastavena jako dolní ostrá omezující podmínka, která tedy musí být splněna. Výpočet optimálního

nákupu v jednotlivých krocích se liší cenou za nedokup, která se variuje s nastaveným krokem. V testovacím nákupu algoritmus měnil cenu nedokupu s krokem 50 Kč/MW z hodnoty 100 Kč/MW na 800 Kč/MW. Z takto vypočtených nákupů je vybrán nákup s nejnižší průměrnou cenou.

Na Obr. 27 až Obr. 29 je zobrazen nákup služby vypočítaný algoritmem, který pro výpočet používá lineární programování s celočíselnými proměnnými (MILP) pro požadovaný nákup 100 až 130 MW, 70 až 130 MW a 90 až 100 MW. Z těchto obrázků je vidět, že výsledný nákup pokaždé splnil požadavky a navíc s lepší průměrnou cenou za 1 MW služby než v případě iteračního algoritmu. Toto řešení navíc garantuje, že výsledný nákup je proveden za minimální náklady a oproti iteračnímu algoritmu je možné zaručit nalezení řešení splňující zadaný rozsah nákupu, jestliže takové řešení existuje. Nevýhodou je výpočetní čas, který není možné předem přesně odhadnout.

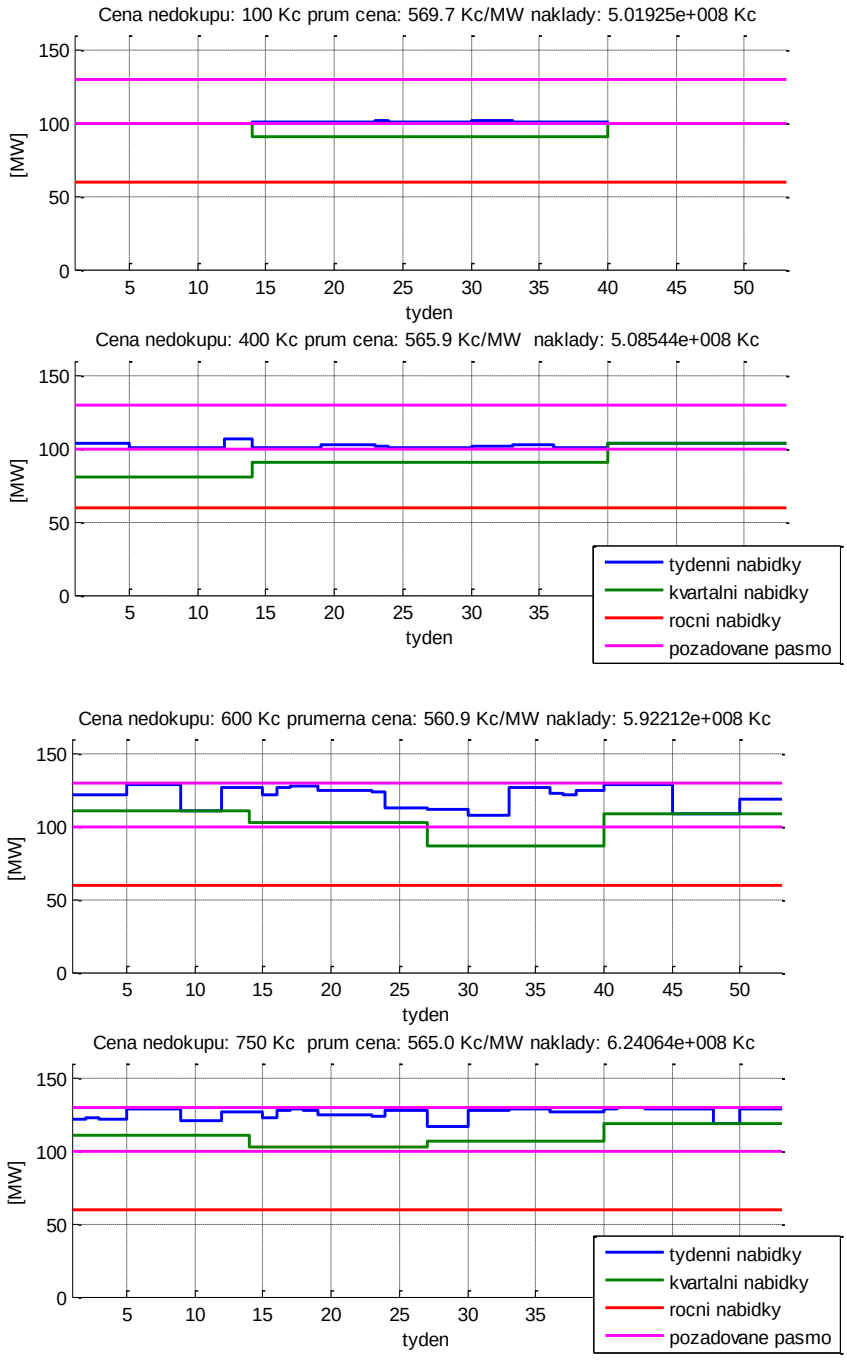
Jednou z možností je nastavit maximální dobu, po kterou bude algoritmus hledat optimální řešení. V tomto případě, ale není garantovaná maximální požadovaná vzdálenost od optimálního řešení, tzv. optimality gap. V Tab. 20 je srovnání rychlosti solverů CPLEX a SCIP používaných pro řešení optimalizačního problému s nedělitelnými nabídkami. CPLEX je drahý komerční nástroj, zatímco SCIP je kvalitní akademický produkt, který je možné pořídit za několikanásobně nižší cenu. Pro účely testování bylo ze vstupních nabídek vygenerováno 11 000 podobných nabídek. Z těchto vygenerovaných nabídek byly vytvořeny scénáře s různým počtem vstupních nabídek a byl spočítán optimální nákup.

Tab. 20 - Srovnání rychlosti výpočtu různých solverů pro řešení algoritmu s MIP

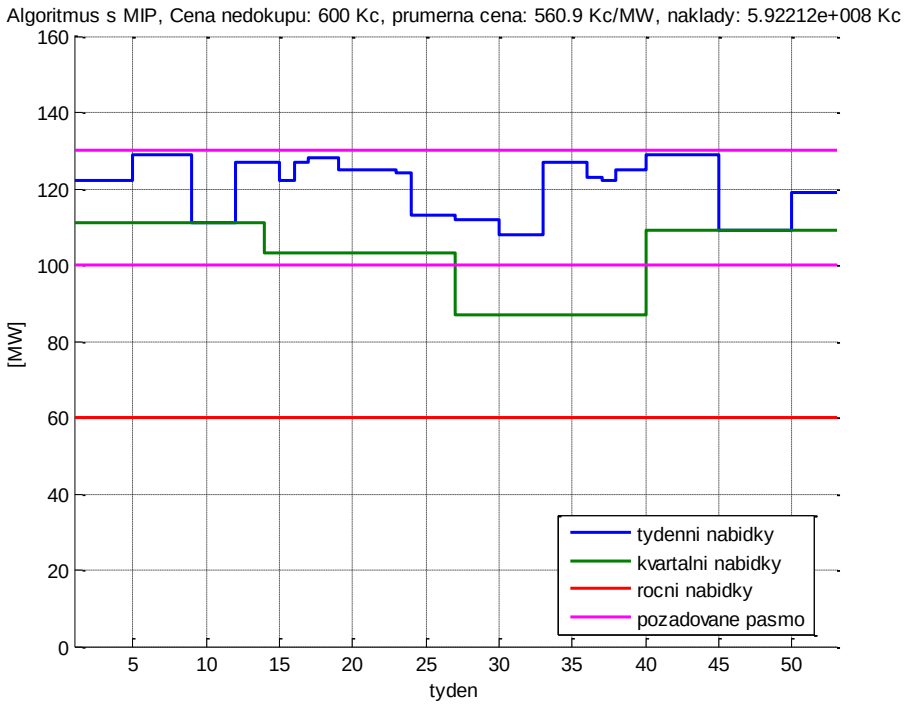
	Výpočetní čas [s]			
	Optimality gap 1%		Optimality gap 0,5%	
Počet nabídek	SCIP	CPLEX	SCIP	CPLEX
210	61	20	70	21
420	924	39	1884	40
700	1256	78	2145	450
2100	558	26	1733	30
3500	886	51	2194	64
4900	1068	46	2306	65
6300	1573	61	2460	128
7700	2104	111	2555	525
9100	1544	75	2686	110
10500	2088	109	2736	325

Z Tab. 2 je jasně vidět, že solver CPLEX dokáže optimalizační úlohu vyřešit rychleji než SCIP v některých případech téměř 20 krát. Výběr solveru navíc podtrhuje test na datech s granularitou hodina, kde CPLEX vypočítal všech 15 nákupů s různou

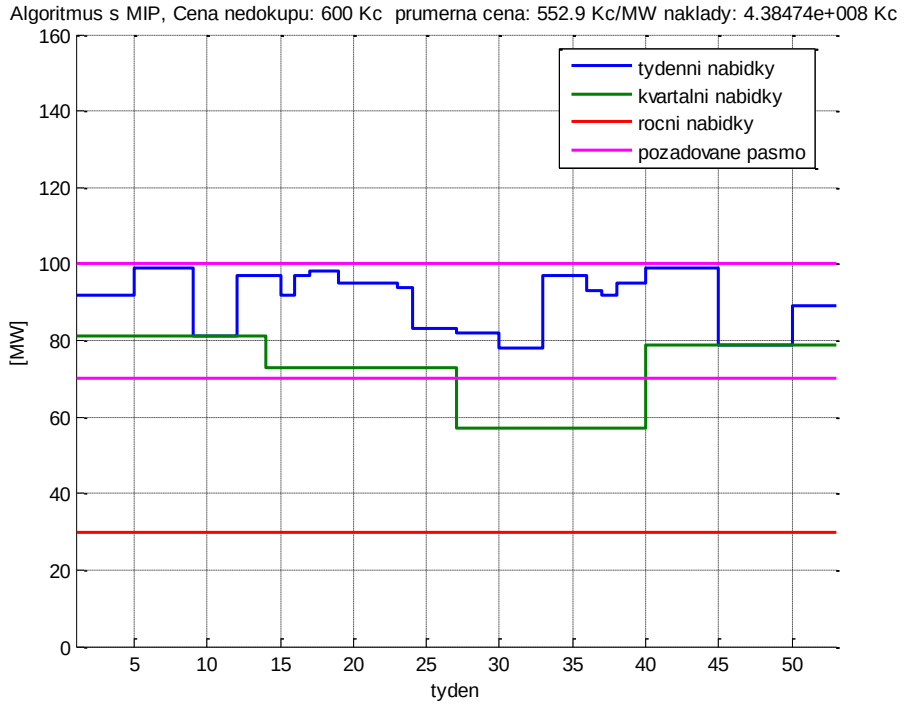
cenou nedokupu za 900 sekund s maximální relativní vzdáleností od optima 1%, zatímco SCIP nedokázal ani za 7200 sekund nalézt přípustné řešení ani pro jedno nastavení ceny nedokupu.



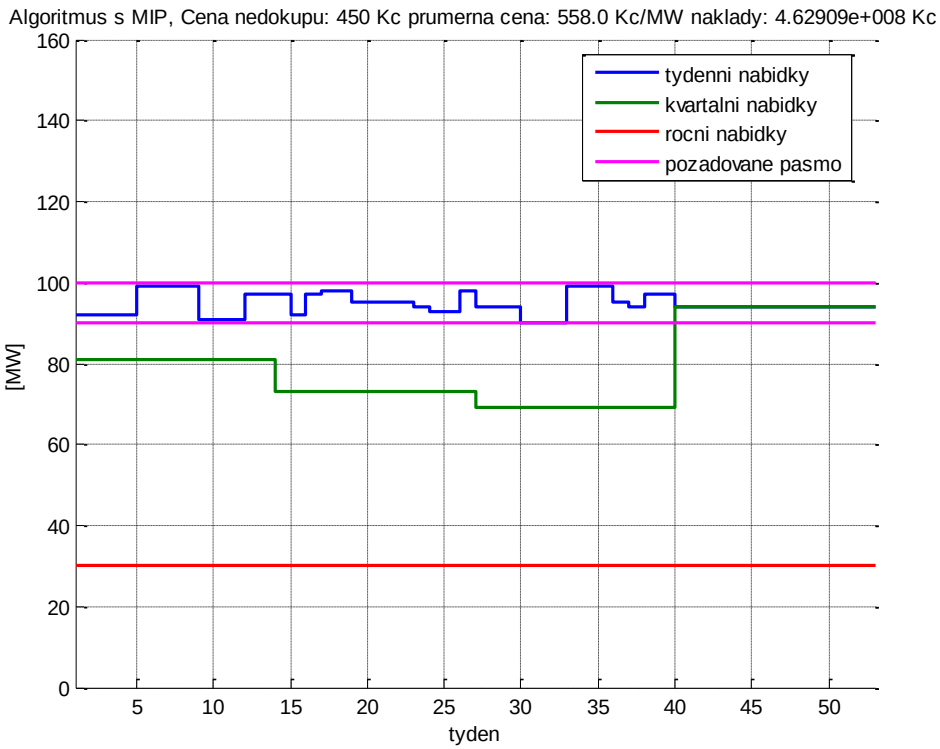
Obr. 26 – Vliv ceny nedokupu na výsledný nákup pomocí algoritmu s MIP



Obr. 27 – Nákup pásma 100 - 130 MW pomocí algoritmu s MIP



Obr. 28 – Nákup pásma 70MW – 100 MW pomocí algoritmu s MIP



Obr. 29 – Nákup pásma 90 MW – 100 MW pomocí algoritmu s MIP

4 Vliv výstavby nových elektráren na regulaci výkonové rovnovány

Otázka vlivu výstavby nových elektráren na regulaci výkonové nerovnováhy v PS je velmi zajímavá pro PPS a Energetický regulační úřad, který přiděluje PPS finance na nákup PpS. Pro PPS je analýza vlivu výstavby nových elektráren významná především pro dlouhodobé strategické plánování. Analyzovány budou dva scénáře výstavby nových elektráren v České republice. Výsledkem analýzy je srovnání ukazatelů spolehlivosti současného provozu PS s analyzovanými budoucími stavy PS a také srovnání nákladů na rezervaci PpS v případě požadavku, aby se v budoucnosti ukazatele spolehlivosti nezvýšily (zachování ukazatelů spolehlivosti spočítaných z historických ACE z let 2003 až 2007). K analýze vlivu výstavby nových elektráren na cenu za rezervaci PpS byl použit nástroj iterační plánování PpS popsaný v kapitole 2. Protože odhad provozu PS v budoucnosti je zatížen celou řadou nejistot a zjednodušení, měla by tato analýza sloužit hlavně jako první náhled na problematiku vlivu výstavby nových elektráren. Na základě výsledků mohou být navrženy specifičtější zadání budoucího vývoje provozu PS.

4.1 Testované scénáře

Hlavním vstupem analýzy jsou scénáře popisující, jak se v budoucnosti změní skladba elektrárenských bloků výrobců elektrické energie v České republice. Zadavatelem byly navrženy dva rozdílné scénáře (dále SC1 a SC2) vycházející ze současného stavu PS popsané v Tab. 21 a Tab. 22. Aby bylo možné analyzovat spolehlivost provozu PS je potřeba vygenerovat ve výpadkovém modelu výpadky jednotlivých elektrárenských bloků. K tomuto účelu je zapotřebí znát statistické parametry (střední dobu provozu mezi výpadky, střední dobu trvání výpadku a další) jednotlivých bloků popisující stavy, ve kterých se blok může nacházet (normální provoz, výpadek). U současných elektrárenských bloků připojených do PS České republiky byly tyto parametry získány statistickou analýzou historických dat provozu těchto bloků. U nových bloků je možné tyto parametry pouze odhadovat, a proto budeme pro zjednodušení uvažovat, že nové bloky jaderných elektráren budou mít stejné parametry provozu jako stávající. U paroplynových a plynových bloků se očekávají podobné parametry provozu, jaké mají v současné době 200MW bloky uhelných elektráren. Dalším zjednodušením je předpoklad, že množství disponibilního výkonu pro autoregulaci výpadků se také nezmění. Disponibilní výkon je v podstatě volný výrobní výkon výrobce elektřiny, který zaktivuje v případě, že některý z jeho elektrárenských bloků vypadne, aby tím snížil výkonový deficit v PS, který výpadkem způsobí. Poslední vstup analýzy, který byl ponechán na současné hodnotě jsou cenové křivky rezervace jednotlivých PpS, které se používájí v iteračním algoritmu a slouží k odhadu nákladů za rezervaci množství PpS.

Zmíněná zjednodušení můžou mít značný vliv na výsledek analýzy vlivu výstavby nových elektráren a proto jak již bylo řeceno na začátku, je potřeba ji brát jen jako první náhled na zmíněnou problematiku.

Tab. 21 – Změna skladby výrobních bloků elektrické energie scénář 1

	počet bloků	Výkon [MW]	druh
Přidané bloky	2	1200	Jaderný
	1	660	Paroplynový
	3	440	Paroplynový
	2	200	Plynový
Odebrané bloky	7	200	Uhelný
	1	500	Uhelný

Tab. 22 – Změna skladby výrobních bloků elektrické energie scénář 2

	počet bloků	Výkon [MW]	druh
Přidané bloky	1	1700	Jaderný
	1	660	Paroplynový
	4	440	Paroplynový
	2	200	Plynový
Odebrané bloky	7	200	Uhelný
	1	500	Uhelný

4.2 Výsledky

Prezentované ukazatele spolehlivosti skladeb PpS jsou hodnoty spočtené z 500 MC simulací provozu PS, proto je lze považovat za přesný odhad skutečných ukazatelů spolehlivosti (relativní chyby ukazatelů viz Tab. 9).

4.2.1 Vliv výstavby nových elektráren na ukazatele spolehlivosti PS

V tomto testu byly provedeny MC simulace provozu PS s rezervovaným množstvím PpS z předpokládané roční přípravy provozu pro rok 2009 (dále PRPP). Roční diagramy rezervovaného výkonu jednotlivých služeb z PRPP jsou uvedeny v příloze na Obr. 31 až Obr. 35. Ukazatele spolehlivosti PS pro SC1, SC2 a aktuální portfolio výrobních bloků jsou v Tab. 23. Z tabulky je vidět, že nejhorší ukazatele spolehlivosti dosahuje PS ze SC2. Důvodem je zřejmě vliv největšího elektrárenského bloku v PS, který v případě výpadku způsobí velký výkonový deficit a PPS nemá potřebné množství regulačního výkonu, aby tuto nerovnováhu dostatečně rychle vyrovnal. Největší nárůst nastal podle očekávání u ukazatele E^2_{100}, jehož velká hodnota signalizuje, že v PS nastávají velké a

dlouho trvající výkonové nerovnováhy. Přestože se hodnoty všech ukazatelů spolehlivosti zvýšily, nedošlo u ukazatelů *rP*, *rE* a *n15* k překročení historicky vypočítaných hodnot z minulých let (Tab. 13). Jediný ukazatel, který překročil ukazatele spočítané z historických dat je σ_{dP}.

Tab. 23 – Srovnání ukazatelů spolehlivosti jednotlivých scénářů s nynějším stavem PS

	Ukazatele spolehlivosti							
	rP	*rE*	*n15*	$E2_{100}$	μ_{dP}	σ_{dP}	σ_{dE}	E_{100}
	[%]	[%]	[-]	[MW^2]	[MW]	[MW]	[MW/h]	[MW]
Nynější stav	2,33	0,93	4,88	1 845 851	-0,08	43,55	8,94	293 062
Scenář 1	2,52	1,36	14,72	36 826 500	0,74	48,21	19,22	299 414
Scenář 2	2,84	1,67	24,23	132 721 023	2,36	57,73	36,01	312 738

4.2.2 Vliv výpadku největšího bloku v soustavě

Výpadek největšího bloku v soustavě nastává typicky několikrát v roce a má tedy značný vliv na celkovou spolehlivost PS. Velikost největšího bloku v soustavě také ovlivňuje doporučené množství PpS, který by měl mít PPS k dispozici po celý rok. Toto doporučené množství je definováno rovnicí (4-1), kde *VNB* je výkon největšího elektrárenského bloku v PS a mělo by zaručovat vyrovnání výkonové nerovnováhy v PS způsobené výpadkem největšího elektrárenského bloku do 15 minut. Vliv výpadku největšího bloku v soustavě na spolehlivost byl testován simulacemi pěti výpadků tohoto bloku během 14 dnů. Výpadky jsou dvojího druhu a liší se rychlostí, s jakou nastane v PS plný výkonový deficit způsobený tímto výpadkem (během jedné minuty nebo lineárním zvyšováním vypadlého výkonu po dobu 100 minut). Oba případy jsou při běžném simulování chování PS přibližně stejně pravděpodobné. V současné době je největším elektrárenským blokem 1000MW blok jaderné elektrárny Temelín, ve SC1 je největší 1200MW a v SC2 1700MW blok jaderné elektrárny. Ukázky testovaných časových řad ACE a ACE_{OV} pro SC2 a současný stav jsou na Obr. 30. Na uvedeném obrázku je ACE spočtené pro simulaci provozu PS s rezervovaným množství PpS z PRPP. Již na první pohled je zřejmé, že regulace průběhu ACE_{OV} ze SC2 je horší, protože v PS i po regulaci zůstává velká výkonová nerovnováha. Zhoršující se trend ve spolehlivosti ukazatelů je dobře viditelný v Tab. 24, kde je porovnání jednotlivých ukazatelů spolehlivosti pro všechny zkoumané situace.

$$SR + \frac{1}{3}TR^{+} + QS \geq VNB \tag{4-1}$$

Tab. 24 – Srovnání ukazatelů spolehlivosti dosažených skladbou z PRPP na testovaných řadách ACE_{OV}

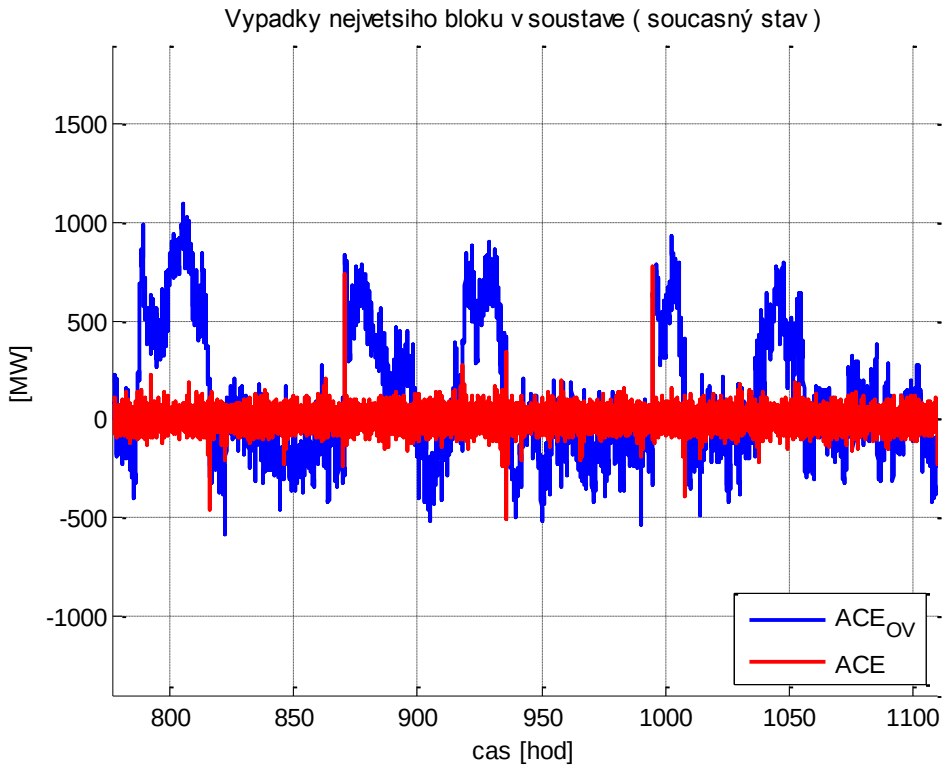
	Ukazatele spolehlivosti							
	rP	*rE*	*n15*	$E2_{100}$	μ_{dP}	σ_{dP}	σ_{dE}	E_{100}
	[%]	[%]	[-]	[MW^2]	[MW]	[MW]	[MW/h]	[MW]
Nynější stav	2,67	1,50	0,00	178	0,42	46,15	7,65	11 600
Scenář 1	2,77	3,30	0,00	178	1,03	47,86	8,80	11 717
Scenář 2	9,42	12,01	16,00	11 105 002	22,08	100,24	79,17	18 045

V další části analýzy vlivu výpadku největšího bloku byl použit iterační algoritmus pro nalezení skladby PpS, která by na testovaných úsecích ze SC1 a SC2 dosáhla stejných nebo lepších ukazatelů spolehlivosti *rP* a *rE*, jaké měla skladba z PRPP na úseku s výpadky aktuálně největšího elektrárenského bloku (první řádek Tab. 24). Pro srovnání byly v iteračním algoritmu navrženy dvě skladby PpS pro každý scénář. Rozdíl ve výpočtu spočíval v hodnotě pravých stran rovnic (2-1) ve vstupech iteračního algoritmu. Pravé strany byly vynásobeny poměrem největšího elektrárenského bloku pro daný scénář k velikosti aktuálně největšího bloku (například pro SC2 byly vynásobeny číslem 1,7). První rovnice reprezentuje již zmíněné pravidlo N-1. Zbylé dvě nerovnice jsou pouze expertním omezením přípustných nákupu PpS definované PPS. Tyto rovnice ovlivňují generování prostoru přípustných skladeb PpS v iteračním algoritmu. V Tab. 25, kde jsou zobrazeny skladby PpS navržené iteračním algoritmem společně s ukazateli spolehlivosti, jsou skladby, u kterých nebylo požadováno dodržení pravidla N-1 pro aktuálně největší blok v PS, označeny (bez N-1).

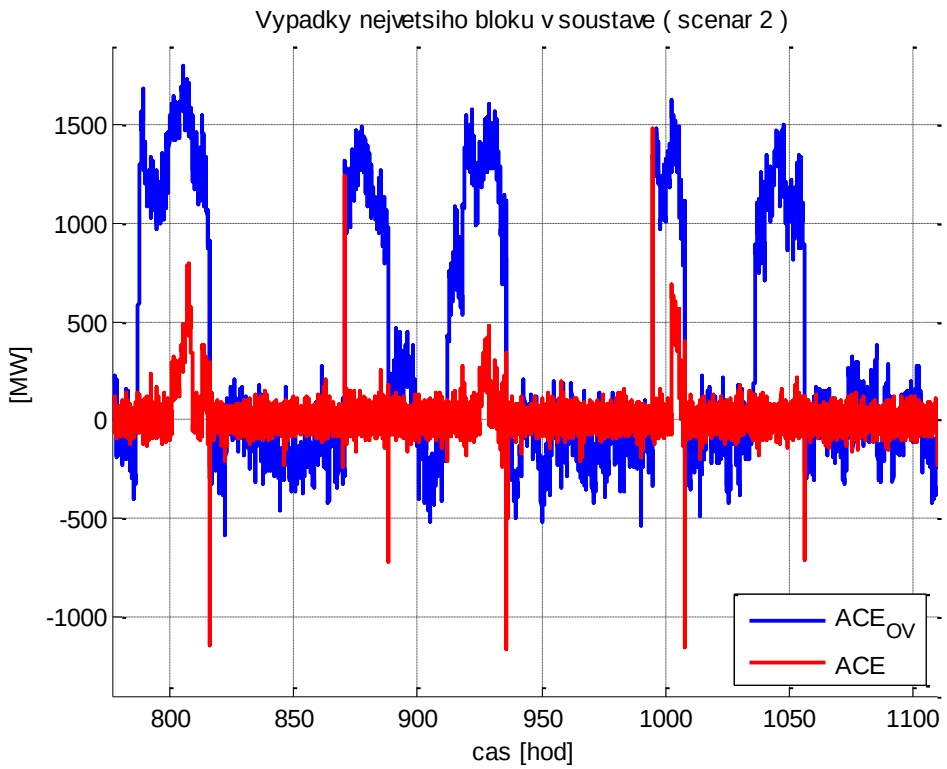
Iteračnímu algoritmu se nepodařilo pro časový průběh ACE_{OV} ze SC2 najít v prostoru přípustných řešení skladbu, která by splnila požadované ukazatele spolehlivosti, proto jsou v Tab. 25 zobrazeny skladby, které dosáhly na testovaném průběhu minimální hodnoty obou ukazatelů spolehlivosti. Z tabulky je vidět, že nárůst nákladů na rezervaci služeb PpS koresponduje se zvýšením ukazatelů spolehlivosti z Tab. 24. Je zřejmé, že průběhy z SC1 se příliš neliší od současného stavu a proto ani náklady na rezervaci skladby PpS, která splní požadované ukazatele, nebudou o mnoho vyšší.

Tab. 25 – Nalezené skladby iteračním algoritmem pro jednotlivé testovací průběhy výpadku největšího bloku v soustavě

	RZSR	*RZTR+*	*RZTR-*	*RZSQ*	*RZDZ*	relativni náklady	*rP*	*rE*
Označení skladeb	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[%]	[%]	[%]
SC1	350	0	200	900	200	121	2,58	1,50
SC1 (bez N-1)	350	0	200	800	200	113	2,58	1,50
SC2	600	350	0	1000	50	177	2,85	2,70
SC2 (bez N-1)	450	250	100	1000	200	156	3,13	2,70



a)



b)

Obr. 30 – Testované časové řady (a) aktuálního stavu (b) soustavy a scénáře 2

4.2.3 Plánování skladeb PpS pro měsíc leden

V tomto testu byl použit iterační algoritmus k návrhu skladby PpS pro regulaci PS z SC1 a SC2 pro měsíc leden s referenčními ukazateli z historických dat (poslední řádek Tab. 13). Cílem je porovnat náklady nalezených skladeb s náklady za rezervaci skladby PpS navrženou iteračním algoritmem pro měsíc leden z kapitoly 2.3.3. Stejně jako v předchozím případě byly provedeny dva výpočty iteračního algoritmu pro každý scénář lišící se požadavkem na dodržení pravidla N-1. V Tab. 26 jsou zobrazeny nalezené skladby pro jednotlivé scénáře společně se skladbou navrženou pro aktuální stav PS. V tabulce jsou relativní náklady na rezervaci jednotlivých skladeb PpS pro měsíc leden.

Z Tab. 26 je vidět, že skladby, kde bylo požadováno dodržení pravidla N-1 mají vyšší náklady na rezervaci PpS, zároveň ale dosahují nižšího ukazatele n15. Zajímavý je rozdíl mezi navrhovanou skladbou PpS pro případ SC2 a SC2 (bez N-1). Z výsledků je vidět, že obě skladby splňují ukazatele spolehlivosti vypočítané z historických průběhů ACE (poslední řádek v Tab. 13) přesto je skladba SC2 mnohem dražší. Tento výsledek naznačuje, že pokud bychom v budoucnu nedodržovali pravidlo N-1, je možné regulovat PS s mnohem nižšími náklady na rezervaci PpS a stále plnit ukazatele spolehlivosti dané historií.

Tab. 26 – Skladby nalezené iteračním algoritmem pro jednotlivé scénáře stavu PS

Scénář	PpS					Relativní náklady
	RZSR	*RZTR+*	*RZTR-*	*RZSQ*	*RZDZ*	
	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[%]
Současny stav	290	260	112	570	166	100
SC1	400	300	150	700	200	130
SC1 (bez N-1)	270	450	200	600	200	120
SC2	570	400	150	1000	0	177
SC2 (bez N-1)	300	650	150	500	100	127

Scénář	Ukazatele spolehlivosti							
	rP	*rE*	*n15*	$E2_{100}$	μ_{dP}	σ_{dP}	σ_{dE}	E_{100}
	[%]	[%]	[-]	[MW^2]	[MW]	[MW]	[MW/h]	[MW]
Současny stav	2,62	1,68	0,80	1 999 807	0,49	46,51	12,54	25 872
SC1	2,62	1,75	0,73	4 572 423	0,71	48,24	14,64	26 061
SC1 (bez N-1)	2,66	1,66	1,16	4 461 604	0,70	48,07	14,58	26 143
SC2	2,64	1,90	0,89	5 100 450	0,85	48,16	16,01	26 130
SC2 (bez N-1)	2,76	1,95	1,97	5 357 819	0,86	48,12	17,46	26 331
referenční ukazatele	3,83	2,21	x	x	x	48,41	x	x

5 Závěr

V této práci byly vyřešeny úlohy spojené s plánováním potřebného množství PpS pro regulaci přenosové soustavy s požadovanou spolehlivosti a optimálním nákupem množství PpS ve výběrovém řízení. Poslední část se zabývala analýzou vlivu výstavby nových elektráren na regulaci výkonové nerovnováhy v přenosové soustavě České republiky.

Testy ukázaly, že iterační algoritmus je v aktuální verzi velmi dobrý nástroj pro hledání nejlevnější skladby PpS splňující pro optimalizační časový interval zadané ukazatele spolehlivosti. Algoritmus úspěšně navrhl skladbu PpS pro celý rok, které splnila požadované referenční ukazatele spočítané z historických průběhů ACE z let 2003 – 2007 (kapitola 2.3.3). Náklady na rezervaci nalezené skladby jsou nižší než skladba z roční přípravy provozu pro rok 2009 téměř ve všech měsících a celkově náklady za celý rok, jsou nižší o 8 procent. Výsledné skladba také lépe splňuje požadavek, aby byla přenosová soustava regulována po celý rok stejně spolehlivě. Jediný zásadní problém tohoto řešení je časová náročnost algoritmu, kterou nelze předem odhadnout. Jediný možný odhad je pouze horní hranice, za kterou algoritmus určitě skončí. Tento odhad není příliš užitečný, protože například pro úlohu hledání optimální skladby na měsíc leden podle historických ukazatelů spolehlivosti (kapitola 2.3.2), by horní odhad činil 2 roky. Algoritmus přitom optimální skladbu našel za 6 hodin. V případě výpočtu optimální skladby pro více měsíců v roce nebo případně pro více časových pásem v měsíci (pracovní noc, pracovní den, nepracovní noc, nepracovní den) je možné výpočet bez problémů paralelizovat a tím významně zkrátit dobu potřebnou k nalezení optimálních skladeb PpS. Iterační algoritmus byl společně s výsledky prezentován na konferenci International Conference on Environment and Electrical Engineering konané 10. – 13. května 2009 v polském městě Karpacz.

Jako nejlepší algoritmus řešící úlohu optimálního nákupu PpS na výběrovém řízení byl vybrán algoritmus používající lineární programování s celočíselnými proměnnými. Jeho hlavní výhodou je garance nalezení řešení, které splňuje všechny omezující podmínky, jestliže takové řešení existuje. O výsledném nákupu je také možné prohlásit, že je proveden za minimální náklady. Toto řešení má také výhodu, že ho lze použít nejen k nalezení optimálního nákupu ve smyslu minimální průměrné ceny, ale i k minimalizaci nákladů, jestliže cenu za nedokup nebudeme variovat, ale nastavíme ji na hodnotu námi očekávané ceny za službu v dalších kolech výběrových řízení. Robustnost řešení je vykoupena vyšší časovou náročností a potřebou pořídit komerční solver pro řešení optimalizace. Řešení úlohy optimálního nákupu PpS pomocí lineárního programování s celočíselnými proměnnými bylo otestováno na reálných datech výběrového řízení v listopadu 2009. V současné době se plánují drobné změny před výběrovým řízením konaným v tomto roce a případná implementace v jiném programovém prostředí než MATLAB®.

V analýze vlivu výstavby nových bloků na spolehlivost provozu přenosové soustavy se podle očekávání ukázalo, že scénář č. 2, ve kterém byl největším elektrárenským blokem v soustavě 1700MW blok jaderné elektrárny, je z pohledu spolehlivosti přenosové soustavy nejhorší. Náklady na rezervaci množství PpS potřebných pro dosažení historických ukazatelů spolehlivost jsou ve scénáři č. 2 také nejvyšší (až o 70 procent oproti nákladům na rezervaci skladeb z roční přípravi provozu pro rok 2009). Zajímavé je zjištění, že pokud bychom nepožadovali dodržení pravidla N-1 pro 1700MW blok jaderné elektrárny, tak by se náklady na rezervaci PpS oproti

scénáři jedna zvýšily jenom o 7 procent a oproti skladbě z PRPP o 27 procent. Variant možných scénářů vývoje přenosové soustavy je celá řada. Další zajímavé analýzy by se mohly týkat například vlivu parametrů provozu jednotlivých bloků na spolehlivost přenosové soustavy a s tím spojenými náklady na rezervaci PpS, pokud bychom chtěli spolehlivost udržet na historické úrovni.

6 Literatura

[1] Horáček. P. – Havel. P. a kol.: *Spolehlivost a ekonomie systémových služeb: model spolehlivosti SyS*, Centrum aplikované kybernetiky, 2009

[2] Novák, O. – Horáček. P – Šindelář, R. – Janeček, E. – Janeček, P.: *Roční příprava provozu*, Centrum aplikované kybernetiky, 2008.

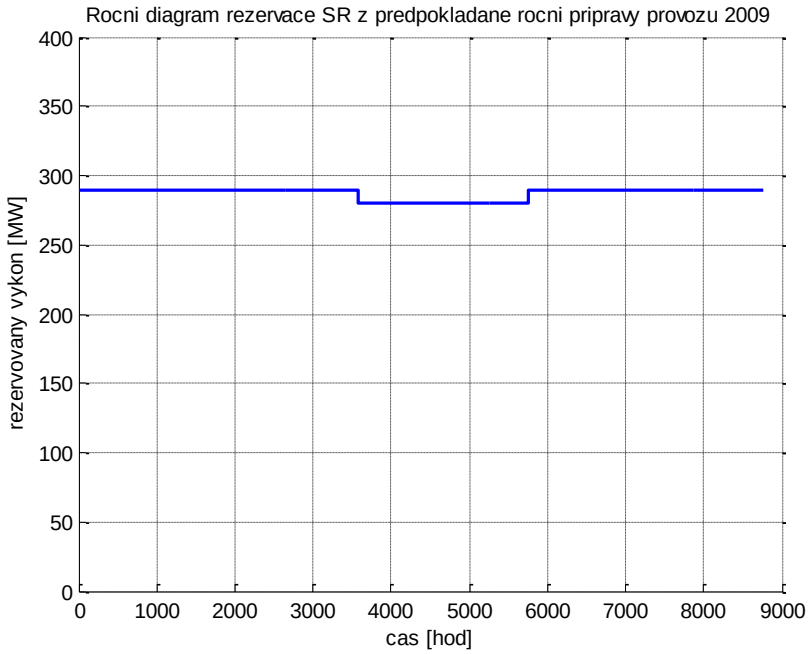
[3] Filas, P.: *Optimalizace výkonových rezerv pro řízení rovnováhy v přenosové síti*, diplomová práce, ČVUT FEL, 2008.

[4] Černý, V.: *Konvergence ukazatelů spolehlivosti,* Centrum aplikované kybernetiky, 2007.

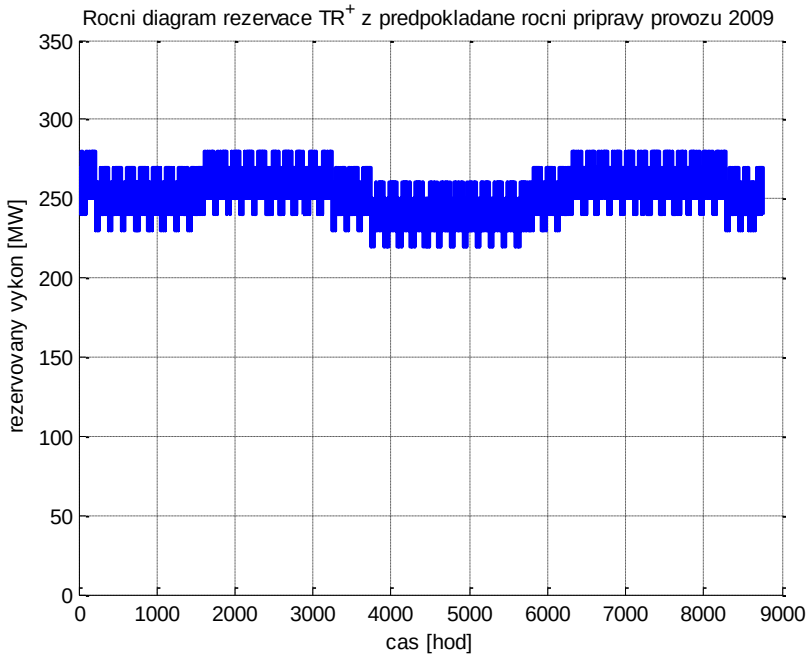
[5] *UCTE Operation Handbook*. Verze 2.5, 24.6.2004, http://www.ucte.org/.

[6] *Kodex přenosové soustavy. ČEPS, a.s.*, revize leden 2009, http://www.ceps.cz/

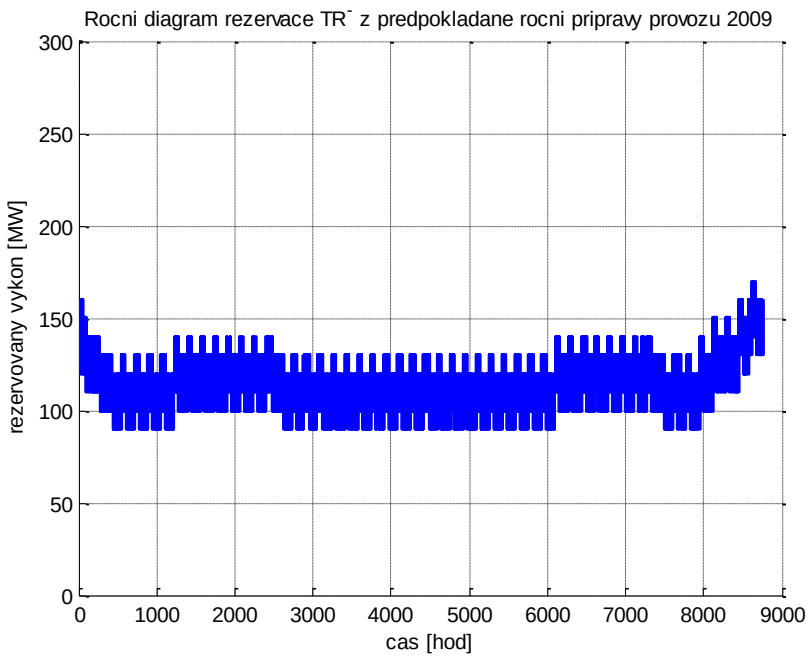
7 Přílohy



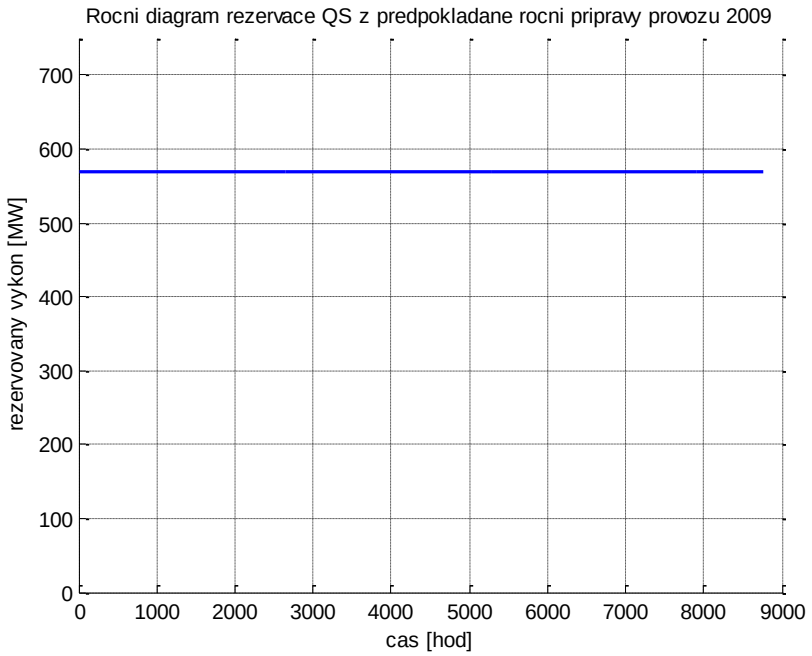
Obr. 31 – Roční diagram rezervace SR z předpokládané roční přípravy provozu pro rok 2009



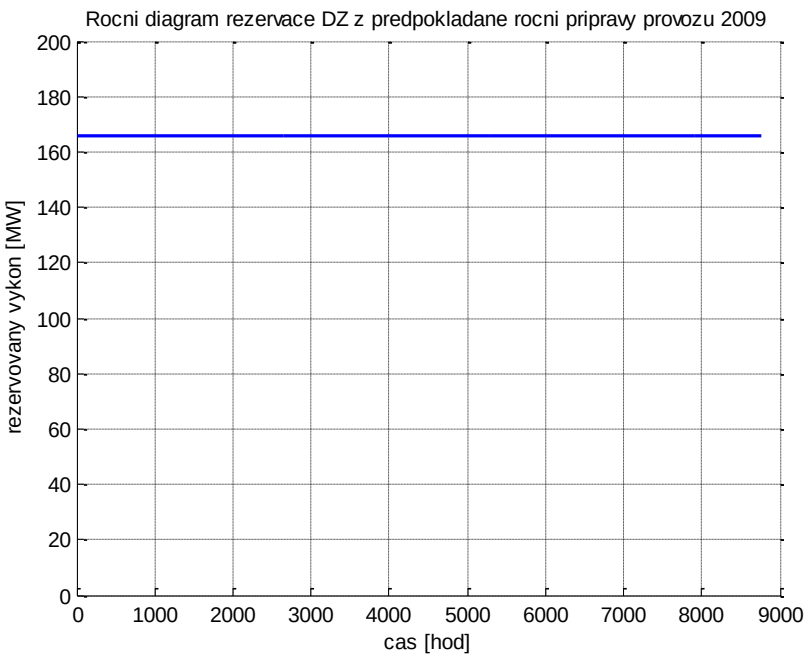
Obr. 32 – Roční diagram rezervace TR^+ z předpokládané roční přípravy provozu pro rok 2009



Obr. 33 – Roční diagram rezervace TR$^-$ z předpokládané roční přípravy provozu pro rok 2009



Obr. 34 – Roční diagram rezervace QS z předpokládané roční přípravy provozu pro rok 2009



Obr. 35 – Roční diagram rezervace DZ z roční přípravy provozu pro rok 2009