

VYBRANÉ METODY NÁVRHU SÍTĚ LINEK MHD POUŽÍVANÉ V ZAHRANIČÍ

SELECTED METHODS USED ABROAD TO ADDRESS THE URBAN PUBLIC TRANSPORT LINE NETWORK DESIGN

Martin Blatoň¹, Dušan Teichmann²

Anotace: Článek se zabývá zmapováním vybraných stávajících přístupů k tvorbě sítě linek MHD v 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, matematický model

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

Key words: Urban Public Transport, Line Network, Mathematical Model

1. ÚVOD

Jedním ze základních problémů, který je nutno řešit v dopravní praxi v souvislosti s městskou hromadnou dopravou, je návrh (nebo reorganizace stávající) sítě linek MHD. V praxi se při řešení uvedeného problému využívají především přístupy založené na základě zkušeností, které vyplývají z 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 používat sofistikovanější nástroje nebo se mnohé navržené exaktní nástroje vyznačují určitými nevýhodami, pro které nenašly své širší uplatnění. Není však možné řešení problému návrhu sítě linek opustit a spokojit se s konstatováním, že pokud se problém nepodařilo vyřešit do současnosti, nepodaří se jej přiblížit k jeho vyřešení ani v budoucím období.

Za účelem vytvoření určitého přehledu o metodách a přístupech navržených v minulosti je vhodné seznámit se s tím, jak někteří autoři při řešení problému postupovali a do jaké míry byli při použití navržených přístupů úspěšní. Navíc informace o navržených

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

² Ing. Dušan Teichmann, Ph.D., VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba, Tel.: +420 597324575, E-mail: dušan.teichmann@vsb.cz

metodách a přístupech jsou v odborné literatuře značně rozptýleny, proto je vhodné předložit je odborné veřejnosti ve stručnosti v kontextu a ucelenější formě.

2. CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH PŘÍSTUPŮ K TVORBĚ LINEK MHD

Všechny studované přístupy k návrhu sítě linek MHD koncentrují pozornost na dva dílčí problémy, a to určení tras jednotlivých linek a návrhem frekvencí spojů na těchto linkách.

Vytvořit systematickou klasifikaci navržených metod není jednoduché, zejména proto, že většina pozdějších metod vznikla více nebo méně úspěšnými kombinacemi metod předchozích a taktéž proto, že je mnoho hledisek, podle kterých by se tyto metody daly klasifikovat. V předloženém článku bylo zvoleno klasifikační hledisko umožňující jednotlivé přístupy rozdělit na přístupy, podle kterých se řešení problému návrhu sítě linek dekomponuje do více fází – tzv. vícefázový přístup a přístupy, ve kterých k dekompozici úlohy nedochází – jednofázový přístup.

2.1 Vícefázové přístupy

Průkopnickou prací v této skupině je Lampkinova a Saalmansova práce [7]. Autoři navrhují dekomponovat řešenou úlohu na dvě dílčí úlohy. V první dílčí úloze se řeší problém návrhu tras linek a ve druhé dílčí úloze se navrženým trasám linek přiřazují frekvence spojů. Řešení obou dílčích úloh je založeno na použití heuristických přístupů. Při řešení první dílčí úlohy je optimalizačním kritériem počet ujetých osobokilometrů. Výhodnost volby trasy je posuzována podle výhodnostního koeficientu – počtu ušetřených osobokilometrů. Při takto nastaveném výhodnostním koeficientu budou při výběru tras linek přepravním proudům vyznačujícím se většími objemy cestujících přiřazována přímá spojení. Při řešení druhé dílčí úlohy, kdy se pro vybrané linky určují frekvence, se opět používá heuristický přístup, při kterém se mezi vybrané linky rozdělují vozidla v závislosti na možnostech disponibilního vozidlového parku. Vlastní rozdělování probíhá v závislosti na minimalizaci celkové doby jízdy všech cestujících.

Jistou modifikací do tohoto přístupu zavedli Dubois, Bel a Llibre, kteří uvažují s proměnlivou poptávkou po přepravě v závislosti na vedení linek [5]. Postup řešení rozdělují do tří fází. V první fázi se podle navrhovaného přístupu vyhledá soustava městských komunikací, na kterých bude MHD provozována. V této etapě se upřednostňují ta řešení, která umožní minimalizovat celkovou dobu přepravy cestujících při respektování investičních

omezení. V druhé fázi se na vybrané komunikační síti uskuteční návrh sítě linek. Předpokládá se, že v případě výběru nevhodné trasy linky, dojde k určitému úbytku zájmu cestujících o přepravu. V poslední fázi se určí frekvence spojů na linkách vybraných v předchozí fázi v závislosti na měnící se poptávce. Výsledná matice poptávky se bude svými hodnotami lišit o počet cestujících, kteří na základě navržené sítě linek veřejnou hromadnou dopravu nepoužijí. Cílem pochopitelně je, aby pokles hodnot prvků ve výsledné matici byl ve srovnání s hodnotami prvků ve výchozí matici co nejnižší.

Do skupiny dekompozičních přístupů k návrhu sítě linek můžeme dále zařadit práci autorů Constantina a Floriana [2], kteří sestavili model určující frekvence na jednotlivých linkách při minimalizaci cestovních a čekacích dob všech cestujících. Základním omezením vystupujícím v úloze je kapacita disponibilního vozidlového parku. Autoři ve své práci sestavili nelineární nekonvexní smíšený celočíselný model, který byl následně transformován do podoby dvouúrovňového min-min problému.

Specifickou skupinu dekompozičních metod tvoří metody založené na bázi umělé inteligence. Jako první metody umělé inteligence využili autoři Shih a Mahmassani [8], jejichž poznatky dále rozpracovali autoři Fan a Machemehl [6]. V navrženém přístupu používají stejná kritéria i celkový postup. Vygeneruje se výchozí množina linek s využitím základních parametrů systému (minimální a maximální délka trasy, počet zón, průměrná cestovní rychlost vozidla, rozmístění zdrojů a cílů přepravních proudů). K určení výchozí množiny linek autoři navrhují využít Dijkstrova algoritmu pro vyhledání minimálních cest v grafu – modifikaci s pevným označováním uzlů. V dalším kroku nastává výběr linek z výchozí množiny linek pomocí heuristických procedur a k vyhodnocení navržené sítě linek z hlediska zvolených kritérií. V rámci vyhodnocení dochází k vhodnému (očekávanému) rozložení poptávky na úseky dopravní sítě a následně se přiřadí frekvence zvoleným linkám. Protože nalezení optimálního řešení tradičními optimalizačními metodami není v reálných sítích možné, zmiňují se autoři o možnostech využití heuristických a metaheuristických metod, jako jsou genetické algoritmy, metaheuristiky simulated annealing a tabu search.

Při stanovení frekvencí se v navržené metodě zohledňují tři typy frekvencí - nabídková, poptávková a pojistná frekvence. Výsledná frekvence linky se vytváří v závislosti na poptávkové frekvenci a pojistné frekvenci. Poptávková frekvence se vypočítá na základě maximální hodinové intenzity cestujících na dané trase, kapacity nasazených vozidel a uživatelem definovaného zatížení. Pojistná frekvence do jisté míry vytváří rezervu umožňující pokrýt i zvýšené nároky na přepravu. Nabídková frekvence vychází z rozhodnutí dopravce. Může jít o frekvence, které jsou předdefinovány, přičemž mohou být pro všechny

linky stejné, ale také se mohou lišit v závislosti na poptávce. Prostřednictvím iteračního procesu dochází k přepočtům nabídkových frekvencí tak dlouho, dokud výsledná frekvence nezohledňuje poptávkovou a pojistnou frekvenci.

Výhodami navrženého přístupu jsou skutečnosti, že přístup zohledňuje všechny složky času, které cestující stráví při cestování městskou hromadnou dopravou, a dále to, že se při návrhu tras a frekvencí linek uplatňují pravidla stanovená praxí. Nevýhodou je, že návrh dobré konfigurace linek trvá dlouho, neboť po každé změně konfigurace sítě linek je v rámci iterace nutno přepočítat frekvence a upravit trasy cestujících.

Závěrem textu věnovaného dekompozičním metodám je nutno uvést, že dekompoziční přístupy využívají zpravidla heuristických řešících technik. Nelze tedy očekávat, že jimi získaná řešení budou optimální, je však třeba také uvést, že výsledky získané dekompozičními přístupy mohou být pro cestující veřejnost akceptovatelné.

2.2 Jednofázové přístupy

Společným rysem jednofázových přístupů je, že předpokládají existenci širší množiny linek, z nichž dochází k výběru. To znamená, že trasy potenciálních linek byly navrženy dopravním expertem předem a návrh tras není součástí řešení. Výhodami uvedených modelů je skutečnost, že se v rámci jednoho řešení zpravidla podaří vyřešit nejen výběr soustavy linek, ale pro každou linku se určí i počet přidělených vozidel (z čehož se dá následně odvodit i frekvence linek).

Jako jedni z prvních navrhli jednofázový přístup S. Erlander a S. Schéeleová [3], [4]. Jeho podstata spočívá v tom, že ze širší množiny linek L_0 bude linka $l \in L_0$ vybrána do užší množiny L pomocí celočíselné nezáporné proměnné x_l , která vyjadřuje počet vozidel přidělených na linku $l \in L_0$. Je-li $x_l > 0$, linka bude provozována, při $x_l = 0$ linka nebude provozována. Autoři v úloze formulují dvě logická omezení a to, že počet vozidel rozdělený mezi linky nesmí překročit kapacitu vozidlového parku a 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 výsledné sítě linek jsou pak vybrány jen ty linky, pro něž platí $x_l > 0$. Model minimalizuje celkové časové ztráty cestujících, které jsou determinovány zvolenou soustavou linek.

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, při jejímž výpočtu je zavedená proměnná ve jmenovateli, tj. nacházíme se v nelineárním programování, kde se optimalizační úlohy řeší velmi obtížně. Model byl použit ve švédském městě Linköping [3].

V dalším textu bude podrobněji charakterizován jeden z přístupů z poslední doby a to přístup, který navrhli Borndörfer R., Grötschel M., Pfetsch M. [1] a publikovali jej v roce 2007. I jejich přístup je založen na existenci širší množiny linek. V rámci navrženého postupu se optimalizují dva protichůdné cíle, z pohledu dopravního podniku se minimalizují provozní náklady a z pohledu cestujících se minimalizuje doba cestování. Ve svém přístupu autoři vytvářejí takový model, který nalezne linky a jejich odpovídající frekvence tak, aby mohla být splněna poptávka po přepravě v celé dopravní síti.

Autoři formulují problém následovně. Je dána multimodální dopravní síť reprezentovaná digrafem $G_d = (V, A)$, ve kterém vrcholová množina V představuje množinu zastávek a prvky hranové množiny A reprezentují mezizastávkové úseky. Pro každý úsek $a \in A$ je stanoveno číslo Λ_a reprezentující maximální frekvenci spojů na daném úseku. Je daná širší množina linek L_0 . Pro každý úsek $a \in A$ je definována množina linek obsluhujících tento úsek a jízdní doba t_a . Na daném digrafu je definována OD matice D , přičemž prvek této matice d_{st} reprezentuje poptávku po přepravě z vrcholu $s \in V$ do vrcholu $t \in V$ za zvolené časové období. Dále je na zadaném digrafu definována množina tras cestujících P , přičemž P_{st} je množina cest, vedoucích z vrcholu $s \in V$ do vrcholu $t \in V$ a P_a je množina cest procházející úsekem a . Jízdní doba na cestě $p \in P$ je definována jako $t_p = \sum_{a \in p} t_a$. Pro každou linku $l \in L_0$ jsou definovány náklady na zavedení provozu na této lince C_l a náklady c_l , což jsou náklady související s realizací jednoho spoje linky. K dispozici máme množinu druhů dopravních prostředků i , přičemž pro vozidlo i -tého druhu dopravního prostředku je známa jeho kapacita (u každého druhu dopravního prostředku je k dispozici pouze jeden typ vozidla z hlediska kapacity). Autoři zavádějí tři skupiny proměnných. Pro každou linku $l \in L_0$ bude zavedena proměnná z_l , která bude nabývat dvou hodnot. Bude-li $z_l = 0$, linka $l \in L_0$ nebude provozována, když $z_l = 1$, linka $l \in L_0$ bude provozována. Pro každou linku $l \in L_0$ autoři dále zavádějí nezápornou proměnnou f_l , reprezentující frekvenci spojů na dané lince. Poslední skupinou proměnných jsou nezáporné proměnné w_p , reprezentující tok cestujících na cestě $p \in P$.

Matematický model navržený autory má následující tvar:

$$\min \sum_{p \in P} w_p t_p + \sum_{l \in L_0} C_l x_l + \sum_{l \in L_0} c_l f_l \quad (1)$$

za podmínek:

$$\sum_{p \in P_{st}} w_p = d_{st} \quad \text{pro } (s, t) \in D \quad (2)$$

$$\sum_{p \in P_a} w_p \leq \sum_{l \in L_a} k_l \cdot f_l \quad \text{pro } a \in A \quad (3)$$

$$\sum_{l \in L_a} f_l \leq \Lambda_a \quad \text{pro } a \in A \quad (4)$$

$$f_l \leq T \cdot z_l \quad \text{pro } l \in L_0 \quad (5)$$

$$z_l \in \{0, 1\} \quad \text{pro } l \in L_0 \quad (6)$$

$$f_l \geq 0 \quad \text{pro } l \in L_0 \quad (7)$$

$$w_p \geq 0 \quad \text{pro } p \in P \quad (8)$$

Funkce (1) reprezentuje účelovou funkci modelu, která se skládá ze tří členů. První člen reprezentuje celkovou dobu přepravy v dané síti. Zbývající dva členy představují náklady související s provozem linek. Druhý člen označuje náklady na zavedení linek a třetí člen náklady vyplývající z vlastního provozu. Omezující podmínky typu (2) zajistí, že toky cestujících na všech cestách z s do t budou odpovídat požadavku vyplývajícímu z OD matice mezi vrcholy s a t . Omezující podmínky typu (3) zajistí, že nabídka míst na každém úseku $a \in A$ bude dostačující. Omezující podmínky typu (4) nám zajišťují, že počet spojů realizovaných na úseku a nepřekročí přípustné maximum (dané technickými možnostmi infrastruktury nebo jinak stanovené). Omezující podmínky typu (5) zajišťují provázanost mezi frekvencí spojů na dané lince f_l a bivalentní proměnnou z_l , určující zda linka bude v provozu či nikoliv. Díky této podmínce dojde k vyvolání nákladů na zavedení linky. Bude-li frekvence na příslušné lince nabývat kladné hodnoty, bude pro odpovídající proměnnou z_l platit $z_l = 1$ a v účelové funkci dojde k vyvolání fixních nákladů souvisejících se zřízením linky. Hodnota pomocné konstanty se volí například jako maximum z omezujících frekvencí stanovených pro jednotlivé úseky, tj. $T = \max_{a \in A} \{\Lambda_a\}$. Výrazy (6) - (8) představují obligatorní podmínky.

Navržený přístup se vyznačuje čtyřmi nevýhodami. První nevýhodou je, že při tomto přístupu bude nutno v případě výskytu velkého počtu cest zavést do modelu velký počet proměnných, které budou reprezentovat toky cestujících na jednotlivých cestách. Další nevýhodou je, že pokud jsou fixní a provozní náklady vysoké v porovnání s přepravními

náklady cestujících, model může způsobit, že někteří cestující budou nuceni jet po dlouhých trasách a/nebo vícekrát přestupovat. Třetí nevýhodou je to, že nemůžeme modelovat dobu čekání, protože dopředu neznáme počet cestujících, kteří na jednotlivých zastávkách do jednotlivých spojů nastoupí, resp. přestoupí. Za poslední nevýhodu považujeme, že pomocí zavedených proměnných nedokážeme modelovat počet přestupů.

Z dostupné literatury je známo, že uvedeného přístupu bylo použito při návrhu sítě linek MHD v německém městě Postupim [1].

3. ZÁVĚR

Článek upozorňuje na vybrané přístupy k tvorbě sítě linek městské hromadné dopravy navržené a testované v zahraničí (mimo Slovenskou republiku). Vybrané přístupy jsou dle rozsahu dostupných informací charakterizovány a jsou identifikovány jejich výhody a nevýhody. Z případných aplikací je možno usoudit na možnost uplatnění jednotlivých modelů v dopravní praxi. Další informace přehledového charakteru uvádějí ve své práci autoři Fan a Machemehl [6], ze které bylo převážně čerpáno.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BORNDÖRFER, R., GRÖTSCHEL, M., PFETSCH M. E. *A Column-Generation Approach to Line Planning in Public Transport*. Transportation Science. 2007, Vol. 41, No. 1, pp. 123– 132.
- [2] CONSTANTIN, I., FLORIAN, M. *Optimizing Frequencies in a Transit Network: a Nonlinear Bi-level Programming Approach*. International Transactions in Operational Research. 1995, Vol. 2, No. 2, pp. 149-164.
- [3] ČERNÝ J., KLUVÁNEK, P. *Základy matematickej teórie dopravy*, Veda, Bratislava, 1991, 1. vydání, s. 280. ISBN 80 -224 – 0099 – 8.
- [4] ERLANDER, S., SCHÉELE, S. *A Mathematical Programming Model for Bus Traffic in a Network*. Sb. Transportation and Traffic Theory. Sydney, REED, 1974, pp. 581 – 605.280. ISBN 80 -224 – 0099 – 8.
- [5] DUBOIS, D., BEL, G., LLIBRE, M. *A Set of Methods in Transportation Network Synthesis and Analysis*. Journal of the Operational Research Society. 1979, Vol. 30, Issue 9, pp. 797 - 808.
- [6] FAN, W., MACHEMEHL, R. B. *Optimal Transit Route Network Design Problem: Algorithms, Implementations, and Numerical Results*. 2004, pp. 267. Research Report SWUTC/04/167244-1.
- [7] LAMPKIN, W., SAALMANS. P. D. *The Design of Routes, Service Frequencies and Schedules for a Municipal Bus Undertaking: A Case Study*. Operational Research Quarterly. 1967, Vol. 18, No. 4, pp. 375-397.

- [8] SHIH, M. C., MAHMASSANI, H. S. *A Vehicle Sizing Model for Bus Transit Systems*. Transportation Research Record, 1452, pp. 35-41, 1994.

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