Jan Černý, Pavel Drdla

Modely přizpůsobení taktového režimu výkyvům poptávky

Klíčová slova: *doprava, železniční doprava, taktová doprava, jízdní řád, pásmový jízdní řád, interval dopravy, optimalizace, matematické modely.*

1. Úvod

Taktovým režimem nazýváme takový režim fungování dopravního systému, ve kterém jednotlivé jízdy (spoje) po dané trase se po celý den, anebo po významnou část dne, pravidelně opakují s periodou, jež je obvykle 1 hodina, nebo její dvojnásobek (2 hod.), nebo její zlomek (např. 30, 20, 15, 12, 10 min.). Často se s ním setkáváme u MHD, u osobní železniční dopravy aj.

Výhody taktového režimu jsou zejména v tom, že

- zákazník si snadno zapamatuje časovou polohu spojů, což pro něj znamená i zvýšení kvality služby,
- dopravce snadněji zorganizuje zajištění provozu (oběhy vozidel, turnusy osádek, přestupní návaznosti apod.).

Tyto přednosti způsobují, že se taktový režim rozšiřuje na další a další systémy, nebo jejich části. Např. na síti Nizozemských železnic prakticky na všech tratích se jezdí v taktu (obvykle 60, nebo 30 min.) a i u nás se tento režim používá na některých úsecích. Podobně je tomu na linkách MHD ve větších městech.

Taktový režim nemá však jen samé výhody. Za hlavní nevýhodu lze považovat to, že přepravní poptávka není stále a všude stejná. **Výkyvy poptávky** můžeme pozorovat jak **v čase** (kolem 7.10 hod. přijíždí ke škole méně žáků, jako kolem 7.45), tak i **podél trasy** (cestujících na spoji směrem od centra ubývá) a **ve zpětném směru** (ráno jede více cestujících do města, odpoledne naopak).

Prof. RNDr. Jan Černý, DrSc., Dr.h.c. (*1935) získal titul „doktor věd“ v r. 1984 v oboru Dopravní technika na Vysoké škole dopravy a spojů v Žilině a tamtéž byl jmenován profesorem organizace a řízení komunikačních systémů v roce 1991. Od r. 1993 doposud je zaměstnán na Fakultě managementu VŠE jako profesor. Je odborníkem na obecnou teorii systémů, přenosové systémy, operační výzkum a management dopravních systémů.

Ing. Pavel Drdla, Ph.D. (*1972) získal titul „doktor“ v r. 1998 v oboru Technologie a management v dopravě a telekomunikacích. Od r. 1999 doposud je zaměstnán na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice jako odborný asistent. Je odborníkem na osobní dopravu a periodické jízdní řády.

Pro **eliminaci** těchto **výkyvů** lze využít různá opatření, jež si v dalším popíšeme podrobněji. Charakter těchto opatření závisí od mnoha okolností. Jednou z nejdůležitějších je, zda v celém uvažovaném systému se dodržuje

- **jednotný interval** I na všech úsecích a směrech
- **polojednotný interval** T, společný pro všechny směry a úseky, přičemž na konkrétním úseku u a směru s platí, že $T = n_{us}I_{us}$, kde I_{us} je interval mezi spoji na úseku u ve směru s a n_{us} je počet spojů za dobu T na tomtéž úseku a směru.

Tab. 1. Vztah dvou individuálních intervalů k polojednotnému

I_1												
30											60	
20										***60***	60	
15									***60***	30	60	
12								***60***	***60***	***60***	60	
10							***60***	***30***	20	30	60	
6						***60***	12	***30***	***60***	30	60	
5					30	10	***60***	15	20	30	60	
4				20	12	***20***	12	***60***	20	***60***	60	
3			***12***	***15***	6	***30***	12	15	***60***	30	60	
2		***6***	4	***10***	6	10	12	***30***	20	30	60	
1	2	3	4	5	6	10	12	15	20	30	60	
	2	3	4	5	6	10	12	15	20	30	60	I_2

Pro ilustraci si můžeme uvést vztah délky polojednotného intervalu T k intervalům I_{us}, pokud by pro posledně jmenované připadaly v úvahu jen dvě možnosti I_1 a I_2, obě dělící číslo 60 (tab. 1).

Dále je důležité vědět, zda v systému působí (kapacitně) **homogenní** nebo **heterogenní** park vozidel, přesněji řečeno, základních dopravních jednotek a dále, zda jsou tyto jednotky spojitelné do jedné.

2. Případ nestejně vytížených směrů a homogenního parku

2A) Předpokládejme, že v systému je stanoven **jednotný interval** I a že na daném úseku u nejprve v jedné části období (např. v ranní špičce) je k obsluze jednoho směru zapotřebí na jeden spoj $m + k$ základních jednotek a ve druhém m základních jednotek, což se později změní na podobnou situaci s vyměněnými směry. Pak máme k dispozici tyto možnosti řešení:

2A1) V obou směrech jezdí soupravy (skupiny) o $m + k$ jednotkách.

2A2) V "slabším" směru jsou provozovány soupravy o m jednotkách, v silnějším (v ranní špičce do města, nebo centra) o $m + k$ jednotkách a na konečné (pásmové) stanici se odstavují, aby se odstavily, až zase (odpoledne) budou provozovány v opačném směru.

2A3) V "slabším" směru jsou provozovány soupravy o m jednotkách, v silnějším o $m + k$ jednotkách, přičemž k jednotek se vrací nejlevnější trasou zpět.

Dlužno poznamenat, že je-li r počet souprav, potřebných k obsluze těchto spojů, je počet jednotek, potřebných pro řešení 2A1 roven $r(m + k)$.

Je-li dále q počet párů spojů o nestejném počtu jednotek a mezi údobími špiček je určité údobí sedla, kdy jezdí méně jednotek, pak pro řešení 2A2 potřebujeme kromě $r(m + k)$ ještě dalších qk jednotek a odstavné místo (parkoviště) pro ně.

Může vzniknout otázka, co myslíme slovem “**souprava**”. U kolejové dopravy je to jasné, ale co to znamená u autobusové dopravy? Je to skupina za sebou jedoucích vozidel (kmenové + posily).

Dále můžeme poznamenat, že lze kombinovat řešení 2A1 s 2A2, případně 2A3 s 2A2 – část nadbytečných jednotek se odstaví, část “pendluje” resp. vrací se “krátkou cestou”.

Předpokládáme-li že park vozidel je daný a jedná se o jeho co nejlepší využití, pak je nejvýhodnější 2A2. Vztah 2A1 a 2A3 záleží na tom, zda “krátká cesta” je výrazně levnější, než původní trasa.

2B) Připouští-li se v systému i **polojednotný interval**, pak možno použít kteroukoli z možností 2A1-2A3. Pokud je budeme aplikovat na autobusovou dopravu, objevuje se této souvislosti následující problém:

Problém: Posilové spoje nebo kratší interval? Odpověď na tuto otázku připouští obě možnosti:

- Místo posilových spojů raději zkrátit interval. Tato možnost je vhodná tehdy, když je poptávka stabilní a nehrozí, že by spoje někdy jezdily prázdné.
- V opačném případě (pokud interval není příliš dlouhý) je lepší zavést posilové spoje, jejichž existence není fixována v jízdním řádu a umožňuje dopravci reagovat na snížení poptávky zkrácením, nebo vynecháním posilového spoje.

Kromě možností 2A1-2A3 se pro případ 2B) nabízí ještě následující možnost:

2B1) Zvolit na silnějším i slabším směru intervaly takové délky, aby je bylo možno provozovat soupravami o stejném počtu jednotek, přičemž “přebytečné” jednotky by se vracely po nejrychlejší trase zpět (spojené do takových souprav, aby to bylo z provozního hlediska co nejvýhodnější. Při stanovení délek intervalů a souprav se uplatňují zejména tato hlediska:

- ekonomické, když vedení soupravy z několika jednotek je levnější, než samostatná jízda jednotlivých jednotek,
- využití vozidel, aby se nestalo, že pobyty na konečných budou procentuálně příliš velké,
- propustnosti komunikace, když tato nemusí být schopna pojmout jakékoli množství samostatných spojů
- kvality přepravy, když ve většině případů čím kratší interval, tím kvalitnější obsluha.

3. Případ nestejně vytížených směrů a heterogenního parku

I v případě heterogenního parku je možné uvažovat o řešeních typu 2A1-2A3 a 2B1, jsou tu však “pestřejší” možnosti v sestavování souprav z různých (přesněji různě kapacitních) základních jednotek. Nutno přitom počítat s tím, že zejména u kolejové dopravy (kde je pomalejší obměna vozidel) mohou být velké diference v provozních nákladech ne plně odpovídající poměru kapacit. Naopak v autobusové dopravě lze v našich podmínkách zhruba počítat s tím, že uvažujeme-li kloubové autobusy pro cca 120 cestujících (stojících a sedících dohromady), standardní pro cca 80, midi pro cca 40 a mini pro cca 20 cestujících, jsou jejich kilometrické náklady v poměru zhruba 1,1 : 1,0 : 0,7 : 0,5 (tzv. pravidlo odmocniny: náklady jsou v poměru druhých odmocnin kapacit). Pak kromě požadavku dostatečné kapacity souprav přichází požadavek, aby “dražší” jednotky jezdily méně, než “levnější”.

4. Případ nestejně vytížených úseků ve stejném směru

V této části se budeme zabývat nejčastější nerovnoměrností vytížení spojů na různých úsecích jejich trasy. Budeme uvažovat trasu ze stanice A přes stanici B do stanice C, přičemž úsek AB má poptávku cestujících vyšší, než BC a tedy, pokud má být na celé trase stejný interval mezi spoji, je nutné buď

a) ve stanici B ve směru do C zkracovat a ve směru do A prodlužovat soupravy, anebo

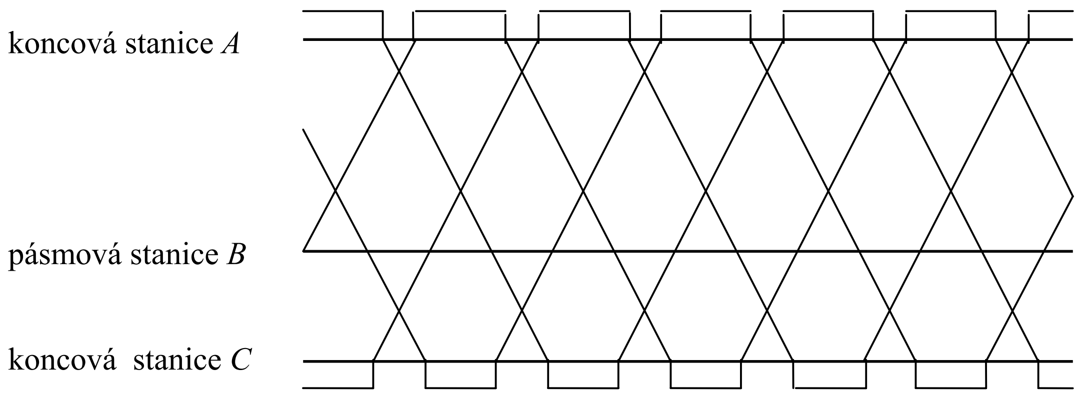
b) se smířit s tím, že na úseku *BC* se budou provozovat soupravy zbytečně velké.

V dalším textu si podrobněji popíšeme první možnost, využívající pásmové rozlišení provozu.

S **pásmovým jízdním řádem** jako prostředkem pro eliminaci výkyvů přepravní poptávky v jednotlivých úsecích dopravních linií je možno se v praxi setkat často. Tento nástroj organizace dopravy často využívá různou velikost taktových intervalů, zohledňující právě vzpomínané odchylky v přepravních potřebách cestujících na trase a především na jejich jednotlivých úsecích (pásmech).

Obtížnější je ale situace, kdy je vyžadováno zachování velikostí stávajících taktových intervalů, které zpravidla jsou stejné po celé dopravní linii. Jedná se o dosti obtížný úkol, který je vhodné řešit ad-hoc ke konkrétnímu případu, protože není možno teoreticky postihnout všechny situace, k nimž může v praktickém provozu dojít.

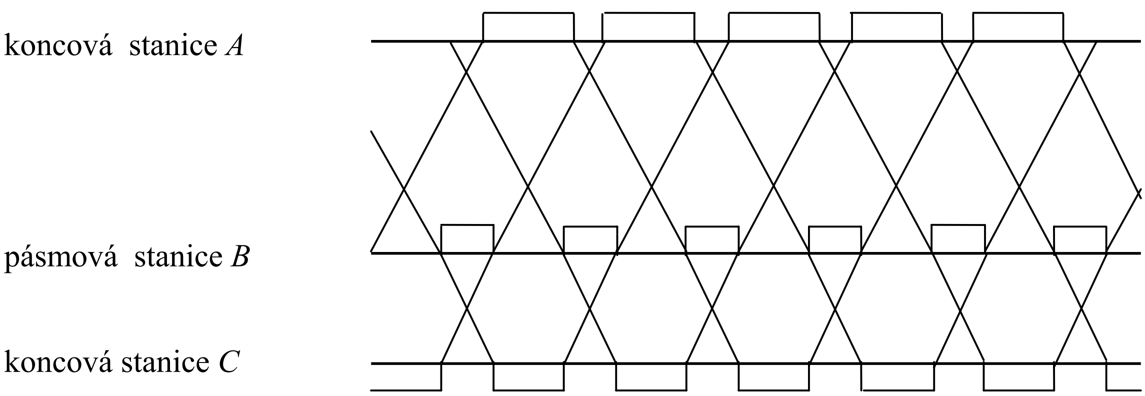
Jako nejvhodnější řešení této úlohy je změna kapacity dopravních prostředků na jednotlivých úsecích. Pokud se vyjde tedy ze situace, kdy je kladen důraz na zachování stejné velikosti taktového intervalu na celé trase, lze toto znázornit na následujícím příkladě. Nejdříve si pro srovnání ukážeme řešení typu b) – zachování souprav na celé trase (obr. 1)



Obr. 1: Režim provozu stejných souprav na celé trase

Zde se skutečně jedná o společný interval pro všechny nasazované / provozované soupravy, navíc je na obrázku pro názornost naznačen oběh dopravních prostředků ve vztahu ke koncovým stanicím.

Naopak na obr. 2 vidíme situaci, při které část soupravy se obrací ve stanici *B* a jen méně kapacitní zbytek pokračuje do *A*.



Obr. 2: Pásmový režim na trase *AB* se znázorněním oběhu částí souprav

V případě, že se jedná o taktový jízdní řád zabezpečovaný autobusovými spoji, tak jako příklad může sloužit situace, kdy v pásmu si silnější poptávkou po přepravě jsou v rámci jednoho spoje provozovány například 2 nebo 3 autobusy, ve druhém pásmu potom pouze jeden autobus (jako kmenový dopravní prostředek spoje). Posilové dopravní prostředky by v tomto případě končily svoji jízdu právě v pásmové stanici a vracely by se zpět v rámci následujícího spoje opačného směru. Opět jsou v obrázku znázorněny návaznosti v rámci oběhů dopravních prostředků.

V okamžiku, kdy se ale jedná o taktový jízdní řád zabezpečovaný vlakovými spoji, je situace složitější, než je tomu u autobusů. Na zřetel se zde musí vzít odlišnosti a specifické zvláštnosti železničního provozu, jako je například provoz na jednokolejné trati, přivěšování a odvěšování vozového parku, změna směru jízdy apod. Při zohlednění situace z předcházejícího obrázku bude muset v pásmové stanici docházet k přivěšování a odvěšování částí souprav, čímž dojde k úspoře jeho počtu a zároveň i spotřebované energie pro jízdu, na druhé straně ale bude docházet ke zvýšené manipulaci s vlivem na růst nákladů na provozní zaměstnance a obsazování zhlaví.

Zjednodušeným matematickým modelem je možno celý problém popsat následujícím způsobem:

Nechť

K – počet spojů daného směru v pásmu za stanovené časové období (obvykle 60 minut)

Q_1 – průměrné přepravní požadavky na jeden spoj “silnějšího” pásma, zvětšené o zálohu z nepravidelností,

Q_2 – průměrné přepravní požadavky na jeden spoj “slabšího” pásma, zvětšené o zálohu z nepravidelností,

n_i – počet jednotek (vozidel, vozů) v rámci jednoho spoje (i=1 znamená silnější, i=2 slabší pásmo)

q – kapacita jednotky

Pak musí platit, že n_i je nejmenší přirozené číslo, splňující nerovnost $qn_i \geq Q_i$. Dlužno poznamenat, že díky této podmínce nebude platit rovnost, mezi poměry poptávky a nabídky, pouze přibližný vztah

$$p = \frac{Q_2}{Q_1} \approx \frac{n_2}{n_1} = p^*,$$

Z matematického modelu vyplývá, že pokud v pásmové stanici dochází k odvěšení $n_1 - n_2$ jednotek (vozů), bude pásmo s menšími přepravními požadavky dostatečně pokryto kapacitou “menší” soupravy.

5. Případ kolísání poptávky v čase

Předpokládejme nyní, že na určité trase *AB*, ať už rozdělené na pásma, nebo ne, dochází k tak významným výkyvům poptávky cestujících (v některých pásmech, nebo na celé trase, v některém, nebo v obou směrech), přičemž tyto výkyvy jsou tak velké, že je potřebné měnit kapacity souprav po sobě následujících spojů. Předpokládejme rovněž, že úsek je obsluhován homogenním parkem jednotek (pro nehomogenní park je problém mnohem složitější a zatím těžko postižitelný).

Pro potřeby řešení této úlohy a vytvoření matematického modelu si zavedeme pojem **elementární spoj**. Jedná se o jednu jízdu jedné jednotky ze stanice, kde je zařazena do sou pravy, obsluhující nějaký spoj, do stanice, kde je z této soupravy vyřazena. Máme li na trase *ABC* spoj, na kterém v úseku *AB* jedou 3 jednotky (resp. měly by jet v souladu s poptávkou) a na úseku *BC* z nich pokračuje jen jedna, bude to představovat tyto elementární spoje:

s_1 z *A do C*

s_2 z *A do B*

s_3 z *A do B*

Označme *S* množinu všech takto definovaných elementárních spojů. Znovu opakujeme, jde o jízdy jednotek, potřebné z kapacitních důvodů, ne o ty jednotky, které se k soupravě přidají z důvodů technologických, aby se přesunuly tam, kde je jich zapotřebí. Pomocí množiny *S* vytvoříme orientovaný graf $G = (S, H, c)$, jehož vrcholy jsou elementární spoje, do hranové množiny *H* zařadíme všechny dvojice $h = (r,s)$, kde $r,s \in S$ a kromě toho jedna a tatáž konkrétní jednotka může nejprve jet na spoji *r* a pak na spoji *s*. Cena $c(r, s)$ vyjadřuje náklady na přesun jednotky z místa, kde opouští spoj *r* do místa, kde začne provádět spoj *s* a dále všechny na to potřebné manipulační náklady, zmenšené o fixní náklady c_o, které vzniknou, když je do provozu zařazena další jednotka. Tyto fixní náklady mohou zahrnovat odpisy, náklady na periodické prohlídky (nezávislé na počtu najetých kilometrů) a, pokud jednotka má předepsanou osádku (např. autobus řidiče), tak i pevnou složku její mzdy. Pak můžeme formulovat následující úlohu:

Optimalizační úloha: Na grafu *G* najít takovou množinu cest *P*, že

- každý elementární spoj je na některé cestě z *P,*
- minimalizuje hodnotu účelové funkce $\sum_{(r,s)\in P} c(r,s)$, kde symbolem $(r, s) \in P$ myslíme to, že spoj *s* bezprostředně následuje za spojem *r* na nějaké cestě z *P*.

Každá cesta z množiny *P* v praxi představuje jeden turnus některé jednotky, tedy posloupnost spojů, jež tato jednotka v daném časovém období (např. dnu) odjede.

Dopravní věda dává k dispozici v podstatě tři metodické postupy na řešení této optimalizační úlohy:

- využití množinově-pokrývacího problému
- využití lineárního programování
- využití metod teorie grafů.

Podrobněji se o nich můžeme dočíst v článku [1]. Pokud by čtenáře zajímalo zjištění, o co se zkomplikuje tato problematiky v případě heterogenního parku, může sáhnout po článcích [2,3].

6. Závěr

V rámci tohoto příspěvku “Modely přizpůsobení taktového režimu výkyvům poptávky” jsou popsány a v některých případech i vytvořeny modely a metody, které umožňují při zachování taktového režimu dopravy optimalizaci kapacity spojů, odpovídající výkyvům poptávky.

Literatura:

1. Černý, J.: Optimalizační modely a metody pro oběhové rozvrhy v regionální dopravě. Sborník konference s mezinárodní účastí “Věda o dopravě”, str. 54-59. ISBN 80-01-02437-7. Praha, listopad 2001.

2 Palúch, S.: Bus Scheduling problem with two types of Buses. Studies of the Faculty of Management Science and Informatics, vol. 8, 1999, pp. 59-65.

3 Palúch, S.: A Graph Theory Approach to Bus Scheduling with Two Types of Buses. Studies of the Faculty of Management Science and Informatics, vol. 9, December 2001, pp 53-57.

V Pardubicích, září 2002

Lektoroval: Ing. Jan Kofroň
ČD DOP O16