

KOMPARACE VYBRANÝCH METOD ZABÝVAJÍCÍCH SE NÁVRHEM SÍTĚ LINEK MHD

COMPARISON OF SELECTED METHODS TO ADDRESS THE URBAN PUBLIC TRANSPORT LINE NETWORK DESIGN

Martin Blatoň¹

Anotace: Článek se zabývá zmapováním vybraných stávajících přístupů k tvorbě sítě linek MHD v ČR i zahraničí. U jednotlivých přístupů je uvedena jejich stručná charakteristika. Dále je provedeno jejich porovnání, společné rysy a rozdíly.

Klíčová slova: městská hromadná doprava, síť linek.

Summary: The article deals with survey of selected current approaches to a formation of network of urban public transport lines in the Czech Republic and abroad. Brief characteristics of the approaches are presented. Their common features and differences are compared.

Key words: Urban Public Transport, Line Network.

1. ÚVOD

Jedním ze základních problémů dopravní praxe v souvislosti s městskou hromadnou dopravou je návrh sítě linek MHD. V praxi se v minulosti a v současnosti je tomu zpravidla jinak, tvoří síť linek nejčastěji na základě zkušeností vyplývajících ze známých, např. historických vazeb reflektujících určitý zvykový přístup cestující veřejnosti. Dalšími důvody, svědčícími ve prospěch zkušenostního přístupu, je mimo jiné i to, že ještě v nedávné minulosti nebyla k dispozici dostatečná počítačová podpora, která by umožňovala pro řešení uvedeného problému používání sofistikovanějších nástrojů.

V minulosti bylo v odborné literatuře k návrhu sítě linek publikováno několik metod, resp. přístupů, informace o nich jsou však značně rozptýleny, proto je žádoucí zabývat se jimi souhrnně a současně s tím se věnovat i jejich srovnání.

2. PŘEHLED METOD SLOUŽÍCÍCH K NÁVRHU SÍTĚ MHD

Jak již bylo uvedeno, je v současné době k dispozici celá řada metod, jež se k návrhu sítě linek MHD používají. Článek je zaměřen především na metody vyznačující se exaktním základem. Uváděné metody se dají pro účely tohoto článku rozčlenit do dvou skupin a to:

- metody používané v ČR a SR,

¹ Ing. Martin Blatoň, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba, Tel.: +420 597323122, E-mail: blatonm@centrum.cz

- metody používané v zahraničí (mimo SR).

2.1 Metody sloužící k návrhu sítě MHD v ČR a SR

V rámci podkapitoly 2.1 bude pozornost věnována třem metodám návrhu sítě linek MHD. Bude se jednat o:

- metodu zohledňující strategii cestování,
- metodu založenou na analýze současného stavu přemísťování osob,
- metodu založenou na přidělování vozidel linkám.

2.1.1 Metoda zohledňující strategii cestování

Jedná se o heuristickou metodu publikovanou v literatuře [6]. Metoda vychází ze strategie přemístění definované následovně: cestující si vybírá takový způsob přemístění, při kterém dosáhne nejkratší dobu přemístění s ohledem na jízdné, případné přestupy, pohodlí a další jím subjektivně preferovaná kritéria kvality. Přitom, pokud má možnost použít jinou rovnocennou linku použije první možný spoj jedoucí v požadovaném směru přepravy.

V rámci optimalizační úlohy se z hlediska přípustnosti navrženého řešení rozlišují řešení úplně přípustná a relativně přípustná. Jsou-li všichni cestující přepraveni tím spojem, který si zvolili, jedná se o úplně přípustné řešení, jsou-li cestující přepraveni, ale s omezením ve výběru spoje (kapacita), jedná se o relativně přípustné řešení. Existují-li cestující, jejichž přepravní požadavky nejsou spoji navržené soustavy linek splněny, jedná se o nepřípustné řešení.

Optimalizační úloha je definována následovně: má se vyhledat množina linek a stanovit intenzita jejich dopravních proudů tak, aby bylo dosaženo minimální celkové cestovní doby a minimálního počtu vozidel v dopravní síti.

Vstupem do řešícího algoritmu je počáteční množina linek (tzv. kandidáti na linky). Postup řešení spočívá ve vyhledání takové konfigurace sítě linek, která odpovídá úplně přípustnému nebo relativně přípustnému řešení a při praktické realizaci probíhá ve třech základních etapách:

- *redukce linek*. Z počáteční množiny linek jsou podle konkrétního algoritmu postupně vylučované nejméně perspektivní linky. Tato etapa končí, když se dojde k požadovanému, zadanému počtu linek, anebo když každé další vyloučení linky znamená ztrátu přípustnosti řešení,
- *distribuce dopravních prostředků*. Daný počet dopravních prostředků je přiřazen na linky tak, aby byl minimalizován celkový čas čekání na spoj. Nutnou podmínkou řešitelnosti je podmínka, aby počet dopravních prostředků byl větší nebo rovný počtu linek. Úlohu je možné efektivně řešit např. metodou dynamického programování,
- *redistribuce dopravních prostředků*. Vychází se z dané množiny linek a daného počátečního přiřazení dopravních prostředků na tyto linky. Algoritmus provádí postupné a systematické přesuny dopravních prostředků mezi linkami, když se jeví tento přesun výhodný z hlediska hodnoty účelové funkce. Hledaná suboptimální

množina linek je tvořena linkami s nenulovým počtem přiřazených dopravních prostředků.

Z dostupné literatury je známo, že uvedeného přístupu bylo použito při návrhu sítě linek MHD ve městě Poprad [6].

2.1.2 Metoda založená na analýze současného stavu přemístování osob [7]

Metoda založená na analýze současného stavu přemístování osob je uvedena v literatuře [7]. Uvedená metoda se v některých krocích vhodně kombinuje s metodou zohledňující strategii cestování [8] popsanou v podkapitole 2.1.1.

Metoda vychází z logického požadavku, že vedení linek MHD musí být v souladu s přepravními potřebami obyvatel.

I při metodě založené na analýze současného stavu se vytváří počáteční množina linek, která má nejmenší možný počet „kandidátů na linky“, které jsou zařazeny do suboptimálního řešení. Pro tuto množinu linek platí, že cestující se z libovolného uzlu „i“ do libovolného uzlu „j“ může dostat bez přestupu.

Z hlediska dosažení co nejlepší suboptimální množiny linek je žádoucí, aby počáteční množina linek obsahovala kromě linek definovaných výše i další cesty s velkou intenzitou přepravního proudu. Tato intenzita je stanovena jako dolní mez pro přímé přepravy bez přestupu. Tím se rozšíří počet kandidátů a současně zvýší kvalita získaného suboptima.

Postup je tedy rozdělen do těchto kroků:

1. Sestavení zakódované maximální dopravní sítě, která je tvořena všemi technicky způsobilými dopravními úseky pro dopravní prostředky hromadné osobní dopravy.
2. Sestavení matice meziokrskových přepravních vztahů (tj. po dělbě přepravní práce) pro zvolené časové období. Se znalostí přepravní nerovnoměrnosti se řeší dopravní síť pro období přepravní špičky a přepravního sedla zvlášť. Může se tak vytvořit rozdílná soustava linek pro přepravní špičku a sedlo. „Sedlové linky“ jsou v provozu během celého provozního dne, také v dnech pracovního volna a pracovního klidu.
3. Přiřazení přepravních vztahů na maximální dopravní síť metodou nejkratší trasy (případně metodou dvou a více tras). Současně se provede záznam intenzity přepravního proudu na úsecích maximální dopravní sítě a zjistí se výsledná intenzita každého úseku.
4. Porovnání výsledné intenzity přepravního proudu každého úseku maximální dopravní sítě s přepravní kapacitou úseku. V případě překročení mezní přepravní kapacity se určí nejbližší vyšší náhradní trasa pro vhodný přepravní vztah mimo tento úsek tak, aby se předem optimálně ovlivnil návrh linkového vedení.
5. Sestavení linek na maximální dopravní síti. Při realizaci uvedeného kroku se vychází z matematické formulace řešení, jak je uvedeno v literatuře [7].
6. S použitím metody nejkratší trasy (nebo metody více tras) se provede přiřazení meziokrskových přepravních vztahů na dopravní síť linek sestavených v 5. kroku. To znamená, že tato dopravní síť už neobsahuje všechny původní dopravní cesty maximální dopravní sítě. Součástí řešení je:

- stanovení potřebných linkových intervalů dopravy (nebo počtu spojů), které odpovídají maximální intenzitě přepravního proudu a kapacitě vozidel na vyřešených linkách,
 - výpočet jednotlivých složek doby cesty, tj. doby čekání na spoj při prvním nástupu do vozidla, cestovní doby mezi uzly a doby přestupu,
 - stanovení časové penalty za přestup,
 - sestavení stromu minimální doby přepravy ze všech těžišť dopravních okrsků a uzlů na dopravní síti,
 - přiřazení přepravních vztahů na dopravní síť s využitím metody nejkratší trasy,
 - záznam intenzity přepravního proudu na úsecích dopravní sítě a zjištění jejich výsledných hodnot.
7. Porovnání výsledné intenzity přepravního proudu každého úseku dopravní sítě s přepravní kapacitou úseku. V případě překročení mezní přepravní kapacity úseku se změní kapacita vozidel nebo provede změna vedení linky, změna organizace dopravy v dané oblasti, provedou se stavební úpravy dopravních cest za účelem zvětšení kapacity úseku nebo skupinového odbavování vozidel na zastávkách. Také je možné zavést odpovídající preferenci hromadné osobní dopravy.
8. Provede se výsledné řešení varianty dopravní sítě hromadné osobní dopravy, které obsahuje úpravu intervalů dopravy na jednotlivých linkách (počtu spojů) a prostorové ukončení linek. V případě, že se změní linkové intervaly, opakují se kroky 6,7,8.
9. Provede se vyhodnocení vyřešené varianty dopravní sítě podle zvolených kritérií optimálnosti dopravní sítě.

Za účelem rozhodování o změně dopravní sítě hromadné osobní dopravy je zpracováno několik variant a z nich je vybrána nejvhodnější. Jednotlivé varianty řešení je nutné koncipovat systematicky s přibližováním se k parciálním extrémům závisle proměnných veličin postupnými změnami ovlivňujících jevů.

2.1.3 Tvorba sítě linek MHD pomocí přidělování vozidel linkám

Metoda je taktéž založena na existenci širší množiny linek. V odborné literatuře byly publikovány následující dva přístupy lišící se optimalizačním kritériem:

- metoda maximalizující minimální z poměrných rezerv obsazenosti vozidel na úsecích dopravní sítě,
- metoda minimalizující celkové časové ztráty cestujících (této metodě bude věnována pozornost v podkapitole, která slouží k návrhu sítě linek v zahraničí).

Metoda maximalizující minimální z poměrných rezerv obsazenosti vozidel na úsecích dopravní sítě

Autory následujícího přístupu jsou A. Černá a J. Černý [2], [4]. Model těchto autorů si zachovává základní myšlenku o současném řešení výběru linek a přidělení vozidlového parku, jak je popsáno v literatuře [3].

Problém je možno formulovat následovně. Je dána hranově ohodnocená dopravní síť $S = (V, H, q)$, na které je definována širší množina linek L_0 , přičemž pro $l \in L_0$:

$$l = (o_l, d_l, m_l, v_{l_0}, \dots, v_{l_{m_l}})$$

kde:

- o_l ... oběžný čas vozidla na lince l ,
- d_l ... druh vozidel používaných na lince l ,
- m_l ... počet úseků na lince l ,
- $v_{l_0}, v_{l_{m_l}}$... koncové uzly linky l ,
- $v_{l_1}, v_{l_{m_l-1}}$... nácestné uzly linky l .

Pro každou hranu $h \in H$ je definována kumulovaná intenzita proudu cestujících $q(h)$, je-li hrana obsluhována obousměrně, pak půjde o dvojici údajů. V dalším textu bude uvažováno, že bude k dispozici širší množina kyvadlových linek, je tedy možno dvojici uvedených údajů nahradit jednou hodnotou, a to maximem. Splní-li se požadavek na přepravu s vyšší intenzitou, splní se také požadavek ve směru s intenzitou nižší.

Dále je k dispozici úhrnná kapacita c_i v disponibilních vozidlech druhu $i \in I$, kde I je množina druhů dopravních prostředků. Symbolem L_i bude označena množina linek obsluhovaných druhem dopravního prostředku $i \in I$. Symbolem L_h bude označena množina linek obsluhujících hranu $h \in H$.

Pro každou linku $l \in L_0$ pak autoři definovali nezápornou proměnnou x_l reprezentující výkonnost linky $l \in L_0$ (počet míst, která nabídnou vozidla linky na úseku dopravní sítě za určitou časovou jednotku). Do výsledného systému jsou pak vybrány jen ty linky, pro něž platí $x_l > 0$. Optimalizačním kritériem je minimální z poměrných rezerv y mezi nabízeným počtem míst a průměrným požadavkem cestujících na daném úseku při současném výběru linek a přidělení kapacity vozidlového parku, přičemž jeho hodnota se maximalizuje.

Matematický model má tvar:

$$\max f(y) = y \quad (1)$$

za podmíněk:

$$\sum_{l \in L_i} o_l x_l \leq c_i \quad \text{pro } i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{l \in L_h} x_l \geq y \cdot q(h) \quad \text{pro } h \in H \quad (3)$$

$$x_l \geq 0 \quad \text{pro } l \in L_0 \quad (4)$$

$$y \geq 0 \quad (5)$$

Výraz (1) je účelová funkce modelu, omezující podmínky typu (2), jejichž počet odpovídá počtu druhů dopravních prostředků, zajišťují, že kapacita disponibilního vozidlového parku pro každý druh dopravního prostředku $i \in I$ nebude překročena, omezující podmínky typu (3), jejichž počet odpovídá počtu úseků dopravní sítě, zajistí, že na každém úseku bude nabídnuto minimálně tolik míst, kolik odpovídá minimální poměrné rezervě. Omezující podmínky typu (4) a (5), jejichž počet odpovídá počtu proměnných, jsou obligatorními podmínkami.

Navržený model, známý v odborné literatuře také pod názvem PRIVOL a dá se řešit softwarovými prostředky určenými k řešení úloh lineárního programování.

Použití modelu přichází v úvahu zejména v situacích, kdy na některých úsecích dopravní sítě není k dispozici dostatečná kapacita míst pro cestující veřejnost.

Značnou výhodou publikovaného modelu je, že je natolik univerzální model, že umožňuje modifikace do celé řady verzí, které se od sebe liší především optimalizačním kritériem, o čemž svědčí následující přehled prací. V práci [10] je demonstrována varianta modelu umožňující minimalizovat počet vozidel, který má být za účelem obsluhy požadavků v síti použit, práce [11] uvádí variantu modelu minimalizující objem emisí produkováných dopravními prostředky, práce [12] uvádí model ve variantě minimalizující celkové náklady na provoz vozidel apod. Sestavený model je navíc možno použít jak v případě homogenního, tak i v případě heterogenního vozidlového parku.

V dostupné literatuře jsou k dispozici informace, že model PRIVOL byl na území České republiky použit pro návrh linkové sítě MHD v Pardubicích, s ohledem na rozhodnutí vedení města však získané výsledky nebyly uvedeny do praxe [2]. Zatímco ve městě Pardubice se výsledky optimalizačního výpočtu nepodařilo realizovat, na Slovensku byl model PRIVOL úspěšně použit při návrhu sítě linek ve městech Martin [3], Žilina [2], Piešťany, Košice, Trenčín a Považská Bystrica [9].

Například v Žilině se pomocí uvedeného modelu podařilo významně zpřehlednit síť linek (původní počet provozovaných linek byl při respektování rozhodujících přepravních směrů redukován z 34 na 14).

2.2 Metody sloužící k návrhu sítě MHD v zahraničí (mimo SR)

V rámci podkapitoly 2.2 bude pozornost věnována skupině metod, u které se tvoří síť linek na základě přidělování vozidel linkám.

2.2.1 Tvorba sítě linek MHD pomocí přidělování vozidel linkám

Metoda minimalizující celkové časové ztráty cestujících

Původními autory této myšlenky jsou S. Erlander a S. Schéeleová [5], na jejichž výsledky v minulosti navázali i A. Černá a J. Černý (viz výše uvedený model PRIVOL). Její podstata spočívá v tom, že pokud máme definovanou „širší“ množinu linek L_0 , tak výběr linky $l \in L_0$ do užší množiny L se bude dít pomocí celočíselné nezáporné proměnné x_l , která vyjadřuje počet vozidel přidělených na linku $l \in L_0$. Při $x_l > 0$, linka bude provozována, při $x_l = 0$, linka nebude provozována. Výhodou uvedeného modelu je, že se v rámci jednoho řešení vyřeší nejenom výběr soustavy linek, ale pro každou linku se určí i počet přidělených vozidel.

S. Erlander a S. Schéeleová formulovali pro neznámé x_l , $l \in L_0$ následující omezení:

1. počet vozidel rozdělený mezi linky nesmí překročit kapacitu vozidlového parku,
2. každý přepravní požadavek musí být splněn, tj. na všech úsecích ležících na jeho trase musí být k dispozici dostatečná kapacita na linkách, které tyto úseky obsluhují.

Do výsledného systému jsou pak vybrány jen ty linky, pro něž platí $x_l > 0$.

Ačkoliv byl tento model výrazným pokrokem v dopravní teorii, příliš se v praxi nerozšířil, zejména proto, že důležitou složkou časových ztrát cestujících je průměrná doba čekání na spoj, která se rovná polovině intervalu, tedy $o_l/2x_l$, kde o_l je doba oběhu vozidla na lince l , a tedy proměnná je ve jmenovateli, tj. jde o jednu z úloh nelineárního programování. Model byl použit ve švédském městě Linköping [9].

3. POROVNÁNÍ METOD

V kapitole 3 bude pozornost soustředěna na porovnání přístupů uvedených v dostupné literatuře. S ohledem na skutečnost, že informace týkající se některých přístupů byly poměrně strohé, není možné provést srovnání prostřednictvím výsledků konkrétních příkladů. Ke srovnání byly použity: metoda zohledňující strategii cestování a maximalizující minimální z poměrných rezerv obsazenosti vozidel na úsecích dopravní sítě.

Společné znaky uvedených metod

Obě metody vycházejí z širší množiny linek, přičemž výsledná množina linek je vždy podmnožinou širší množiny linek. Při vytváření širší množiny linek nejsou na řešitele kladena žádná omezení, do širší množiny linek mohou být zahrnuty linky jak existující, tak linky nově uvažované. Metody pracují se vstupními údaji typu intenzita cestujících a kapacita disponibilního vozidlového parku. Obě metody byly úspěšně uvedeny do praxe, aplikace byly prováděny ve městech menší a střední velikosti.

Rozdíly uvedených metod

Metoda zohledňující strategii cestování je heuristická a metoda maximalizující minimální z poměrných rezerv obsazenosti vozidel na úsecích dopravní sítě je metodou exaktní. Optimalizační kritéria u uvedených metod jsou různá. Výstupem z metody zohledňující strategii cestování jsou počty vozidel přidělené jednotlivým linkám a výstupem metody maximalizující minimální z poměrných rezerv obsazenosti vozidel na úsecích

dopravní sítě jsou výkonnosti jednotlivých linek, které je nutno následně přepočítat na počty vozidel (hodnota účelové funkce u výsledného řešení se tak může odchylovat od hodnoty účelové funkce získané řešením modelu).

4. ZÁVĚR

V článku je popsán stávající stav vybraných přístupů k tvorbě sítě linek městské hromadné dopravy. Každý z přístupů je dle rozsahu dostupných informací charakterizován, jsou identifikovány jeho výhody a nevýhody. Na závěr je provedeno zhodnocení dvou zvolených přístupů, u nichž je možné sledovat jak společné rysy, tak i rozdíly.

Příspěvek vznikl za podpory interního doktorského grantu Fakulty strojní, VŠB – Technické univerzity Ostrava.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Branická, M., Stacho, M. *Model MHD a optimalizácia času premiestnenia cestujúceho*. Doprava a spoje [online]. 2007, č. 1, s. 1 - 11.
Dostupné z <<http://fpedas.etc.sk/dopravaaspoje/2007/1/branicka.pdf>>. ISSN 1336-7676.
- [2] Černá, A.; Černý, J. *Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech*. Praha: Institut Jana Pernera, 2004. 1. vydání, s. 150. ISBN 80-86530-15-9.
- [3] Černý J., Kluvánek, P. *Základy matematickej teórie dopravy*, Veda, Bratislava, 1991, 1. vydání, s. 280. ISBN 80 – 224 – 0099 – 8.
- [4] Černá, A. *Koordinácia liniek a spojov MHD pomocou počítača*. Kandidátská disertačná práca VŠDS Žilina, 1987
- [5] Erlander, S., Schéele, S. *A Mathematical Programming Model for Bus Traffic in a Network*. Sb. Transportation and Traffic Theory. Sydney, REED, 1974, pp. 581-605.
- [6] Chlebničan, P. et al. *Optimalizacia autobusovej MHD v meste Poprad*. Správa o riešení úlohy, CHAPS, Softwarové stredisko pre dopravné projektovanie, Žilina, 1990.
- [7] Surovec, P. *Provoz a ekonomika silniční dopravy I*. Ostrava, 2000, 1. vydání, s. 122. ISBN 80-7078–735–X.
- [8] Surovec, P. *Tvorba systému mestskej hromadnej dopravy*. Žilina, 1999, 1. vydání, s. 149. ISBN 80-7100–586–X.
- [9] Peško, Š. *Podpora metód operačného výskumu pri navrhovaní systému liniek*. CD sborník. 6. mezinárodní konference Dopravná infrastruktúra v mestách. Žilina, 22. - 23. 10. 2008.
- [10] Teichmann, D. *O niekoľko modifikáciách matematického modelu pridělování vozidel linkám v městské hromadné dopravě*. Nová železniční technika. 2009, č. 1, s. 20-23.
- [11] Blatoň, M. *The Mathematical Model of Assigning Vehicles to Transport Lines Modification*. Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava. Ostrava, 2009. ISSN 1210-0471.
- [12] Blatoň, M. *Lineární matematický model minimalizující náklady na provoz vozidel*. Zdvihací zařízení v teorii a praxi. 2009, č. 1. ISSN 1802-2812.

Recenzenti: prof. Ing. Pavel Surovec, Ph.D.
Žilinská univerzita v Žiline, FPEDaS, Katedra cestnej a mestskej dopravy
Ing. Ivo Drahotský, Ph.D.
Univerzita Pardubice, DFJP, Katedra dopravního managementu, marketingu
a logistiky