FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

2011

Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky,
Fakulta elektrotechnická
Výzkumná zpráva č.: 22190-050-2011

Advanced Power Management Vozidla

Druh úkolu: Vědecko-výzkumný
Řešitelé: Václav Šmídl
Vedoucí úkolu: Zdeněk Peroutka
Počet stran: 35
Datum: prosinec 2011
Revize: 2

Tento projekt byl realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu ČR – projekt č. FR-TI1/343.

Předmět řešení podléhá obchodnímu tajemství!

Anotace

Pokročilá správa energie (advanced power management, APMV) vozidla je nadstavba nad základní správu energie (basic power management, BPMV). Hlavní výhodou APMV je schopnost optimalizovat energii potřebnou k projetí celé uvažované trasy, a tedy zahrnout do optimalizace profil trati a aktuální situaci na trati. Teoretickým východiskem je metoda známá jako Markovský rozhodovací proces (Markov decision process). Je odvozen dynamický stavový model vozidla řízeného BPMV a cenová funkce definující cenu provozu vozidla. Vlastní optimalizační algoritmus pak navrhuje strategii volby režimu BPMV tak, aby minimalizoval náklady na projetí předpokládané trasy. Parametry stavového modelu a cenové funkce jsou určeny simulačně. Funkčnost navrženého algoritmu je ověřena simulačně a srovnána s funkcí neoptimalizovaného BPMV.

Seznam symbolů a zkratek

Pokud není uvedeno jinak jsou zkratky veličin shodné s [2].

Nejčastěji používané zkratky jsou:

SOCb	State of Charge Baterie
SOCsc	State of Charge Super-kapacitoru
Pdc	Požadovaný výkon meziobvodu
Pd	Skutečný výkon meziobvodu
Pts	Výkon trakčního střídače
APMVrezim[1]	Režim provozu vozidla (BPMVrezim + nabíjení)
BatMode	Výběr režimu dobíjení
APMVmode	Akce APMV - kombinace APMVrezimu a BatMode
DG	Diesel Generator
MDP	Markov Decision Process

Obsah

1 Úvod 4
1.1 Markov Decision Process 4
1.2 Dynamické programování 4
2 Stavový popis APMV 6
2.1 Přírůstková parametrizace modelu 8
3 Určení parametrů modelu a ceny 9
3.1 Odhad parametrů pravděpodobnostního modelu 9
3.2 Odhad parametrů cenové funkce 10
4 Predikce externích veličin 12
4.1 Detailní postup simulace trasy 12
4.2 Převod trasy do časové oblasti 13
5 Algoritmus výpočtu řídícího zásahu 15
6 Rozšíření 17
6.1 Učení za chodu 17
6.2 Přechod na parametrickou reprezentaci 18
7 Referenční implementace v Matlabu 19
8 Výsledky simulací 21
8.1 Zpracování simulovaných dat 21
8.2 Vliv cen komodit na výsledky optimalizace 22
8.3 Průjezd čistou oblastí 25
8.4 Vyšší pravděpodobnost čistého pojezdu 25
8.5 Vliv jemnosti diskretizace 26
8.6 Vícenásobný horizont 27
8.7 Experiment s “reálnými” daty 27
9 Závěr 32

1 Úvod

Tato výzkumná práce navazuje na základní power management vozidla (BPMV), [2]. Cílem je nalézt rozšíření BPMV umožňující využití signálu GPS, dalších znalostí o trase, případně umožňující vylepšování parametrů pomocí učení z dat získaných za provozu.

Základní myšlenkou zvoleného přístupu je predikce možných budoucích požadovaných výkonů na základě všech dostupných informací. Pro takto získané predikce je navržena optimální strategie řízení na základě dynamického programování. Pokud jsou veškeré veličiny reprezentovány konečnou množinou diskrétních stavů, je problém možno formulovat jako Markov Decision Process, jehož řešení je známé.

1.1 Markov Decision Process

Markov Decision Process je definován čtveřicí S, A, P, C kde

S je množina všech možných stavů systému, $S = \{S_1, \ldots, S_n\}$

A je množina všech možných akcí (řídících zásahů), $A = \{a_1, \ldots, a_m\}$

P je pravděpodobnost přechodů mezi stavy, $P(S_{t+1}|S_t, a_t, t)$,

C je cena (cost) za přechod mezi stavy a akci, $c_{t+1} = C(S_{t+1}, S_t, a_t)$.

Cílem MDP je navrhnout optimální řídící strategii $a_t = \pi(S_t)$. Kde S_t je okamžitá hodnota stavu v diskrétním čase t, a a_t řídící zásah generovaný vypočtenou strategií. Časová (kauzální) závislost veličin je tedy:

$$\{a_{t-1}, S_t, a_t, S_{t+1}\}.$$

1.2 Dynamické programování

Řešení optimálního řízení MDP je možné nalézt algoritmem dynamického programování [1]. Výpočet řídící strategie spočívá v rekurzivním výpočtu Bellmanových rovnic optimality:

$$\begin{aligned} a^*_\tau(S_\tau) &= \arg\min_{a_t} \left\{ \sum_{b_{\tau+1}} P(S_{\tau+1}|S_\tau, a_\tau) \left(C(S_{\tau+1}, S_\tau, a_t) + J(S_{\tau+1})\right) \right\}, \qquad (1) \\ J(S_\tau) &= \sum_{S_\tau} P(S_{\tau+1}|S_\tau, a^*_\tau(S_\tau)) \left(C(S_{\tau+1}, S_\tau, a^*_\tau(S_\tau)) + J(S_{\tau+1})\right), \ \forall \tau = t+h, \ldots, t \end{aligned}$$

kde výpočet probíhá zpětným průchodem horizontu od času $\tau = t + h$ do t. Funkce $J(S_\tau)$ je známa jako cost-to-go, čili cena za projití zoptimalizované části horizontu s okrajovou podmínkou $J(S_{t+h})$.

Ačkoliv je rovnice (1) univerzální, lze najít mnoho jejích variant pro různé konfigurace stavů a akcí [3].

2 Stavový popis APMV

Diskrétní model vozidla pro účely APMV je konstruován na mnohem delším horizontu než pro účely BPMV. Očekávaná perioda vzorkování, Δt, je v řádu několika vteřin.

Navrhovaná stavová reprezentace pro popis vozidla s hlediska APMV je následující:

Stav S se skládá z částí:

- SOCb na konci intervalu Δt, značeno bude $b_t \in \{1, \ldots, n_{soc}\}$,
- DGon na konci intervalu Δt, značeno $g_t \in \{0, 1\}$,
- Pd je průměrný dodaný výkon za interval Δt, značeno $pd_t \in \{1 \ldots n_{pdc}\}$,
- APMVrezim je aktuální stav požadavku na čistý pojezd nebo dobíjení v době vzorkování t. Pro účely APMV je tento stav považován za konstantní[2] po celou následující dobu Δt, a bude značen r_t

r_t=1	hybridní provoz
r_t=2	čistý pojezd
r_t=3	nabíjení ze sítě

dohromady tedy $n_S = n_{soc} \times n_{pdc} \times 2 \times 3$ možných stavů. Kauzální závislost je:

$$\{DGon_t, Pd_t, APMVrezim_t, SOCb_t, a_t, \\ DGon_{t+1}, Pd_{t+1}, APMVrezim_{t+1}, SOCb_{t+1}, a_{t+1}\}.$$

Akce A je množina $A = \{1, \ldots, 6\}$, jejíž konkrétní hodnotu v čase t, a_t budeme označovat jako APMVmode. Tato veličina je složená ze základních kamenů BPMV:

a_t	BATmode	DG	nabíjení ze sítě
1	–	stop	ne
2	0	běží	ne
3	1	běží	ne
4	2	běží	ne
5	3	běží	ne
6	–	stop	ano

[2] BPMV bude reagovat na požadavek s nejkratší možnou reakční dobou.

Model P pravděpodobnosti přechodů mezi stavy je možné rozdělit pomocí řetězového pravidla

$$\begin{aligned} P(S_{t+1}|S_t, a_t) &= P(b_{t+1}|S_t, pd_{t+1}, r_{t+1}, a_t)P(g_{t+1}|a_t)P(pd_{t+1}, r_{t+1}|X), \\ &= P(b_{t+1}|b_t, pd_{t+1}, a_t)P(g_{t+1}|a_t)P(pd_{t+1}, r_{t+1}|X), \end{aligned} \tag{2}$$

kde je využit předpoklad, že pokles SOCb z času t do $t+1$ je pouze důsledkem požadovaného výkonu na tomto intervalu (pd_{t+1}) a nikoliv v předchozím. Druhé zjednodušení vychází z deterministického vztahu mezi g_t a a_t

$$p(g_t|a_t) = \begin{cases} 1, & a_t \in \{2,3,4,5\}, \\ 0, & a_t \in \{1,6\}, \end{cases}$$

(viz tabulka) a r_t a a_t:

$$r_{t+1} = 2 \Rightarrow a_t = 1. \;\; r_{t+1} = 3 \Rightarrow a_t = 6. \tag{3}$$

Díky tomu je akce a_t vždy funkcí r_t.

Odhad budoucího požadovaného výkonu je funkcí ostatních externích měřených veličin, souhrnně označovaných X, které obsahují souřadnice GPS, mapové podklady, příp. statistiky průjezdnosti dané trasy, či informace o dopravní situaci.

Poznámka 1. Stavy pd_t, r_t mají charakter externí informace jak je uváděna v [3]. Důsledkem je jiné zacházení s těmito veličinami než s ostatními stavovými veličinami ve výpočtu strategie řízení.

Cena C je cena za provoz vozidla v penězích, zde budeme uvažovat Kč. Cena se skládá z nákladů nutných k zajištění trvalého provozu vozidla $C_{kom}()$ a z ceny za nesplnění požadovaného výkonu C_{Pdc}

$$C_{us}(S_{t+1}, S_t, a_t) = C_{kom}(S_{t+1}, S_t, a_t) + C_{pdc}(S_{t+1}, S_t, a_t).$$

Cena provozu se dá vyčíslit ze spotřeby tří komodit:

1. cena nafty do DG,
2. cena za opotřebení baterie,
3. cena za elektrickou energii, kterou je možné dodat ze sítě.

A dále ceny za nesplnění požadovaného výkonu, tj. $Pdc \neq Pd$.

V této reprezentaci jsou pevně zvolené stavové a akční veličiny, je však nutné dodefinovat model jejich vývoje a jejich cenu.

2.1 Přírůstková parametrizace modelu

Předpokládáme, že:

- náboj dodaný do baterie způsobí stejnou změnu jejího SOC,
- cena dodaného náboje je stejná pro všechny SOC, tj. i opotřebení baterie je stejné pro každou hodnotu SOC.

Za těchto předpokladů je pravděpodobnost $p(b_{t+1}|b_t, \cdot) = p(b_{t+1}+k|b_t+k, \cdot)$, kde k je libovolná konstanta. Vyjímku tvoří stavy blízké hraničním bodům SOC, tj. 0% a 100%. Vzhledem k tomu, že přechody mimo hranice SOC by vedly přinejmenším k nesplnění požadavku na Pdc (pokus o čerpání energie z prázdné baterie) nebo poškození baterie, budeme jakoukoliv akci vedoucí k překročení hranic významně penalizovat. Tím se vyhneme nutnosti detailního modelování těchto situací.

Zavedeme pomocnou veličinu $\Delta b_{t+1} = b_{t+1} - b_t$, jejíž pravděpodobnostní model je možné převést na:

$$P(\Delta b_{t+1}|pd_{t+1}, a_t) = P(b_{t+1} - b_t|pd_{t+1}, a_t), \tag{4}$$

který je možné reprezentovat mnohem menší tabulkou než původní díky ostrému ohraničení $|\Delta b_t| < \Delta b_{t,max}$. Tuto parametrizaci je možné použít i pro reprezentaci ztrátové funkce v ustáleném stavu, $C_{us}(\Delta b_{t+1}, pd_{t+1}, a_t)$,

$$C_{us}(\Delta b_{t+1}, pd_{t+1}, a_t) = C_{us}(b_{t+1} - b_t, pd_{t+1}, a_t). \tag{5}$$

3 Určení parametrů modelu a ceny

Zvolená parametrizace modelu a ceny i po zjednodušení (4)–(5) obsahuje velké množství neznámých parametrů, které je třeba určit. Tyto parametry určíme statistickým odhadem ze simulovaných dat.

Simulace se provede následovně:

- Zvolíme náhodnou řídící strategii $a_t = \pi(b_t, r_t)$, kdy se APMVmode nastaví náhodně s vhodně zvolenou periodou.
- S touto strategií nasimulujeme provoz vozidla za co možná informačně nejbohatších podmínek, tj. v provozu se bude vyskytovat co nejširší škála situací se kterou je možné počítat.
- Okamžité hodnoty

$$[t,\, SOCb,\, SOCsc,\, Pdc,\, Pts, Ppp,\, BPMVrezim,\, dSpotreba_nafty/dt] \qquad (6)$$

  se uloží do souboru.

Veličiny (6) obsahují přímo hodnoty stavu, které vyžadují jen minimální úpravy:

- SOCb je pozorováním b_t a stačí jej pouze diskretizovat. Pro přírůstkový model je výhodné diskretizovat Δb_t,
- Dodaný výkon pd_t je možné určit jako výkon trakčního střídače a výkon dodaný pomocným pohonům: Pts+Ppp.
- BPMVrezim je přímé pozorování (části)[3] r_t a současně g_t.

Ostatní veličiny budou použity na výpočet spotřeb komodit pro výpočet ceny.

3.1 Odhad parametrů pravděpodobnostního modelu

Při zvolené diskrétní pravděpodobnosti je množinou parametrů modelu množina pravděpodobností přechodu mezi všemi možnostmi stavu. Při přírůstkové parametrizaci$p(\Delta b_t | pd_t, a_{t-1})$ se tedy jedná o $n_{\Delta s} \times n_{pd} \times n_a$ skalárních hodnot. Pro odhad takovéhoto počtu parametrů je třeba použít alespoň několikanásobný počet dat.

[3] Režim nabíjení není v BPMVrezim.

Z uložených výsledků (6) se vyrobí statistika přechodů $n_{\Delta b_{t+1},pd_{t+!},a_t}$, což je počet vzorků simulace, ve kterých byl systém ve stavu $\Delta b_{t+1}, pd_{t+1}, a_t$. Výsledný parametr modelu je pak:

$$P(\Delta b_{t+1}|pd_t, a_t) = \frac{n_{\Delta b_{t+1},pd_{t+!},a_t}}{\sum_{b_{t+1}} n_{\Delta b_{t+1},pd_{t+!},a_t}}. \tag{7}$$

3.2 Odhad parametrů cenové funkce

Obdobným způsobem jako v případě přechodové pravděpodobnosti získáme bodové odhady parametrů pro funkci C_{kom}. Tu budeme opět reprezentovat tabulkou, do níž uložíme průměrnou ztrátu ze všech hodnot Monte Carlo simulace.

Celková cena jednotlivých akcí je vypočtena součtem všech nákladových komodit:

$$C_{kom}(\cdot) = Sp_{nafty}cena_{nafty} + Sp_{batcyklu}cena_{batcyklu} + Sp_{el.energie}cena_{el.energie} \tag{8}$$

kde Sp_{nafty}, $Sp_{batcyklu}$ a $Sp_{el.energie}$ jsou tabulky se spotřebou dané komodity pro danou změnu stavu. Cena za nesplnění požadavku je určena

$$C_{Pdc}() = cena_{Pdc}(Pdc_t - Pd_t). \tag{9}$$

Celková spotřeba komodit je součtem spotřeby v ustáleném stavu a ceny za přechod mezi jednotlivými stavy.

Přechod mezi naprostou většinou stavů je zadarmo, takže není třeba penalizovat. Vyjímkou je přechod z $g_t = 0$ do $g_t = 1$, který zahrnuje start DG. Dodatečnou penalizací budeme také kompenzovat přechod mimo hranice SOCb, který vyplývá ze zvolené parametrizace:

$$C = C_{us} + cena_{startuDG}StartDG + cena_{soc_bound}SOCoutofbound,$$

kde

$$StartDG = \begin{cases} 1, & g_t = 0, g_{t+1} = 1, \\ 0, & \text{jinak.} \end{cases} \tag{10}$$

$$SOCoutofboud = \begin{cases} 1, & b_t > SOCb_{min}, \, or \, SOCb_{max} < 0\%, \\ 0, & \text{jinak.} \end{cases} \tag{11}$$

Spotřeby nákladů je vhodné uchovávat pro další použití aby bylo možné (8) přepočítat kdykoliv

při změně některé z komodit.

Spotřeba nafty je přímo měřená veličina. Spotřeba elektrické energie bude vypočtena jako

$$\begin{aligned} Sp_{el.enercie} &= \Delta b_t * kapacita_{baterie} + \Delta Esc_t. \\ \Delta Esc_t &= \frac{1}{2C_{sc}} Q^2_{sc,max}(SOCsc^2_t - SOCsc^2_{t-1}). \end{aligned}$$

Kde $kapacita_{baterie}$ je maximální energie uchovávaná v baterii, $Q_{sc,max}$ je maximální náboj superkapacitoru a C_{sc} je kapacita superkapacitorů. Základní rovnicí pro výpočet ceny opotřebení baterie bude cena cyklu nabití-vybití:

$$\begin{aligned} Sp_{batcyklu} &= \int_t^{t+1} \left| \frac{d}{dt} b_\tau \right| d\tau, \\ cena_{batcyklu} &= \frac{cena_{baterie}}{pocet_cyklu_baterie}. \end{aligned}$$

Kde $pocet_cyklu_baterie$ je parametr vozidla označující životnost baterie jako maximální počet cyklů vyměnění celého náboje baterie [4]. Hodnota $cena_{baterie}$ je cena za výměnu kompletní sady baterií ve vozidle.

[4] Není specifikováno za jakých podmínek se baterie používá. Jedná se tedy o hodnotu pro „průměrné" použití.

4 Predikce externích veličin

Vzhledem k externímu charakteru veličin pd_t, r_t a jejich nezávislosti na ostatních prvcích stavu je možné formulovat zcela nezávislou úlohu simulace dopravní situace před vozidlem. Tato simulace bude také pravděpodobností, např. Monte Carlo. Díky znalosti profilu trasy a GPS souřadnic bude možné získat odhad Pdc v závislosti na ujeté dráze. Pro účely APMV je však třeba tuto veličinu přepočítat do časové oblasti, kde je nutné zahrnout i spotřebu pomocných pohonů. Přepočet na časovou osu bude vyžadovat simulaci povelů od řidiče a simulaci dopravní situace. V této oblasti se dá očekávat přínos učení z dat nasbíraných na provozu. Vzhledem k nezávislosti na ostatních veličinách budeme předpokládat že $P(pd_t, r_t)$ jsou známé hodnoty pro celý horizont.

4.1 Detailní postup simulace trasy

Simulaci trasy je možné provést na základě znalosti mapových podkladů a grafikonu trasy. Základní myšlenka je, že trasa bude rozdělena do logických segmentů: např. úseků mezi zastávkami indexovanými $l \in \{1, \ldots, L\}$. Pro každý úsek určíme sadu parametrů:

- $\overline{v}_l$, průměrnou rychlost na úseku (možné zjistit z grafikonu),
- $\overline{\phi}_l$, průměrné stoupání na úseku (z mapových podkladů),
- d_l, délku úseku (z mapových podkladů),
- z_l, maximální počet mezizastávek (např. na křižovatkách, v kolonách atd., průjezd ostrou zatáčkou)
- b_l, provoz v plně elektrickém režinu (z mapových podkladů a požadavků na čisté zóny).

Pro každý z těchto parametrů zvolíme pravděpodobnostní rozložení, např.:

- Gausovské pro průměrnou rychlost se směrodatnou odchylkou σ_v,
- Gausovské na průměrné stoupání (odchylky simulují drobné změny v hmotnosti autobusu),
- Rovnoměrné na intervalu počet zastávek, tj. mezi 0 a z_l.

Na základě těchto veličin můžeme simulovat N Monte Carlo trajektorií generováním náhodných veličin $v_l^{(n)}, \phi_l^{(n)}, z_l^{(n)}$, $n = 1 \ldots N$.

Softwarové reprezentace trasy je pole (nebo lineární seznam) délky L, kde každý prvek je vektor $[v_l^{(n)}, \phi_l^{(n)}, d_l, z_l^{(n)}, b_l]$

4.2 Převod trasy do časové oblasti

Trasy nasimulované v předchozí části je třeba převést na průběh stavových veličin SOCb a Pdc do časové oblasti. Předpokládáme, že diskretizační interval časové oblasti, Δt, je předem známý.

1. Každý úsek l simulované trasy převedeme na lichoběžníkové profily rozjezd-jízda-brždění. Počet lichoběžníků je dán vygenerovaným počtem zastavení $z_l^{(n)}$, kde předpokládáme, že lichoběžníky jsou stejně široké.

   a) Pro úseky rozjedu a brzdění předpokládáme, že vozidlo využívá maximální moment, tj. maximální Pdc.

   b) Délka rozjezdu, $T_{rozjezd}$ se určí jako čas potřebný k rozjezdu z nuly na rychlost $v_l^{(n)}$ za předpokladu maximálního momentu, průměrné hmotnosti vozidla, a průměrného stoupání $\phi_l^{(n)}$.

   c) Délka brzdění $T_{brždění}$ se určí jako čas potřebný k zastavení z rychlosti $v_l^{(n)}$ na nulu za předpokladu maximálního momentu, průměrné hmotnosti vozidla, a průměrného stoupání $\phi_l^{(n)}$.

   d) Pro rozjezd i brzdění spočteme ujetou dráhu $d_{accel,l}$.

   e) Doba jízdy $T_{jízdy}$ se určí jako doba potřebná k ujetí délky $d_l - d_{accel,l}$ požadovanou rychlostí $v_l^{(n)}$. (Tento postup nesouhlasí se způsobem odhadu průměrné rychlosti z grafikonu. Pokud bude odchylka rozjezdy příliš velká, je třeba zavést kompenzaci). Průměrná Pdc je určena na základě sklonu dráhy $\phi_l^{(n)}$.

   Výsledkem je tedy pro každý úsek lineární seznam délky $3z_l^{(n)}$ o záznamech: $[pd_k, T_k, r_k]$. Vzhledem k tomu, že $z_l^{(n)}$ jsou již známa, je možné tuto parametrizaci uchovávat jako pole nebo lineární seznam délky $3\sum_l z_l^{(n)}$ a tedy indexovat pomocí $k = 1 \ldots 3\sum_l z_l^{(n)}$.

2. Nasimulované průběhy v časové oblasti se převedou do pravidelné časové mřížky:

   a) Pro všechny trajektorie se spočte celková doba jízdy T_{total} pro všechny úseky a určí se její maximum.

   b) Počet diskrétních intervalů se určí jako $t = 1 \ldots T_{total,max}/\Delta t$.

   c) Pro každou trajektorii z kroku 1 projdeme seznam úseků a určíme jakou částí, ΔT, se překrývá s aktuálním časovým intervalem. Součet všech příspěvků $pd_t = \sum pd_k \times \Delta T_k$ kde suma je přes všechny prvky k překrývající se s aktuálním intervalem.

d) Převod r_t z r_k provedeme zaokrouhlením, průměrné hodnoty r_k na intervalu $t \times \Delta t$.

Výsledky uchováváme jako pole vektorů $\{[pd_t, r_t]\}_{n=1}^{N}$. Ty budeme považovat za nezávislé identicky rozdělené realizace $P(pd_t, r_t)$.

5 Algoritmus výpočtu řídícího zásahu

Obecný algoritmus (1) je možné díky speciálním vlastnostem modelu značně zjednodušit. Díky tomu, že předpokládáme splnění zadaného momentu a podmínek APMVrezim na úrovni BPMV, nepotřebujeme v cenové funkci pd_t, r_t. Další zjednodušení je:

$$\begin{aligned} C(S_{t+1}, S_t, a_t) &= C_{us}(\Delta b_{t+1}, pd_{t+1}, a_t) + C_{DG}(g_{t+1}, g_t) + C_B(b_{t+1}), \\ C_{DG}(g_{t+1}, g_t) &= cena_{startDG}(g_{t+1} > g_t), \\ C_B(b_{t+1}) &= cena_{socoutofbounds}(b_{t+1} < b_{min} \text{ or } b_{t+1} > b_{max}). \end{aligned} \tag{12}$$

Zavedeme pomocnou proměnnou :

$$Q(pd_{t+1}, a_t) = \sum_{\Delta b_{t+1},} P(\Delta b_{t+1}|pd_{t+1}, a_t) C(\Delta b_{t+1}, pd_{t+1}, a_t). \tag{13}$$

která má interpretaci jako cenu za provoz vozidla při požadavku pd_{t+1} pro každou z akcí a_t. A pomocnou proměnnou

$$\overline{J}(b_t, a_t) = \sum_{b_{t+1}, pd_{t+1}, r_{t+1},} P(\Delta b_{t+1}|pd_{t+1}, a_t) P(pd_{t+1}, r_{t+1}) \left(J(S_{t+1}) + C_B(b_{t+1})\right) \tag{14}$$

S využitím pomocných veličin (13)–(14) je algoritmus dynamického programování (1) zredukován na:

$$a_t^*(b_t, g_t, r_t) = \begin{cases} \arg\min_{a_t} \left\{ \sum_{pd_{t+1}} P(pd_{t+1}) Q(pd_{t+1}, a_t) + \overline{J}(b_t, a_t) + C_{DG}(a_t, g_t) \right\}, & r_t = 1, \\ 1, & r_t = 2, \\ 6, & r_t = 3, \end{cases} \tag{15}$$

$$J(b_t, g_t) = \sum_{pd_{t+1}} p(pd_{t+1}) Q(pd_{t+1}, a_t^*) + \overline{J}(b_t, a_t(b_t, r_t)) + C_{DG}(a_t^*, g_t), \tag{16}$$

Zjednodušení $J(S_t) = J(b_t, g_t)$ vychází z ekvivalence r_t a g_t.

Výsledná rozhodovací strategie (15) je tedy jednoduchá protože hodnoty $Q()$ jsou konstantní a jediné co, je třeba počítat online je (14). Rekurze cenové funkce startuje od hodnoty

$$J(b_{t+h}) = cena_{el.energie} \times (1 - b_{t+h}) Kapacita_{baterie}. \tag{17}$$

Tato hodnota vychází z předpokladu, že optimalizace končí odstavením vozidla. Cena odstaveného vozidla v dané parametrizaci je daná pouze hodnotou elektrické energie uchovávané v baterii.

6 Rozšíření

Uvedená formulace nabízí široké možnosti rozšíření. Je možné rozšíření dimenze jak stavového tak akčního prostoru ovšem za cenu zvýšení výpočetní náročnosti, ale především simulační náročnosti abychom pokryli všechny možnosti stavů a akcí. V takovém případě by bylo namístě velmi vážit které veličiny přidat.

6.1 Učení za chodu

Jednou z hlavních výhod zvoleného přístupu je, že je možné namísto simulovaných dat použít data reálná a učit pravděpodobnostní model P a cenu C za chodu. K optimálnímu využití je však zapotřebí obou komponent:

Simulace umožňuje simulovat i režimy, které jsou zcela neekonomické a z praktického hlediska možná i nelogické. Tím však získáváme kompletní informaci o celém stavovém prosturu a je pokryta každá možná situace.

Reálná data jsou mnohem věrohodnější než simulace a model značně zpřesní. V případě použití vozidla na jedné trase však hrozí nebezpečí přetrénování, tj. model bude přesný v situacích které má v paměti, ale nepřesný v nových, neznámých situacích.

Způsob kombinace těchto způsobů získání dat je relativně snadný. Namísto statistiky (**??**) použijeme statistiku:

$$n_{\Delta b_{t+1},pd_{t+1},a_t} = n^{(simuloavne)}_{\Delta b_{t+1},pd_{t+1},a_t} + n^{(realne)}_{\Delta b_{t+1},pd_{t+1},a_t}.$$

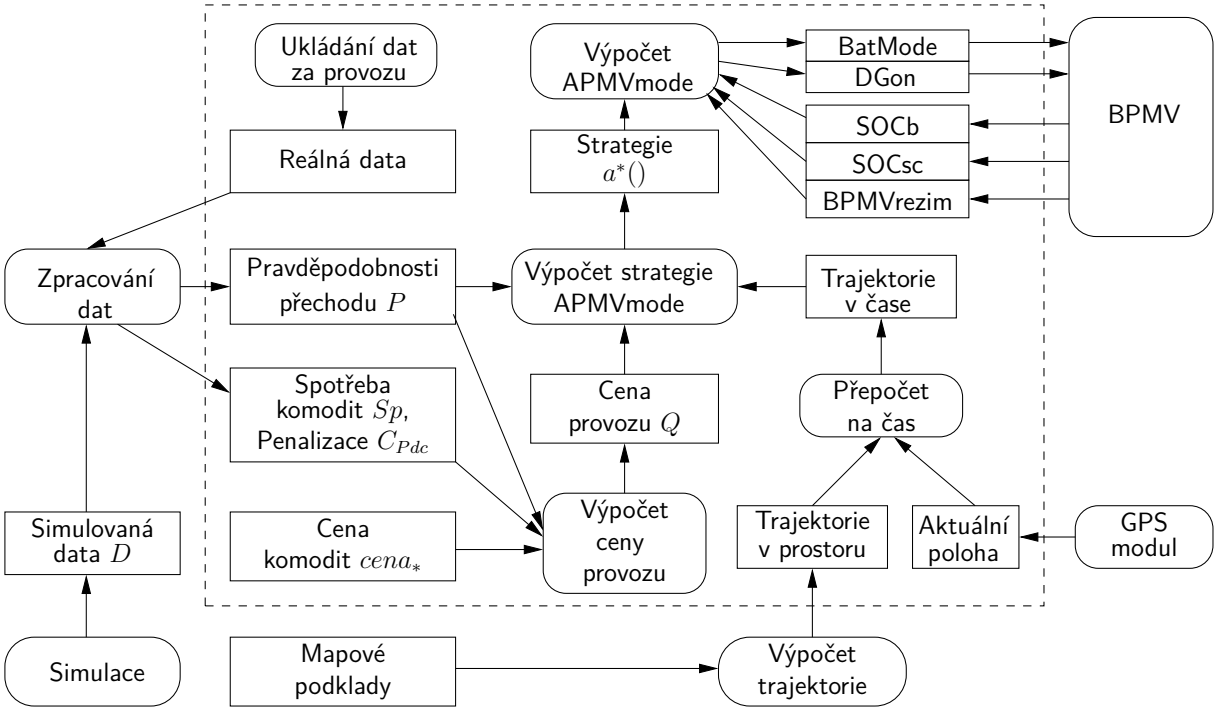
kde je třeba ošetřit kdy se bude statistika sbírat a kdy se přidá do modelu. Základní možnosti jsou:

- statistika se přidává průběžně, $n^{(realne)}_{\Delta b_{t+1},pd_{t+1},a_t}$ je napočteno na cyklickém bufferu předem zvolené délky, přepočet modelu a funkce Q se provádí v diskrétní časový okamžik,
- existuje nadřazený signál, který řídí "učení" APMV, který může být k dispozici jen servisním pracovníkům.
- statistika se přepočítává rekurzivně v každém kroku řízení. Jsou modifikovány jen ty části funkcí, které jsou aktuální.

6.2 Přechod na parametrickou reprezentaci

Hlavním nedostatkem zvolené diskrétní parametrizace je závislost na velkém reprezentativním vzorku dat. V případě, že bude dat příliš málo, mohou být v odhadech funkcí P a C prudké přechody nebo outliery. Toto by bylo možné odstranit přechodem na parametrickou reprezentaci P i C, například gausovské funkce P a kvadratické funkce C. Volba těchto parametrických funkcí by proběhla až po podrobné analýze dostupných dat ze simulace, případně reálných dat.

Hlavní výhodou parametrických reprezentací je možnost výrazného zrychlení výpočtu dynamického programování (1) například převodem na lineární programování nebo lineárně kvadratické.



Obr. 1: Datové-funkční schéma rozložení výpočtu algoritmu APMV

7 Referenční implementace v Matlabu

Algoritmy popsané v kapitolách 3 a 5 jsou implementovány v přiložených *.m souborech. Konkrétně se jedná o soubory:

zpracovani_simulace.m tento soubor sekvenčně načítá výsledky simulace či ostrého provozu algoritmu, ve kterých jsou uloženy veličiny

$$[t, SOC_b, SOC_{sc}, Pdc, Pts, Ppp, APMVrezim, Sp_{nafty}, vybeh]$$

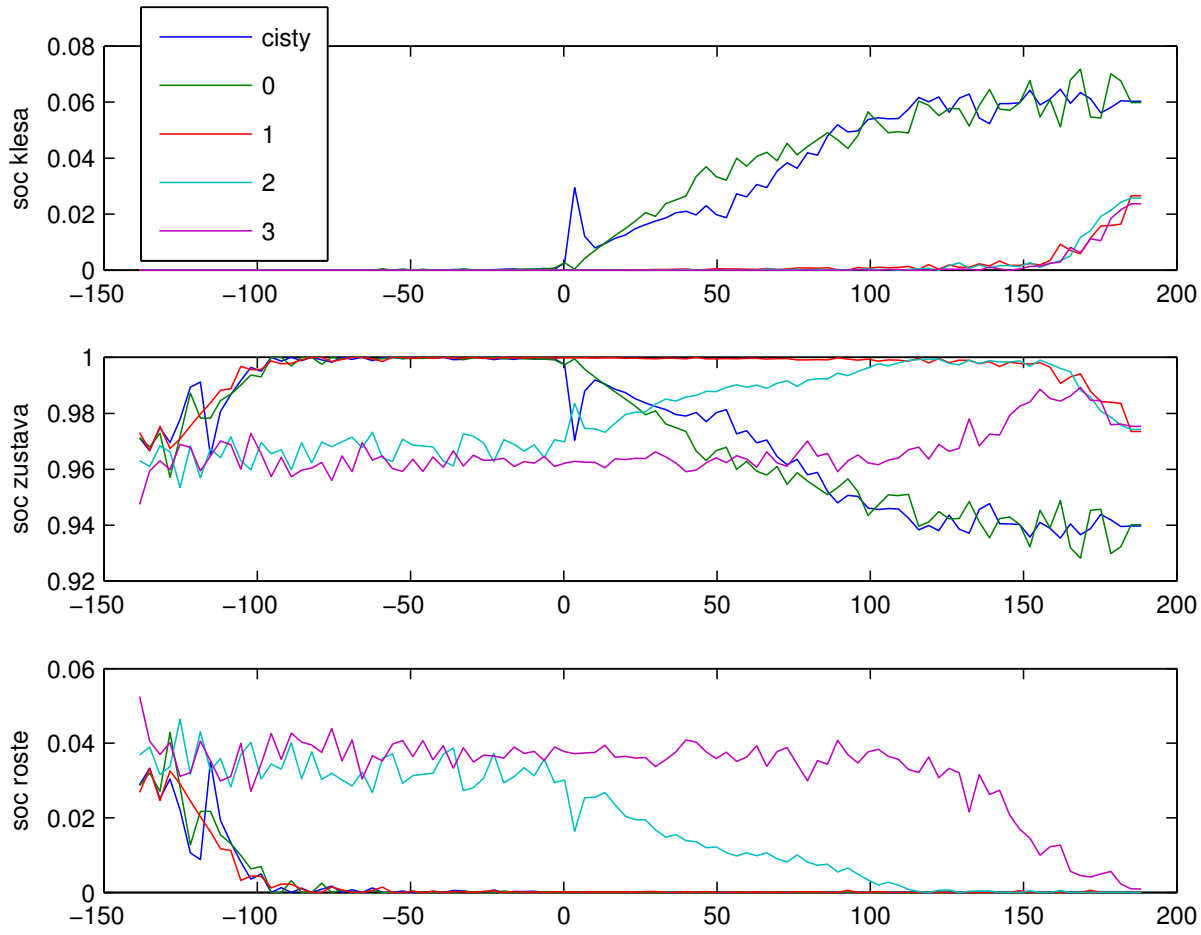
ze kterých napočítává statistiku přechodů SOC (3.1) spotřeby $Sp_{nafty}, Sp_{baterie}, Sp_{elenergie}$ a nesplnění požadavku potřebné pro určení ceny v kapitole 3.2. Tato funkce trvá pro větší množství zpracovávaných dat několik (desítek) minut.

analyza_simulace.m dokončuje výpočet pravděpodobností přechodu (7) a provede součet dílčích cen do jediné (8). Tato funkce je velmi rychlá, protože všechny operace jsou na relativně malých maticích, spočtených funkcí `zpracovani_simulace.m`. Při změně cen komodit (nafty, baterie, el. energie) stačí pouze spustit tuto funkci.

V rámci této funkce také probíhá náhrada chybějících dat. Pokud pro některou kombinaci $[Pdc^*, a^*]$ nebyla nalezena žádná data, najde se nejbližší index Pdc, $Pdc^{\%}$, pro který data jsou. Statistika se zkopíruje, $Stat_P(b^*_{t+1}, b^*_t, a^*) = Stat_P(b^{\%}_{t+1}, b^{\%}_t, a^*)$. Spotřeby

Sp_*se nahradí lineární interpolací Spotřeb v bodě $Pdc^{\%}$ a $Pdc = 0$.

online_apmv.m provede vlastní výpočet algoritmu z kapitoly 5.



Obr. 2: Pravděpodobnosti přechodu mezi jednotlivými stavy modelu pro různé režimy APMV určené simulací. Hodnoty odpovídají pro diskretizaci SOCb na 100 dílků. **Nahoře** Pravděpodobnost poklesu SOCb o jeden dílek. **Uprostřed**: pravděpodobnost setrvání SOCb ve stejném dílku. **Dole**: pravděpodobnost nárůstu SOCb o jeden dílek.

8 Výsledky simulací

8.1 Zpracování simulovaných dat

Jednou z hlavních výhod diskrétní parametrizace pravděpodobnostních přechodů a cenových funkcí je jejich flexibilita, neboť mohou reprezentovat velmi složité funkce. Cílem detailních simulací bylo určit především tvary těchto funkcí. Typický tvar přechodových pravděpodobností P je na obrázku 2. Výsledné funkce přechodových pravděpodobností odpovídají očekávání, tj. že pravděpodobnost nárůstu SOCb je nejvyšší pro nabíjecí režimy. Jedinou výrazně nehladkou změnou je chování AMPVrezim=0 a 1 pro Pdc=5kW. Tato špička je způsobena chováním vozidla v zastávce. Např. v čistém režimu se v zastávce nabíjí SC z baterie a dojde ke zvýšenému odběru.

Typický tvar spotřeb komodit a výsledné cenové funkce je na obrázku 3. Spotřeby komodit

odpovídají očekáváním, jedinou anomálií zůstává stejně jako v případě pravděpodobnosti přechodu chování pro Pdc=5kW. Kvůli chybějícím datům jsou v křivkách komodit vidět přerušení. Tato přerušení se při přepočtu na celkovou cenu mění na nuly. Je to sice nesprávné z hlediska ceny, ale výpočet optimální akce to nijak neovlivní, protože odpovídající pravděpodobnost takovéto ceny je také nulová.

Z výsledků je také vidět, že v oblastech Pdc v nichž fungují některé režimy shodně nastává přiblížení jejich pravděpodobností a spotřeb komodit. Nikdy však nedojde k uplné shodě díky fluktuacím v realizacích Monte Carlo simulací. Toto může mít významné důsledky i když pouze lokálního charakteru. Viz další experimenty.

Nahrazení tabulek cen a pravděpodobností parametrickými křivkami (kapitola 6.2) je možné, avšak vzhledem k tvarům křivek pravděpodobností a cen by bylo obtížné nalézt jedinou křivku a bylo by třeba nahrazovat je po částech spojitými křivkami, např. spline.

8.2 Vliv cen komodit na výsledky optimalizace

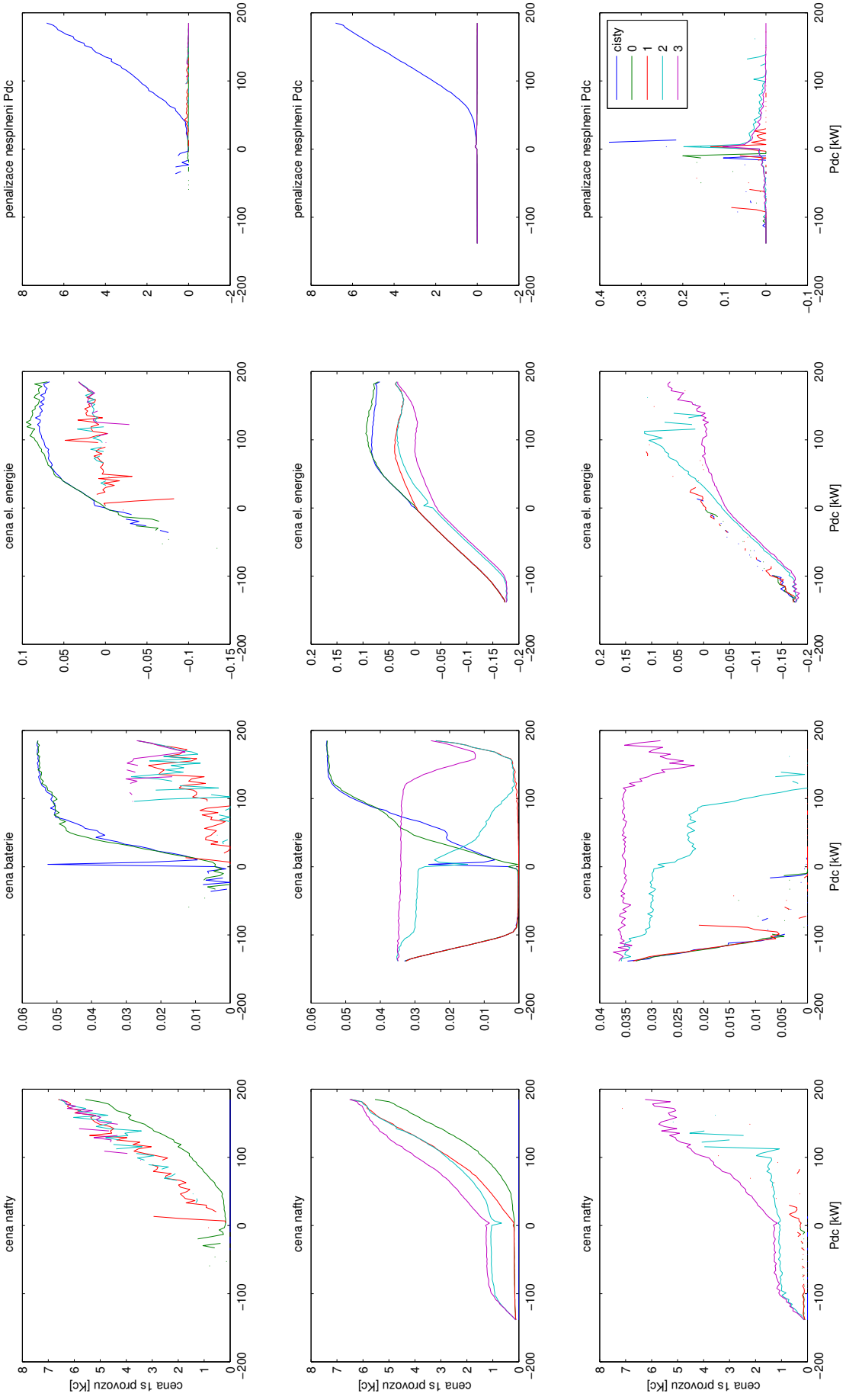
Ceny komodit mají rozhodující vliv na výsledek pro testovanou sekvenci rozjezdů a brzdění. Očekávané ceny komodit jsou: $cena_{nafty} = 30$Kč/l, $cena_{elenergie} = 5$Kč/kWh, $cena_{baterie}$ =1000000 Kč/kus, při uvažované životnosti 10 tisíc cyklů nabití a vybití. Cena nesplnění požadovaného výkonu je empiricky zvolena $cena_{Pdc} = 1/20000$ Kč/kW. Očekávaná cena provozu, Q (13), pro tyto hodnoty je zobrazena na obrázku 4. Z obrázku jasně vyplývá, že nejlevnějším režimem je pro Pdc<50kW je čistý pojezd. Pro požadovaný výkon nad 50kW se stává čistý pojezd nevýhodným, především díky vysoké penalizaci za nesplnění požadavku Pdc.

Při této konfiguraci je tedy evidentní výsledek optimalizace na horizontu: pokud je dostatečná kapacita baterií, použij režim APMVmode=1. Pouze pokud hrozí vybití baterie, použij nabíjecí režim. Pro takový případ jsou optimální režimy provozu pro simulovanou trajektorii ilustrovány na obrázku 5.

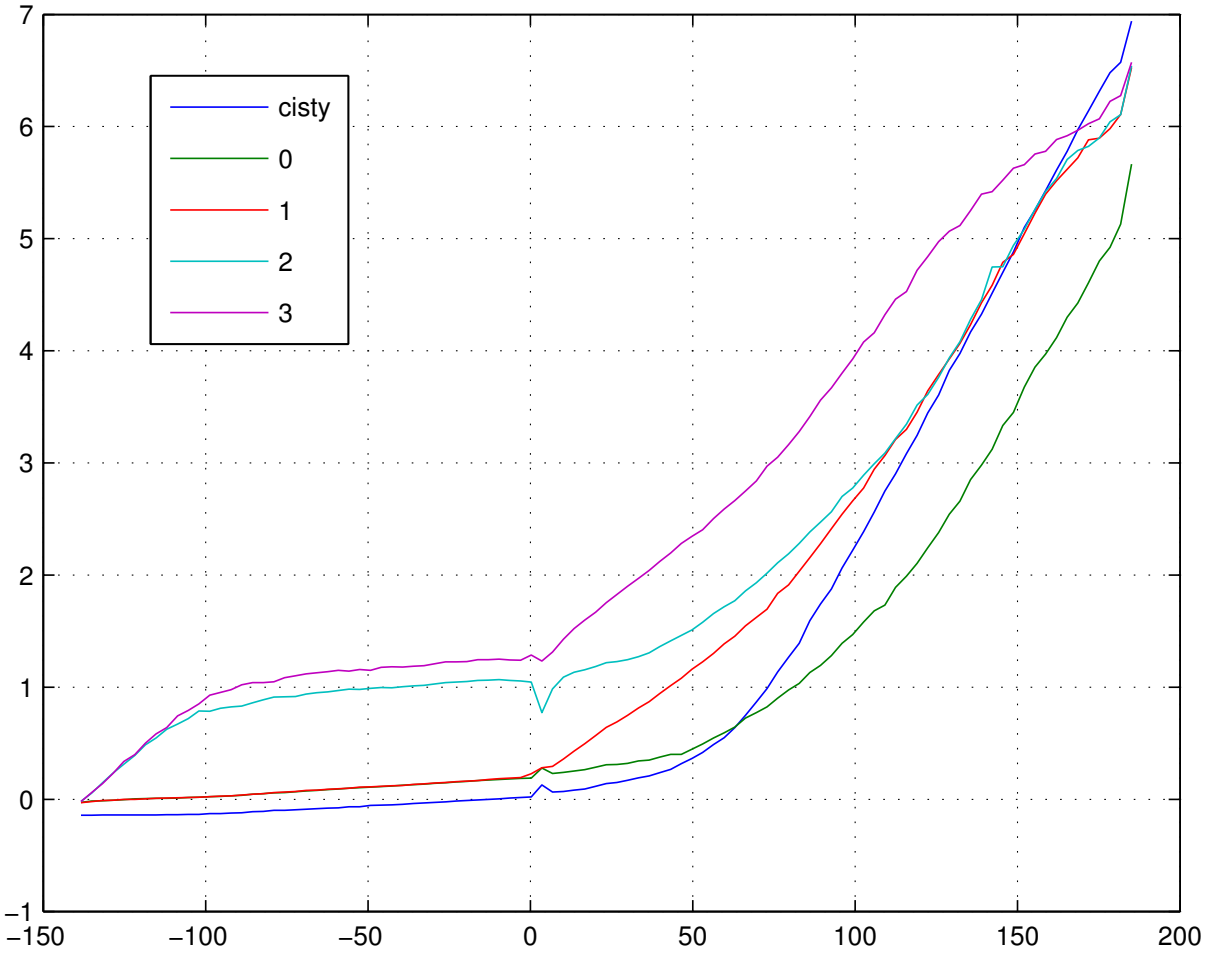
V uvažované této konfiguraci je nejdražší komoditou nafta. Při změně dominantní komodity se změní i výběr optimální strategie, která bude pro jiné dominantní komodity následující:

el.energie výsledkem je volba maximálního dobíjení pro všechny hodnoty SOCb s vyjímkou několika málo procent okolo SOCb=100%,

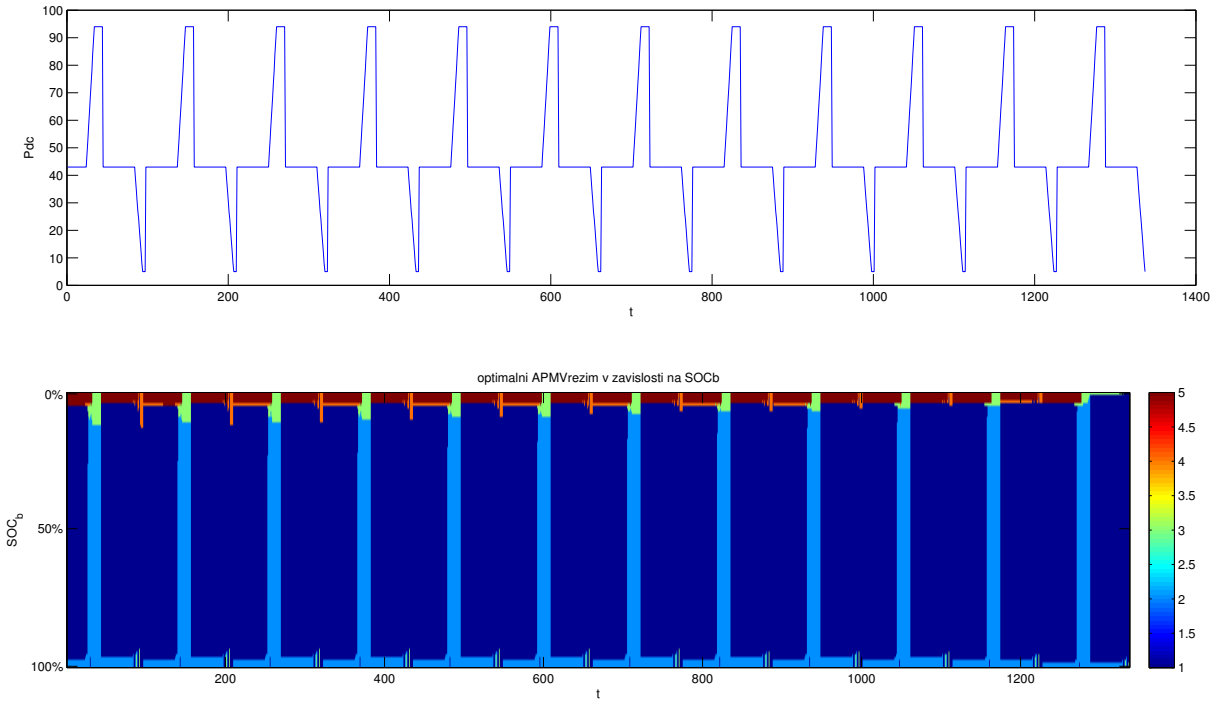
baterie výsledkem je volba APMVrezim=3 pro všechny hodnoty SOCb s vyjímkou několika málo procent okolo SOCb=100% a SOCb=0%,



Obr. 3: Typické spotřeby komodit a C_{Pdc} pro různé stavy a režimy. Po řádcích jsou spotřeby a ceny pro pokles (nahoře), setrvání (uprostřed), nárůst SOCb o jeden dílek (dole). Každý režim je zakreslen jinou barvou, viz legenda vlevo dole.



Obr. 4: Očekávaná cena provozu vozidla po dobu 1s.



Obr. 5: Výsledek optimalizace pro triviální trajektorii Pdc pro ceny: nafty 30kč/litr, baterie 30 jednotek, el.energie 5Kč/kWh. **Nahoře**: simulovaná trajektorie Pdc. **Dole**: závislost optimálního režimu na SOCb v čase.

Procenta bezpečnostního pásma kolem 0 a 100% je možné ovlivnit volbou penalizace za překročení těchto limitů, $cena_{soucoutofbounds}$.

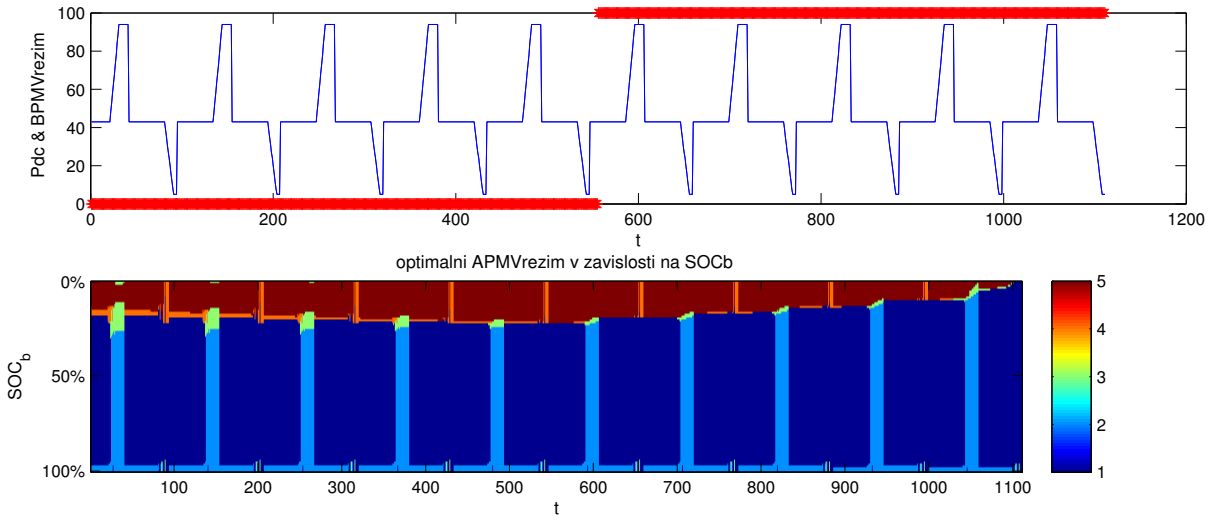
8.3 Průjezd čistou oblastí

Pokud je dostatečně dopředu známo, že bude v určité části trasy průjezd čistou oblastí, je možné přidat tuto informaci do predikovaných trajektorií horizontu a provést optimalizaci. Výsledky takového pokusu jsou na obrázku 6. Podle očekávání si algoritmus v předstihu před příjezdem do čisté oblasti zajistí minimální nabití baterie, což je zřejmé z preference nabíjecích režimů pro nízké hodnoty SOCb.

8.4 Vyšší pravděpodobnost čistého pojezdu

Další možností jak je možné pracovat s predikcí BPMVrezimu je uvažovat nenulovou pravděpodobnost, že do něj bude třeba přepnout. Taková situace se může vyskytnout pokud je detekováno nestandardní chování DG a není jasné jak dlouho jej bude možné provozovat.

Tato situace byla simulována generováním dvou trajektorií lišících se hodnotou proměnné BPMVrezim. Tedy předpokládáme 50% možnost výpadku DG. Z výsledku optimalizace na obrázku



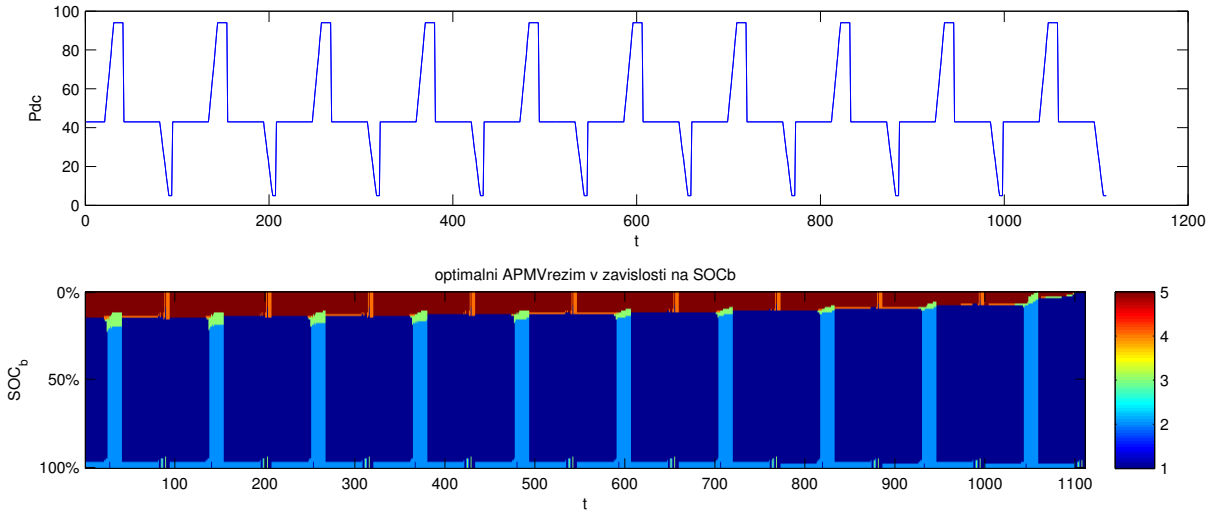
Obr. 6: Optimalizace průjezdu čistou oblastí v druhé polovině simulovaného horizontu (naznačeno červenou čarou v horní polovině grafu).

7 je zřejmé, že se hranice nabíjení opět posunula do vyšších hodnot v porovnání s obrázkem 5.

8.5 Vliv jemnosti diskretizace

Ve výše prováděných experimentech byla uvažovaná diskretizace veličin $\Delta b_t \in \{-1, 0, 1\}\%$. To je relativně hrubé dělení a může způsobit nepřesnosti. Opakování předchozích experimentů pro jiné diskretizace vedlo k různým výsledkům. Pro pochopení tohoto jevu byla provedena podrobnější analýza pravděpodobnostních přechodů s jemnějším dělením: $\Delta b_t \in \{-1, -0.76, -0.5, \ldots, 1\}\%$. Pravděpodobnosti přechodu jsou na obrázku 8 , tmavší barva značí vyšší pravděpodobnost přechodu. V oblastech, kde je přechod do jiného stavu téměř jistý je přechod vyznačen černou barvou. Oblasti značené šedou barvou vyznačují vyšší nejistotu chování systému. Tyto oblasti jsou především v režimech APMVmode=1 a 2. V těchto režimech hraje velkou roli nabití SC. Při nabitém SC k poklesu SOCb nedochází, při vybitém je tento pokles velmi rychlý. Tyto dvě křivky jsou v jemném modelu jasně zřetelné.

Je zřejmé, že aproximací tohoto "hysterezního" chování hrubým dělením dojde k určité chybě. Obecně platí, že pro jemnější dělení dochází ke snížení hranice přechodu do nabíjecích režimů. Z tohoto hlediska se jeví použití hrubé diskretizace jako dostatečně bezpečné.



Obr. 7: Výsledek optimalizace pro triviální trajektorii Pdc s 50% pravděpodobností přepnutí do BPMVrezimu pro ceny: nafty 30kč/litr, baterie 30 jednotek, el.energie 2Kč/kWh. **Nahoře**: simulovaná trajektorie Pdc. **Dole**: závislost optimálního režimu na SOCb v čase.

8.6 Vícenásobný horizont

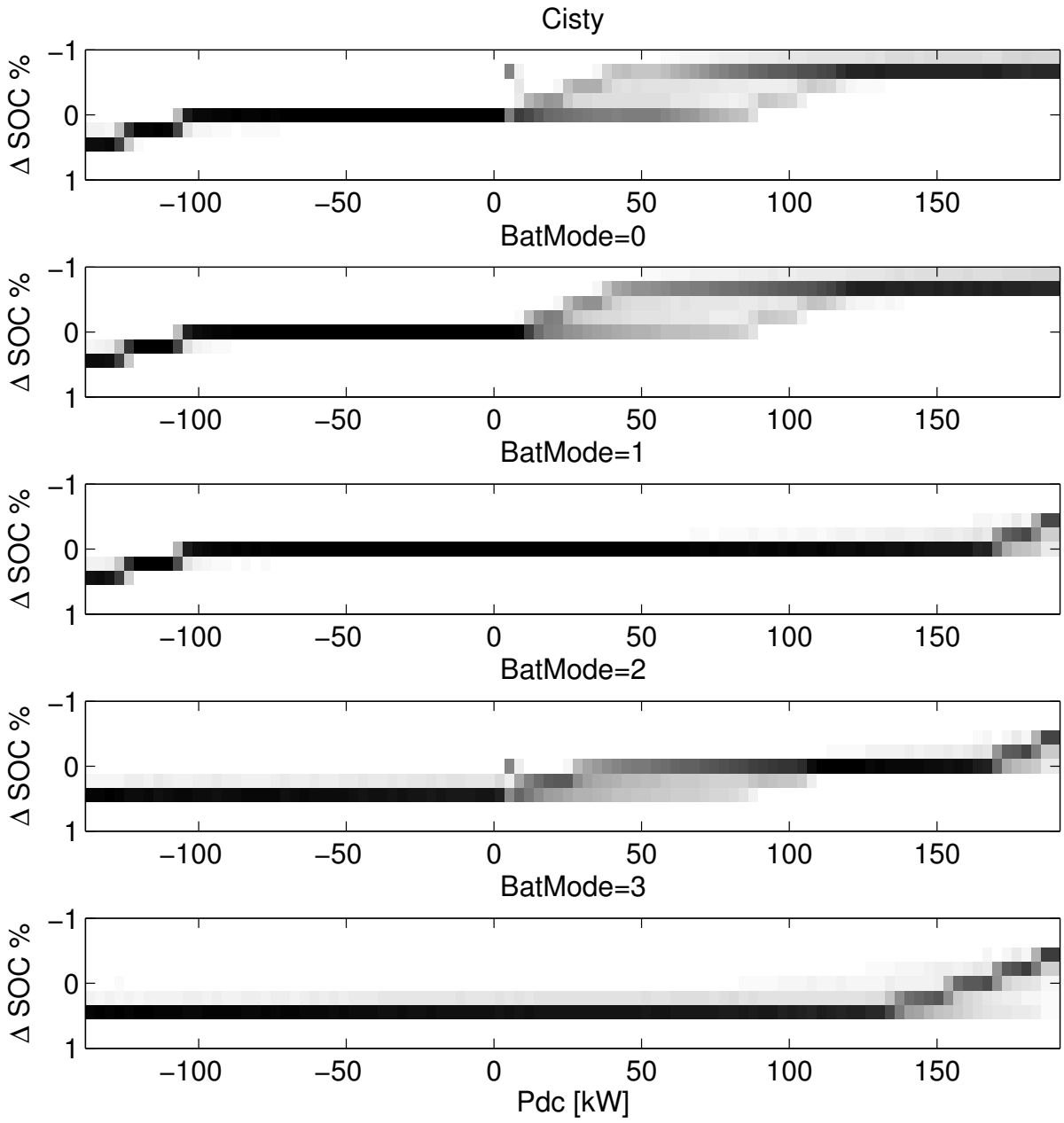
Pro dlouhé horizonty (cca $h > 1000$) by přímý výpočet (1) trval dlouho. Jako výpočetní zjednodušení se nabízí možnost provést odhad parametrů pro větší periodu vzorkování, například Δt_2 =1min. Pro tuto periodu vzorkování získáme Q_2 a P_2. Výpočet dynamického programování bude stejný jako pro Δt. Předpočtená trajektorie z kapitoly 4 se však bude diskretizovat $2\times$, nejprve proběhne optimalizace na minutovém horizontu a její J_2 se použije jako počáteční podmínka pro optimalizaci na vteřinovém horizontu.

Optimalizace experimentu z obrázku 5 je zopakována pro vícenásobný horizont a výsledky jsou zobrazeny na obrázku . Výsledky mají stejný charakter jako na obrázku 5, který můžeme interpretovat jako 20ti násobné opakování vteřinového horizontu.

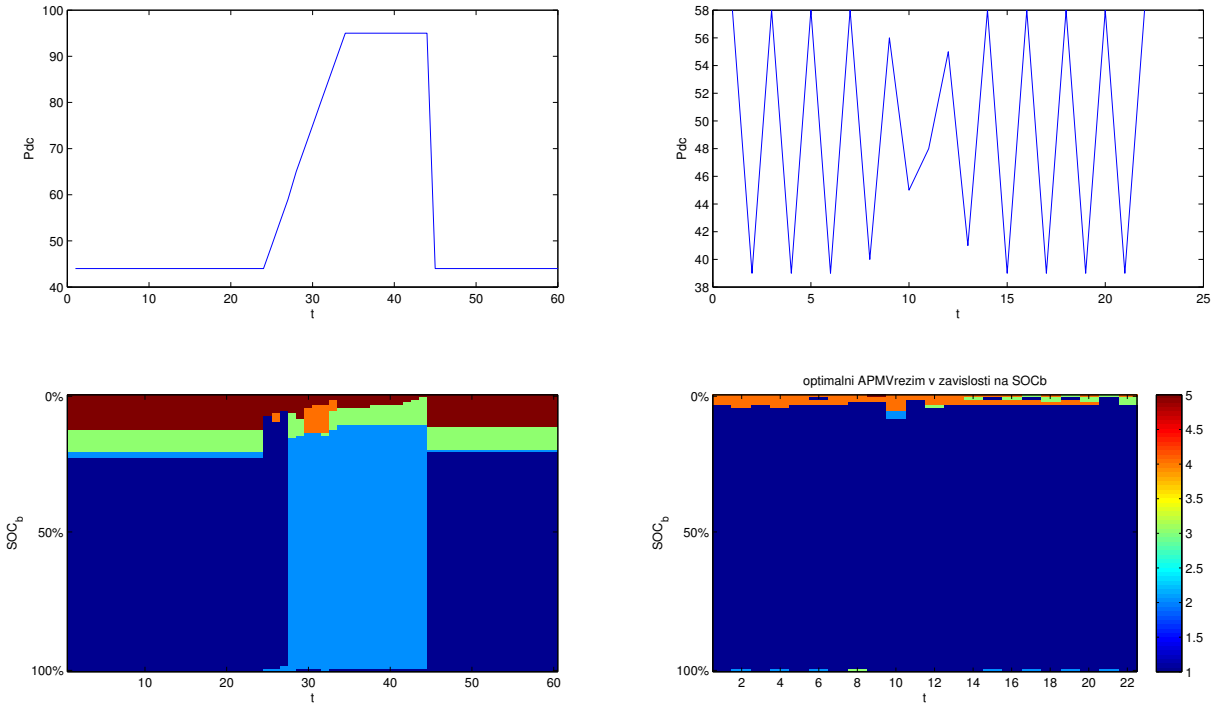
8.7 Experiment s "reálnými" daty

Pro srovnání chování experimentu s BPMV byla provedena simulace trajektorie 16 pro BPMV a APMV. Výsledky jsou na obrázku 10. Z výsledků je zřejmé, že APMV se snaží využít v maximální míře levnou energii z baterie, a do nabíjecích režimů přepíná pouze pokud je potřeba vyšší výkon. **??**.

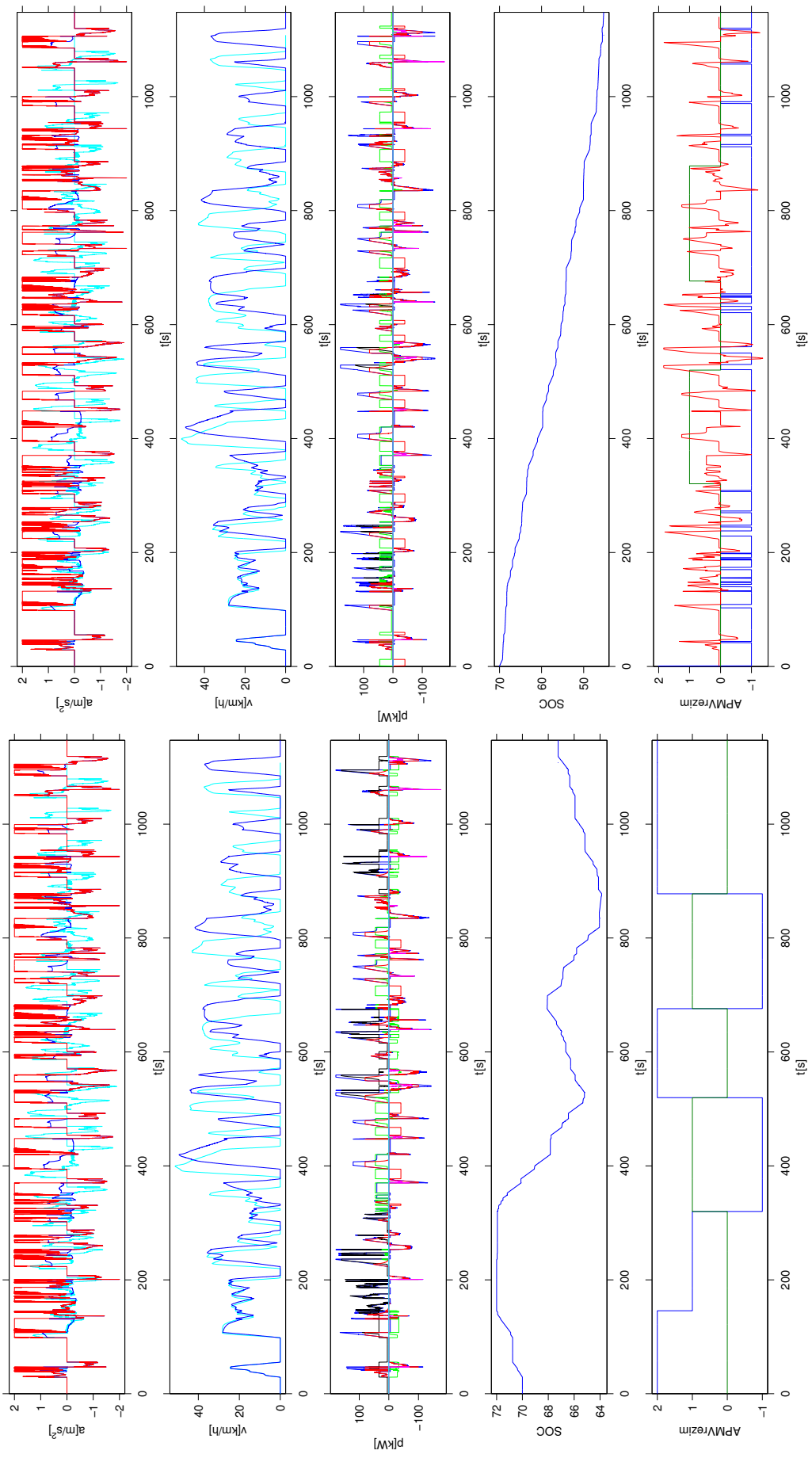
Hypotéza 2. *Pokud se ceny komodit nebudou měnit dramaticky, je možné z výsledků Q určit další režim BPMV. Pro hodnoty z obrázku (4) by bylo možné rozšířit BatMode 0 o vypínání DG, papříklad algoritmus 11.*



Obr. 8: Pravděpodobnosti přechodu pro jemné dělení Δb_t.



Obr. 9: Rozložení výpočtu na dva horizonty: vteřinový a minutový. **Vlevo:** Detail Pdc a optimálních akcí na vteřinovém horizontu. **Vpravo**: Průměrné minutové Pdc a optimální nastavení na minutovém horizontu.



Obr. 10: Srovnání APMV a BPMV na trase 16.

```
If DGon
    If Pdc<45kW
        If SOCsc>90%
            DGoff;
        else
            DobijejSC;
else
    If Pdc>45kW
        If SOCsc<20%
            DGon;
```

Obr. 11: Návrh úpravy BPMV režimu BatMode 0.

9 Závěr

Pokročilé metody řízení spotřeby vozidla (APMV) mají za cíl snížit náklady na provoz vozidla oproti jednoduchým strategiím BPMV. Dodatečnou informací, kterou má APMV oproti BPMV je pravděpodobnostní předpověď budoucí trajektorie vozidla. Díky této předpovědi je možné predikovat budoucí spotřebu energie pohonnou jednotkou vozidla a zvolit optimální využití disponibilních zdrojů energie.

Zajištění základní funkčnosti vozidla je garantováno BPMV, které již optimalizuje snadno predikovatelné jevy. APMV tedy dodatečně optimalizuje pouze jevy stochastické s dlouhodobými následky. Díky tomu je možné optimalizovat například spotřebu diesel generátoru při volnoběhu nebo opotřebení baterie při nadbytečných přesunech náboje mezi baterií a superkapacitory. Objem energie spotřebované v těchto dějích je však mnohem menší než energie spotřebovaná hlavním trakčním pohonem. Vzhledem k tomu lze očekávat od implementace algoritmů APMV popsaných v této zprávě relativně malé (cca jednoprocentní) zlepšení účinnosti pohonné jednotky i malé dopady na životnost baterií.

S ohledem na rychlou homologaci vozidla je struktura APMV volena tak, aby kaskádně navazovala na BPMV přesně definovaným interfacem (zajištění separátní testovatelnosti modulů). Do budoucna je možné uvažovat složitější strukturu APMV, která by zahrnula i optimalizaci dějů řízených na úrovni BPMV. To by však přineslo řádově vyšší složitost algoritmů a zvýšené nároky na výpočetní výkon.

Vzhledem k výše uvedenému relativně malému prostoru na zlepšení chování pohonné jednotky je třeba, aby všechny části zvoleného modelu (tj. jak pravděpodobnostní model vozidla, tak predikce budoucí trajektorie) byly určeny s maximální přesností. K tomu jsou nutná především reálná data, která budou naměřena během probíhajícího zkušebního provozu vozidla. Tato data pomohou především k lepšímu odhadu parametrů modelu. Algoritmy výpočtu uvedené v této zprávě nebude potřeba měnit.

Literatura

[1] R. Bellman. *Dynamic Programming*. Princeton University Press, New York, 1957.

[2] Martin Janda, Zdeněk Peroutka, Jan Žák, and Jan Holeček. Basic power management vozidla. Technical Report 22160 - 001 - 2011, RICE FEL, 2011.

[3] W.B. Powell. *Approximate Dynamic Programming: Solving the curses of dimensionality*, volume 703. Wiley-Blackwell, 2007.

Seznam obrázků

1 Datové-funkční schéma rozložení výpočtu algoritmu APMV 19

2 Pravděpodobnosti přechodu mezi jednotlivými stavy modelu pro různé režimy APMV určené simulací. Hodnoty odpovídají pro diskretizaci SOCb na 100 dílků. **Nahoře** Pravděpodobnost poklesu SOCb o jeden dílek. **Uprostřed**: pravděpodobnost setrvání SOCb ve stejném dílku. **Dole**: pravděpodobnost nárůstu SOCb o jeden dílek. 21

3 Typické spotřeby komodit a C_{Pdc} pro různé stavy a režimy. Po řádcích jsou spotřeby a ceny pro pokles (nahoře), setrvání (uprostřed), nárůst SOCb o jeden dílek (dole). Každý režim je zakreslen jinou barvou, viz legenda vlevo dole. . . . 23

4 Očekávaná cena provozu vozidla po dobu 1s. 24

5 Výsledek optimalizace pro triviální trajektorii Pdc pro ceny: nafty 30kč/litr, baterie 30 jednotek, el.energie 5Kč/kWh. **Nahoře**: simulovaná trajektorie Pdc. **Dole**: závislost optimálního režimu na SOCb v čase. 25

6 Optimalizace průjezdu čistou oblastí v druhé polovině simulovaného horizontu (naznačeno červenou čarou v horní polovině grafu). 26

7 Výsledek optimalizace pro triviální trajektorii Pdc s 50% pravděpodobností přepnutí do BPMVrezimu pro ceny: nafty 30kč/litr, baterie 30 jednotek, el.energie 2Kč/kWh. **Nahoře**: simulovaná trajektorie Pdc. **Dole**: závislost optimálního režimu na SOCb v čase. 27

8 Pravděpodobnosti přechodu pro jemné dělení Δb_t. 28

9 Rozložení výpočtu na dva horizonty: vteřinový a minutový. **Vlevo:** Detail Pdc a optimálních akcí na vteřinovém horizontu. **Vpravo**: Průměrné minutové Pdc a optimální nastavení na minutovém horizontu. 29

10 Srovnání APMV a BPMV na trase 16. 30

11 Návrh úpravy BPMV režimu BatMode 0. 31

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum, Jméno/Odd.
1	všechny	První verze	29.12.2010 VŠ / RICE
2	3,8	Oprava výpočtu SOCsc a předělání simulací. Odstranění anomálie na čistém pojezdu pro Pdc=5kW.	5.1.2011 VŠ / RICE