

SCIENTIFIC PAPERS
OF THE UNIVERSITY OF PARDUBICE
Series B
The Jan Perner Transport Faculty
4 (1998)

OPTIMALIZACE PERIODICKÉ DOPRAVNÍ NABÍDKY

Anna ČERNÁ

Fakulta managementu, VŠE Jindřichův Hradec

1. ÚVOD

Taktový, neboli periodický režim nabídky v hromadné osobní dopravě, je charakterizován těmito vlastnostmi:

1. Základním organizačním elementem nabídky je linka, jež je zadána:
 - trasou,
 - množinou spojů.
2. Všechny spoje dané linky projíždějí celou trasou linky z jedné konečné stanice do druhé.
3. V uvažovaném období dne (například v ranní špičce, nebo v dopoledním sedle apod.) jsou následné intervaly spojů stejné. Navíc se většinou vyžaduje, aby následný byl dělitelem nebo násobkem čísla 60, tedy například 6, 15, 20, 60, 120 a někdy se dokonce žádá, aby byl v celých minutách.

Vyžadují-li praktické potřeby, aby na trase A--B--C jezdily některé spoje z A do C, kdežto jiné jen z A do B, uvažujeme místo jedné dvě linky A--C a A--B. Tedy pravidlo 2. nutno dodržovat striktně.

Trochu jinak je tomu s pravidlem 3., a to nejméně ze dvou důvodů. První důvod, pokud se trvá na celých minutách, spočívá v tom, že někdy je poměr nabídky a poptávky na lince nevhodný pro striktní uplatnění tohoto pravidla. Představme si například, že kapacita autobusu je 75 cestujících a poptávka je 500 míst v jednom směru za hodinu. Kdybychom chtěli striktně dodržet pravidlo 3., interval 10 min. by nám nestačil, protože to by byla nabídka jen 450 míst za hodinu. Dalším menším celočíselným dělitelem čísla 60 je 6, což by ale představovalo 10 spojů a tedy 750 míst za hodinu, tj. o 50% víc, než je zapotřebí. Zvolíme

proto 7 spojů neboli plně postačujících 515 míst za hodinu. Žel, odpovídající interval by pak byl 8 min. 34,3 sek., což není možno v praxi dodržovat. Proto se zvolí opakující se posloupnost intervalů 9, 8, 9, 9, 8, 9, 8, t.zn. v jedné hodině $4 \times 9 + 3 \times 8$ minut. Intervaly tedy nejsou stejné, ale se liší o 1, přičemž uvedená posloupnost představuje nejpravidelnější možnou konfiguraci ve smyslu teorie periodických rozvrhů.

Druhým důvodem, který si vynucuje upustit od striktního dodržování pravidla 3. je potřeba koordinace spojů dvou nebo více linek na společných (peážních) úsecích. Drobná poznámka je uvedena v části 6.1.

2. VÝBĚR PODSÍTĚ

Bez ohledu na rozlohu území, o kterého dopravní obsluze uvažujeme, je vždy disponibilní dopravní síť mnohem větší, než je ta její část (podsíť), na které je možné provozovat dopravu v periodickém režimu. Proto je výběr této podsítě prvním krokem přípravy zavedení tohoto režimu.

Předpokladem pro provozování taktové dopravy na některém úseku sítě je dostatečná poptávka vzhledem k nejmenší možné kapacitě kompletu a nejdelšímu přípustnému následnému intervalu spojů. Označme

- l - nejdelší přípustný následný interval (min.),
- k - nejmenší možná kapacita spoje,
- p - nejmenší přípustné procento (maximálního) obsazení spoje,
- $q(J)$ - nejmenší poptávaný počet míst pro cestující na úseku za interval délky J .

Hodnota l se obvykle stanovuje následovně:

- $l = 15 \text{ min.}$ pro špičkový provoz MHD ve vnitřních městech a na předměstích s výškovou zástavbou,
- $l = 30 \text{ min.}$ pro sedlový provoz MHD ve vnitřních městech a na předměstích s výškovou zástavbou,
- $l = 60 \text{ min.}$ pro špičkový provoz příměstské dopravy a MHD na málo lidnatých předměstích,
- $l = 120 \text{ min.}$ pro sedlový provoz příměstské dopravy a MHD na málo lidnatých předměstích, jakož i pro dálkovou dopravu.

Hodnota p se obvykle pohybuje v rozmezích 50-75%.

Veličinu $q(J)$ nutno chápat takto: Není-li uvnitř úseku žádná zastávka spojů (tzn. spoje zastavují jen v počátečním a koncovém uzlu úseku), pak se vybere ten interval délky J minut, ve kterém je nejmenší poptávané množství míst pro cestující přes úsek. Toto množství se pak označí $q(J)$. Jsou-li i uvnitř úseku zastávky, rozdělíme si úsek na podúseky mezi sousedními zastávkami. Pak výše uvedeným způsobem určíme hodnotu $q(J)$ pro každý podúsek zvlášť a posléze za hodnotu $q(J)$ pro celý úsek vezmeme největší z hodnot pro jednotlivé úseky. Pro určování hodnoty $q(J)$ je nejjednodušší ta situace, když uvnitř úseku nejsou zastávky, poptávka je konstantní a nemá výkyvy v čase. Pak je $q(J) = qJ/60$, kde q je hodinová intenzita cestujících přes úsek. Někdy, žel, poptávka konstantní není a například pro $J = 10 \text{ min}$ je poptávaný počet míst pro cestující v čase 6.30--6.40 i mnohonásobně vyšší, než v čase 6.00--6.10 a právě ta menší hodnota z nich je rozhodující pro to, jestli i pro ni má smysl uvažovat o pravidelných intervalech mezi spoji (aby v tu dobu nejzdila vozidla málo obsazena).

O vhodnosti zavedení periodického režimu pak rozhodneme tak, že pro daný úsek a dané období dne srovnáme hodnoty $q(l)$ a $p.k.$ Je-li první alespoň rovna druhé, pak jej zavést můžeme, jinak by jeho zavedení bylo velmi neefektivní.

2.1 Možnost zavedení jednotného intervalu na vybrané podsíti

Jak uvidíme později, periodický režim, zejména pokud jde o koordinaci spojů, se snadněji zavádí v případě, že na každé lince je stejný následný interval spojů. Úvaha o tom, zdali je jej možné zavést, anebo ne, je podobná předešlé. Místo hodnoty $q(J)$ tu však zavádíme hodnotu $q(L, t, J)$, a to ne pro úsek, ale pro linku L . Uvažujeme jen cestující, kteří tuto linku budou používat. Pak si pro každý interval $(t, t+J)$ na lince najdeme mezizastávkový úsek, kterým projíždí v tomto intervalu největší počet cestujících a tento počet si označíme $q(L, t, J)$. Má-li nějaký interval I sloužit jako jednotný pro všechny linky, musí pro každou linku L a každý čas t existovat taková možná kapacita spoje $k(L, t)$, aby

$$pk(L, t) < q(L, t, I) < k(L, t),$$

neboli aby po zavedení jednotného intervalu I pro každou linku L a v každém čase t byla na nejzatíženějším úseku linky L vytižena kapacita spojů na p až 100 procent.

Vidíme, že rozhodovat se o zavedení jednotného intervalu není možné současně s výběrem podsítě pro taktový (periodický) režim dopravní obsluhy, ale až potom, kdy bude známa soustava linek, o níž budeme mluvit v následující části.

3. VÝBĚR LINEK A JEJICH VÝKONNOSTI

Zde se jedná o problém známý a v dopravní vědě široce studovaný z mnoha hledisek. My se budeme držet přístupu, popsaného v článku [1].

Předpokládejme, že pro dané období dne už je vybrána podsít, na které se bude provozovat doprava v taktovém režimu a že pro každý úsek této podsítě je zjištěno poptávané množství míst pro cestující v zatíženějším směru úseku za hodinu. Úlohou je navrhnout v jistém smyslu optimální soustavu linek pro provozování taktové dopravy. Výsledná soustava se tedy předpokládá jako výstup určité optimalizační úlohy, jež by, pochopitelně, měla být určena určitými omezujícími podmínkami a účelovými funkcemi.

3.1 Omezující podmínky

V různých formulacích výše uvedeného optimalizačního problému se vyskytují různé omezující podmínky, ale ty, se kterými budeme pracovat my, se užívají téměř vždy:

3.1.1 Dostatečnost nabídky pro uspokojení poptávky.

3.1.2 Kapacitní dostatečnost parku vozidel.

3.1.3 Obsluha úseku jen tím typem vozidel, pro který je uzpůsoben (pokud se v systému uvažuje více typů vozidel, nebo dokonce více dopravních systémů).

K tomu, abychom mohli přesněji formulovat tato omezení a později i účelové funkce, zavedeme si některá označení:

S - vybraná podsít, $S=(U, H)$ kde U, H jsou množiny uzlů, úseků,

h - úsek vybrané podsítě,

$m(h)$ - poptávané množství míst pro cestující v zatíženějším směru úseku h za hodinu,

a - počet linek, které připadají v úvahu pro provoz na S ,

- L_j - i-tá linka,
- o_j - minimální přípustná doba oběhu vozidla (resp.kompletu) na i-té lince (včetně pobytu na konečných),
- s_j - pořadové číslo systému, resp. typu vozidla, použitelného na i-té lince (je-li na S používán jen jeden systém nebo typ, pak mají všechny linky $s_j = 1$),
- c_j - počet míst pro cestující ve všech vozidlech j-tého systému (typu),
- H_j - množina úseků, jimiž prochází i-tá linka,
- x_j - počet míst pro cestující na i-té lince v jednom směru za hodinu,
- y - zaručená poměrná rezerva míst pro cestující na S, tj. minimální poměr poptávaného a nabízeného počtu míst pro cestující na úsecích sítě S.

Potom můžeme naše podmínky přeformulovat nasledovně:

3.1.1.: Pro každý úsek $h \in H$ musí platit $\sum x_j \geq y \cdot m(h)$, kde sumace se týká těch i , pro které $h \in H_i$.

3.1.2.: Pro každý systém, resp. typ vozidla j musí platit $\sum x_i \cdot o_j / 60 \leq c_j$, kde sumace se týká těch i , pro které $s_j = j$.

3.1.3.: Pro každý úsek $h \in H_j$ musí platit, že úsek h může být obsluhován systémem (typem vozidla) s_j .

3.2 Účelová funkce

I když v nadpisu této části je jednotné číslo, měli bychom vlastně použít čísla množného, a to hned ze dvou důvodů. Jednak proto, že v různých optimalizačních modelech se ve světové literatuře uvádějí různé účelové funkce a pak i proto, že mnohé modely samy jsou už ve své podstatě multikriteriálními. Kritéria, se kterými se setkáváme, možno nejdříve rozdělit na dvě základní skupiny, z nichž první vyjadřuje zájmy cestujících a druhá dopravců. Do první skupiny možno zařadit například:

- K1 - přepravní (ne)komfort, jenž se obvykle vyjadřuje stupněm naplněnosti vozidel,
- K2 - (průměrná) přepravní rychlost,
- K3 - průměrný počet přestupů,

kdežto do druhé skupiny patří zejména:

- K4 - náklady dopravce.

V našem modelu se snažíme vyhnout multikriteriálnosti. Zkušenosti totiž ukazují, že při jejím využití se téměř vždy narazí na dodatečnou potřebu „kvalifikovaného“, ale, žel, subjektivního, posouzení modelem nerozlišitelných, ale přitom výrazně různých řešení. Za základ volíme K1 s tou nadějí, že jsou-li přepraveni všichni cestující a přitom je obsazenost vozidel nejmenší, je i celkový pobyt cestujících ve vozidlech nejkratší a tím i přeprava nejrychlejší a nejlevnější. Kritérium K3 se nám však do modelu nepodařilo přímo zařadit a proto předpokládáme opakované použití modelu s dodatečnými podmínkami, snižujícími průměrný počet přestupů.

3.2.1. Účelová funkce, vyjadřující kritérium K1 je velmi jednoduchá: $Z = y$. Čím větší je poměrná rezerva kapacity vůči poptávce, tím komfortnější cestování.

3.3 Optimalizační problém

Problém, jenž je jádrem našeho modelu, umožňujícího optimalizovat sestavu linek s taktovým režimem, vyžaduje tyto výchozí údaje:

- V1. Poptávaný počet $m(h)$ míst pro cestující za hodinu v silnějším směru úseku h , a to pro každý úsek $h \in H$.
- V2. Popis disponibilního parku vozidel, včetně rozlišení různých systémů resp. vzájemně nezastupitelných typů vozidel.
- V3. Vybranou podsít $S = (U, H)$, včetně upřesnění pro každý úsek $h \in H$ systémů (typů vozidel), jimiž může být tento úsek obsluhován.
- V4. Výchozí „širší“ množinu přípustných linek $\{L_1, \dots, L_n\}$, pro každou linku L_j s udáním hodnot o_j, s_j a množiny H_j .

S údaji, zahrnutými pod V1 bývá obvykle ta komplikace, že málokterý zadavatel je má v požadované podobě. Dosti často se musí předem vypočítat použitím běžných metod „traffic assignmentu“ z O-D-matic, vyjadřujících buď meziokrskové, anebo mezizastávkové proudy.

Na základě údajů V1-V4 už možno sestavit nerovnice z 3.1.1 (těch je tolik, kolik je prvků v množině H) a 3.1.2 (pro každý systém resp. typ vozidla jednu). Spolu s účelovou funkcí z 3.2.1 pak tvoří úlohu lineárního programování, jejíž řešení obvykle obsahuje velkou většinu hodnot $x_j = 0$, což znamená, že v optimálním řešení bude mít i -tá linka přidělenou nulovou kapacitu a tedy nebude vybrána do výsledné „užší“ sestavy linek, jež pak budou provozovány. Je-li naopak některé $x_j > 0$, znamená to, že i -tá linka byla vybrána a že její výkonnost, vyjádřená počtem míst pro cestující v jednom směru za hodinu má být x_j , což znamená, že přidělená kapacita (= počet míst ve vozidlech) i -té linky je $x_j \cdot o_j / 60$.

Model a metoda na optimalizaci sestavy linek a jejich výkonnosti byla ověřena na datech MHD v Pardubicích. Dosáhla uspokojivé výsledky.

4. NASAZOVÁNÍ VOZIDEL

Výsledkem optimalizačních výpočtů, popsanych v předešlé části, jsou čísla, vyjadřující ideální celkovou kapacitu vozidel, přidělených na jednotlivé linky. V praxi se však tyto ideální hodnoty nedají dosáhnout, protože z dostupných vozidel se nedají sestavit skupiny se součty kapacit přesně rovnými ideálním. Proto se postupuje tak, že se zkoušejí různé „ručně“ vytvořené sestavy blízké ideálním a vždy se vypočítá jejich účelová funkce. Nejlepší sestava se potom vezme jako finální řešení.

Vzhledem k tomu, že jde pouze o metodu heuristickou, zkoumají se i možnosti jak tuto úlohu přímo zabudovat do optimalizačního modelu z předešlé části.

Přidělením vozidel na jednotlivé linky možno považovat nasazení vozidel za plně vyřešeno jen v případě konstantní poptávky a homogenního parku - tam se vytvoří komplety se stejnou kapacitou.

I když park zůstane homogenním, ale poptávka je kolísavá, nutno pro jednotlivé spoje přidělit často různé počty základních vozidlových jednotek. Optimalizaci jejich nasazení na

spoje lze pak řešit pomocí inovovaného souboru optimalizačních metod KASTOR (= Komunikativny Automatizovaný Systém Tvorby Obehových Rozvrhov), vytvorený Doc. St. Palúchem ze Žilinskej univerzity [3]. Tentýž systém umožňuje i optimalizaci nasazení vozidel o různé kapacitě na spoje při kolísavé poptávce.

V této souvislosti nutno poznamenat, že i v případě autobusové dopravy s jedním typem autobusů je výhodnější zachovat konstantní interval mezi spoji i při kolísavé poptávce s tím, že se na vytíženější spoje přidělí posilové autobusy, než narušovat pravidelnost nabídky zkracováním následných intervalů.

5. TVORBA JÍZDNÍCH ŘÁDŮ

Máme-li přidělená vozidla na jednotlivé linky tak, aby se zachoval taktový režim ve formě konstantních (nebo skoro konstantních, jak jsme si jejich občasnou nutnost naznačili v úvodu) intervalů, je problém tvorby jízdního řádu na jedné lince prakticky triviální. Stejně intervaly, anebo konfigurace skoro stejných intervalů se opakují po celé období dne, v němž nabídka zůstává neměnná.

Trochu složitější se může zdát řešení návaznosti jízdních řádů na rozhraní období. Ale to je opravdu jen zdání. Poslední odchod podle „starého“ intervalu se stane prvním odchodem podle „nového“.

Situaci nekomplikuje ani požadavek postupného (hladkého) přechodu na změněnou délku intervalu. Nechť například minimální oběžná doba vozidla je 96 min. a k dosažení špičkového intervalu 12 min. je na lince nasazeno 8 autobusů, pro 20 min. v sedle je to 5 vozidel. Předpokládejme, že poslední „starý“ odjezd z jedné konečné je 7:48 a další odjezdy „hladkého“ přechodu jsou 8:02, 8:18, 8:36, 8:56, ... dále pravidelně po 20 min. Předpokládejme hypoteticky, že by „starý“ režim byl pokračoval i po 7:48 s odjezdy 8:00, 8:12, 8:24, 8:36, ... atd. Pak by vozidlo, „určené“ pro 8:00 jelo 8:02, podobně 8:18 místo 8:12; to co mělo jet 8:24 by odjelo do garáže, odjezd 8:36 by se zachoval, místo 8:48 by bylo 8:56, vozidlo, co mělo jet 9:00 by jelo do garáže, pak místo 8:12 by bylo 8:16 atd. Toto byl příklad, kde vozidla odjížděla do garáže jen z jedné konečné, podobně by se však dal řešit i odjezd do garáže z obou konečných (např. dvě z jedné a jedno z druhé konečné).

6. KOORDINACE SPOJŮ

Při řešení dopravní obsluhy území v taktovém režimu se setkáváme se dvěma problémy koordinace časové polohy spojů. 1. Koordinace na souběžných (peážních) úsecích více linek, kdy jde o to, aby intervaly na společném úseku byly co nejpravidelnější. 2. Koordinace v uzlech má zase za cíl minimalizovat časové ztráty cestujících při přestupech. Oba tyto případy mají společné to, že o koordinaci má smysl uvažovat jen tehdy, je-li střední chyba dodržování jízdního řádu výrazně menší, než je délka intervalu u každé linky o jejíž koordinaci se uvažuje.

6.1 Koordinace na společných úsecích

Tento problém patří k nejlépe prostudovaným v celé dopravní vědě, publikovaly se o něm desítky článků v odborných časopisech, a proto nemá smysl se jím detailně zabývat. Optimalizační modely a metody jsou v případě potřeby k dispozici. Mnoho je o nich napsáno i v [2].

6.2 Koordinace v uzlech

Naopak v otázce koordinace spojů v uzlech je uveřejněných poměrně málo prací. Rozpracováváme proto vlastní model a dvoustupňovou optimalizační metodu, v níž první stupeň spočívá v generování topologicky ekvivalentních konfigurací odjezdů a druhý stupeň stanovuje optimální offsety jednotlivých linek.

Poznámka: Článek vznikl za podpory grantu GAČR 103/97/0825.

Lektoroval: Doc. Ing. Jaroslav Vonka, CSc.

Předloženo v listopadu 1998.

Literatura

- [1] Černý, J.-Černá, A.: Linear optimization of urban bus routes and frequencies. Czechoslovak J. of Op. Research 1(1992), No.3, 207-217.
- [2] Černý, J.-Klůvánek, P.: Základy matematickej teórie dopravy. VEDA, Bratislava, 1991.
- [3] Palúch, S.: Systém KASTOR na optimalizáciu obehových rozvrhov. Zborník prác VÚD Žilina, č. 54, (1988).

Resumé

OPTIMALIZACE PERIODICKÉ DOPRAVNÍ NABÍDKY

Anna ČERNÁ

Článek se zabývá různými aspekty optimalizace periodické dopravní nabídky: výběrem podsítě pro periodickou nabídku, optimalizací linek a jejich frekvencí, jízdními řády a nasazováním vozidel.

Summary

OPTIMIZATION OF PERIODIC TRANSPORT SUPPLY

Anna ČERNÁ

The paper discusses different aspects of periodic transport supply optimization: choice of subnetwork for periodic supply, routing and frequencing, time-tabling and vehicle scheduling.

Zusammenfassung

DIE OPTIMISIERUNG DES PERIODISCHEN TRANSPORTANGEBOTES

Anna ČERNÁ

Der Beitrag löst die Aspekte in der Optimierung des periodischen Transportangebotes: die Selektion für das periodische Angebot, Trasse und Frequenz, Fahrpläne und Planungfahrzeuge.