

Návrh linek IDS s podporou makroskopických dopravních modelů

Josef Bulíček, Vlastislav Mojžíš

(recenzovaný text)

Úvod

Integrované systémy veřejné hromadné osobní dopravy (IDS) jsou již ve velké míře standardní součástí zajišťování dopravní obslužnosti. Integrace veřejné hromadné osobní dopravy (VHOD) je komplexní proces, který v sobě vyjma tarifní integrace zahrnuje i časovou a prostorovou koordinaci. Jinak řečeno, jedná se o vytvoření souladu jak v linkovém vedení, tak ve vytvoření návazností (přípojových vazeb) v jízdním řádu (JŘ). Právě na tyto oblasti je zaměřen tento článek.

Současná situace

Většina dosud aplikovaných nebo známých metod v oblasti tvorby linek (např. PRIVOL [1]) je založena na výběru linek z jejich vstupní množiny. Prakticky to znamená konstrukci řady (někdy i stovek) možných linek a následnou redukci této množiny linek podle zadaných pravidel (zpravidla výpočet na bázi matematického programování). Tento přístup je správný, nicméně kvalita řešení je závislá právě na vstupní množině linek (resp. na její velikosti).

V současných IDS nastává poněkud odlišná situace, kdy je zde třeba řešit nejen vlastní linkové vedení, ale i vzájemné přestupní vazby mezi linkami. Důležitý je zejména pohled efektivnosti provozu IDS a proto je třeba linky hierarchizovat, neboť ne všechny linky mohou mít stejné provozní parametry (interval, kapacitu linky, rychlost, příslušnost určitému oboru dopravy).

Přepavní poptávka jako vstupní údaj

Východiskem pro řešení [2] je podobně jako u dosud užívaných metod informace o přepravních prouděch cestujících.

Zdrojem těchto informací je makroskopický dopravní model řešeného území, který je sestaven bez ohledu na existující linkové vedení. Vloženy jsou všechny úseky dopravní sítě, které mají předpoklady, aby po nich mohly být vedeny linky VHOD. Musí tak být uvažovány pozemní komunikace i dráhy. Naopak vynechány mohou být takové úseky, které požadavky na provoz VHOD nesplňují (např. železniční vlečky).

Rozhodující charakteristikou je v tomto případě čas projetí úsekem, který může být odvozen např. od JŘ stávající vstupy vedené linky VHOD. V případě potřeby se může jednat i o multikriteriální vyjádření generalizovaných nákladů na cestu (poměr vzdálenosti v km a cestovního času v h). Pro tvorbu tohoto mo-

delu platí podobné požadavky jako pro tvorbu modelu individuální automobilové dopravy.

Takto získaná data poskytují informaci o ideálním směřování přepravních proudů cestujících tak, jako kdyby cestující měli absolutní svobodu volby trasy a bez vazby na JŘ a linkové vedení. V reálné provozní praxi je tato situace sice nedosažitelná, nicméně takový model poskytuje východisko pro plánování linkového vedení.

Provozní koncepty a hierarchie linek

Klíčovým vstupem je stanovení jednotlivých typů (hierarchie) linek budoucího IDS se specifikací jejich základních charakteristik (kapacita, interval). Přijetí tohoto předpokladu je nutné pro následnou transformaci vstupního přepravního proudu cestujících (přiřazeného na jednotlivé úseky) na výsledné linky. Podobně jako v případě vstupní množiny linek je toto pouze předpoklad, nicméně podložený ekonomickými, provozními a jinými požadavky na rozsah provozu IDS. Ve výkladu základního pojetí této metody je uvažováno s linkami kmenovými a doplňkovými, kdy každý typ linek má definované parametry.

Hlavní důvod tohoto dělení spočívá v přístupu k sestavě linek obou typů. U linek kmenových je prioritně uvažováno s periodickým provozem a proudovým charakterem dopravní obslužnosti (v souladu s makroskopickým dopravním modelem). Linky doplňkové často prakticky představují jen několik ojedinelých spojů (za den), příp. otevírá se zde možnost využití progresivních možností dopravní obslužnosti (jako např. spoj na objednání – tzv. Anrufbus). Z toho důvodu jsou doplňkové linky tvořeny pouze jako atrakční obvody přestupních uzlů, ovšem přirozeně s ohledem na spolehlivost obsluhovaných zastávek.

Kmenové linky

Princip metody tvorby kmenových linek spočívá v tom, že pro navrhovaný IDS bude stanoven přesný rozsah provozu ve formě základního intervalu a požadavku na (průměrnou) obsazenost jednotlivých spojů, kdy toto bude odvozeno od počtů cestujících přiřazených na jednotlivé úseky dopravní sítě pomocí traffic assignmentu v modelu bez zavedených linek. Druhým předpokladem je, že každý cestující může na úseku dopravní sítě využít kteroukoli linku s neomezenou možností přestupovat v uzlech dopravní sítě.

Tento předpoklad neodporuje koordinaci spojů různých linek na společných úsecích formou tzv. Žilinské kružnice [1] tak, aby vypočítaný následný interval vytvořil přitažlivou nabídku pro cestující a minimalizoval tak jejich ztráty spojené s čekáním na jejich první spoj. Koordinace spojů na společném úseku je jedním ze základních rysů aplikace integrovaných taktových jízdních řádů v prostředí IDS.

Podsít kmenových linek

Do podsítě vhodné pro provoz kmenových linek jsou zařazeny všechny úseky, které na základě deterministického traffic assignmentu AON vykazují dostatečné zatížení pro provoz kmenové linky.

Metoda AON (All-or-Nothing, všechno nebo nic) přiřazuje všechny cesty v modelovaném území na nejkratší možné trasy bez ohledu na možné kongesce vzniklé na dopravní síti.

Takto je možné jednak tuto podsít vytvořit a zároveň u každého úseku podle učiněných předpokladů určit jakým typem kmenové linky (resp. dopravní obslužnosti tvořené prokladem linek) bude tento úsek obsluhován (kapacita, interval).

Vytvořenou podsít vhodnou pro provoz kmenových linek je ještě nutné konsolidovat, neboť tato síť nemusí být vlivem dílčího poklesu hodnot intenzity přiřazeného přepravního proudu cestujících celistvá, byť z technologicko-provozního úhlu pohledu je vhodné tuto síť scelit. Je doporučeno ponechat konsolidaci na manuálním rozhodnutí dopravního technologa, nicméně pro návrh některých konsolidačních opatření je zřejmě možné vyvinout expertní počítačový systém.

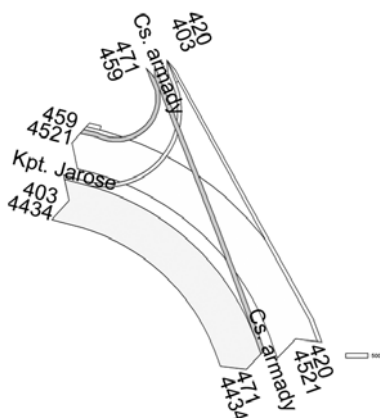
Tvorba kmenových linek

Vlastní tvorba kmenových linek na takto vzniklé podsíti se skládá ze dvou postupně řešených optimalizačních problémů - provázení spojů v uzlech a provázení spojů na společných úsecích. V obou případech je klíčovým vstupním údajem počet spojů na jednotlivých úsecích (odvozený podle přepravní poptávky). Kritériem pak je počet cestujících převezřených bez přestupu, který má být maximalizován. Aktivně jsou využívány výstupy dopravního modelu (přepravní proudy cestujících, matice nejkratších cest procházejících zvoleným úsekem).

• Provázení spojů v uzlech

Jako podklad pro určení způsobu provázení spojů v uzlech slouží analýza přepravních proudů cestujících procházejících uzlem. Některé softwarové produkty pro dopravní modelování, jako např. OMNITRANS (obr. č. 1), umožňují toto zpracovat automatizovaně.

Vlastní řešení lze získat jako výsledek úlohy lineárního programování definované



Obr. č. 1: Analýza přepravních proudů cestujících v uzlu.
Zdroj: Autoři v sw. OmniTRANS

$$\max \sum_{i \in I_r} \sum_{j \in I_s} \frac{d_{ij} \cdot x_{ij}}{n_{ij}^*} + 0 \cdot \sum_{j \in I_r} y_j \quad (1)$$

za podmínek:

$$x_{ij} \leq n_{ij}^* \quad \text{pro všechna } i, j \in I_r \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} + y_j = n_j^* \quad \text{pro všechna } j \in I_r \quad (3)$$

$$x_{ij}, y_j \in N + \{0\} \quad \text{pro všechna } i, j \in I_r \quad (4)$$

vztahy (1) až (4), kdy hodnota účelové funkce (1) představuje polovinu počtu cestujících přepravených tímto uzlem bez přestupu (ve výpočtu uvažováno jednosměrně). Úloha je maximalizační.

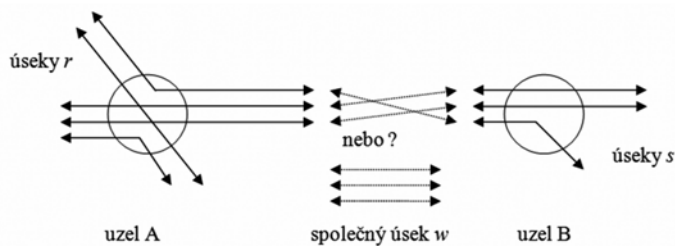
Proměnné x_{ij} představují počet přímých spojů procházejících řešeným uzlem ve směru ij , kde ij jsou úseky do uzlu zaústěné. Proměnné y_j matematicky neovlivňují hodnotu účelové funkce, ale jsou důležité z technologického hlediska, neboť vyjadřují počet spojů z příslušné větve ukončených v uzlu (nebo v jeho blízkosti s možností přestupu). Neplatí zde totiž zákon, že součet proudů (vyjádřený počtem spojů) do uzlu vstupujících se rovná součtu proudů z uzlu vystupujících. Velikost přepravního proudu cestujících (zjištěná modelem) v relaci ij je vyjádřena proměnnou d_{ij} . Proměnná n_{ij}^* pak vyjadřuje maximální počet propojitelných spojů v relaci ij (určeným podle účinných předpokladů v závislosti na velikosti přepravního proudu v relaci ij). Vše je vyjádřeno vzhledem ke zvolenému výpočetnímu období.

• Provázení spojů na společných úsecích

Druhou částí je řešení způsobu provázení spojů společnými úseky. Podstatu problému charakterizuje obr. č. 2.

Kritériem řešení je rovněž maximalizace počtu cestujících přepravených bez přestupu. Koefficienty účelové funkce úlohy lineárního programování jsou stanoveny na základě údajů o vedení nejkratších cest.

Každý úsek podsítě je charakterizován pomocí matice bivalentních hodnot vyjadřujících, zda daný úsek je součástí nejkrat-



Obr. č. 2: Příklad problematiky propojování spojů na společném úseku.
Zdroj: Autoři.

ší cesty mezi místy i a j (přepravními okrsky modelu).

Pro určení počtu cestujících využívajících nejkratší cesty na relaci rws je nejprve nutné stanovit společnou matici pro všechny tři úseky r , w a s (součet příslušných matic po prvcích, náhrada prvků s hodnotou 3 novou hodnotou 1, vynulování ostatních prvků). Následně je proveden skalární součin takto vzniklé matice a matice směřování přepravních proudů cestujících (OD matice). Výsledkem je počet cestujících, využívajících danou posloupnost úseků (r, w, s), pro které by přímé spojení bylo přínosem.

Právě z toho důvodu je doporučeno využívat metodu přiřazení přepravních proudů na úseky dopravní sítě AON. Navíc při modelování VHOD s důrazem na linkové vedení má aplikace stochastických typů assignmentu omezený přínos, neboť tyto metody jsou zaměřeny především na modelování kongescí a dopravního chování řidičů (objížďení úseků s kongescemi). Toto není v prostředí VHOD s pevně stanoveným vedením linek a jízdním řádem prakticky možné. Zpoždění způsobená kongescemi je nutno zohlednit při stanovování vlastních jízdních dob než při linkotvorbě. Prostřednictvím metody AON je možno ve výpočtech uvažovat přímou vazbu mezi nejkratší cestou a přepravními proudy cestujících, která umožňuje získat širší spektrum výsledků.

Úloha lineárního programování pro řešení provázení spojů společným úsekem w je formulována vztahy (5) až (10).

$$\max \sum_r \sum_s \frac{d_{rws}^* \cdot x_{rws}}{n_{rws}^*} \quad (5)$$

za podmínek:

$$x_{rws} \leq n_{rws}^* \quad (6)$$

$$\sum_r x_{rws} + x_{ws} = n_{ws}^* \quad \forall s \in S \quad (7)$$

$$\sum_s x_{rws} + x_{rw} = n_{rw}^* \quad \forall r \in R \quad (8)$$

$$\sum_r \sum_s x_{rws} = n_{sp}^* \quad (9)$$

$$x_{rws} \in N + \{0\} \quad (10)$$

Proměnné x_{rws} vyjadřují počet zavedených přímých spojů na jednotlivých relacích rws (viz obr. č. 2). Počet cestujících bez přestupu na dané relaci vyjadřuje proměnná d_{rws}^* , maximální počet propojitelných spojů na relaci rws stanovených podle příslušné velikosti přepravního proudu cestujících vyjadřuje proměnná n_{rws}^* . Proměnné n_{sp} a n_{sp} vyjadřují počet spojů na přilehlých úsecích snížený o spoje ukončené v okolí řešeného úseku.

ná drws*, maximální počet propojitelných spojů na relaci rws stanovených podle příslušné velikosti přepravního proudu cestujících vyjadřuje proměnná n_{rws}^* . Proměnné n_{sp} a n_{sp} vyjadřují počet spojů na přilehlých úsecích snížený o spoje ukončené v okolí řešeného úseku.

• Sestava kmenových linek

Kmenové linky jsou na základě předchozích dvou kroků stanoveny téměř jednoznačně. Matematicky lze sestavu kmenových linek považovat za sestavu tahů na grafu dopravní sítě. Návrh linek je pak opět nutno konsolidovat dopravním technologem, zejm. díky řadě místních specifik, která jsou mnohdy matematicky velmi těžko obecně vyjádřitelná.

Doplňkové linky

Doplňkové linky jsou v metodě pojímány tak, že jsou sestaveny pouze jejich trasy a rozsah dopravní obslužnosti na nich je stanovován ad hoc pro každou linku. Je to i díky tomu, že dopravní obslužnost dávkového charakteru je těžko vyjádřitelná v makroskopickém proudovém modelu. Ovšem i tak jsou výsledky dopravního modelu stěžejním vstupem pro toto řešení. Tvorba doplňkových linek je založena na modelu distribučního systému [3] řešeném pomocí lineárního programování.

Rozdělení území na sektory

Při řešení linkotvorby v územích malého rozsahu není rozdělení území na části nutné, nicméně u území větších je toto nezbytné z hlediska výpočetní náročnosti sestavené úlohy lineárního programování. Je zpravidla nutná podpora výpočetní techniky a specializovaných softwarových nástrojů (např. IP-solverů).

Území je rozčleněno na sektory podle tras zavedených kmenových linek, které vytvářejí přirozené hranice jednotlivých sektorů. Sektory jsou tak těmito trasami přímo ohraničeny, resp. mohou být ohraničeny i hranicí řešeného území. Princip dělení území je založen na předpokladu, že větší část cest na delší vzdálenosti je vykonána kmenovým subsystémem. Tudíž je díky hierarchii v IDS možné racionalizovat doplňkové linky pouze vzhledem k „okolním“ kme-

novým linkám a nikoli ke všem přepravním okružím (zastávkám) v modelu, čímž je výpočetní náročnost redukována, byť výsledek je z matematického hlediska suboptimální.

Přestupní uzly

Předpokladem tvorby sítě doplňkových linek je, že každá tato linka bude zaústěna do přestupního uzlu (zastávky) linek kmenových, byť v realitě se bude jednat např. i jen o prodloužení vybraných spojů kmenové linky (pásmová obsluha). Klíčové ale je, že obecně k interakci mezi kmenovou a doplňkovou linkou musí dojít vždy.

Na druhou stranu je třeba konstatovat, že díky obecně velkým infrastrukturálním nákladům, resp. i v případě možnosti zřízení nových zastávek, je počet možných umístění přestupních uzlů konečný. Proto je řešení pojato jako diskretní problém.

Množina možných přestupních uzlů tak musí být předem vybrána. Zařazením nebo nezařazením uzlu do množiny je zároveň možno i ošetřit, která místa přestupním uzlem být mohou a která nikoli (např. z hlediska norem, veřejného zájmu, ale i třeba z důležitosti hlediska aplikace periferického JŘ).

U každého takto vybraného přestupního uzlu musí být provedena analýza tudy procházejících nejkratších cest a počtů cestujících na těchto nejkratších cestách. Jedná se o nejkratší cesty, které mají zdroj nebo cíl v řešeném sektoru.

Sestava tras doplňkových linek

Předpokládá se přiřazení každé obsluhované obce (místa) v řešeném území jednomu přestupnímu uzlu, kam bude tato obec napojena doplňkovou linkou. Pokud obec leží na průsečíku komunikací v řešeném území nebo pokud to vyžadují jiné okolnosti, je možné podmínku obsluhy pouze jednou linkou (12) individuálně upravit (13) a umožnit tak vznik dalších přestupních uzlů doplňkových linek uvnitř řešeného území. Úloha zároveň obsahuje podmínky návaznosti (14) tak, aby na základě získané posloupnosti obsluhovaných obcí mohla být linka vytvořena. Kritériem úlohy (11)-(15) je počet cestujících, kteří hranice řešeného sektoru překročí v přestupním uzlu, který je součástí jejich nejkratší cesty.

$$\max \sum_{m \in J_A} \sum_{p \in P} n_{m,p}^g \cdot x_{ip} \quad (11)$$

za podmínek:

$$\sum_{p \in P} x_{ip} = 1 \quad \text{pro každé } i \in J_N \quad (12)$$

$$1 \leq \sum_{p \in P} x_{ip} \leq l, \quad \text{pro každé } i \in J_U \quad (13)$$

$$x_{ip} \leq x_{i,p} \quad \text{pro každé } i \in J_A, \quad (14)$$

$$x_{ip} \in \{0, 1\} \quad (15)$$

Skutečnost, zda-li bude místo (obec) i obsluhována přes uzel p určuje bivalentní proměnná x_{ip} . Maximální počet zaústěných linek do uzlu dopravní sítě s větším stupněm než 2 (stanoveno s přihlédnutím k místním podmínkám) je označen li. Množina takových uzlů je označena JU. Množina obcí, které nemají charakter uzlu je označena JN a množina obsluhovaných míst v řešeném sektoru celkem JA. Za proměnnou $x_{i,p}$ se uvažuje jedna z ostatních bivalentních proměnných x_{ip} , která v tomto případě určuje, zda li předchůdce místa (obce) i na nejkratší cestě z přestupního uzlu p je obsluhován přes přestupní uzel p. Touto podmínkou je zajištěno, aby obsluhované obce vytvořily potřebnou posloupnost tak, aby mohly být obsluženy takto navrženou linkou.

Podkladem jsou opět výstupy dopravního modelu, týkající se vedení nejkratších cest (viz kap. *Provázání spojů v uzlech*), resp. jejich zpracování vč. skalárního součnu s OD maticí.

Rozsah provozu na doplňkových linkách

Závěrem je třeba rozhodnout o formě zajištění dopravní obsluhy na takto vytvořených (trasovaných) doplňkových linkách. Vždy tak musí být učiněno s ohledem na místní podmínky, kdy je možné v řešení zohlednit např. disponibilní počet vozidel, skladbu vozového parku, možnost přechodu vozidla z kmenové linky na linku doplňkovou, možnost obsluhy více linek jedním vozidlem, požadavky spojené s JŘ, nasazení vozidel o odpovídající obsaditelnosti, aplikace specifických forem zajištění dopravní obslužnosti atd.

Posouzení návrhu řešení modelem

Přijatý návrh řešení je ještě nutné komplexně posoudit ve vlastním dopravním modelu, kdy do tohoto modelu jsou vloženy i navržené linky (již ne modelování přepravních proudů cestujících bez linek). Zároveň tak lze zde posoudit i všechny úpravy učiněné nad rámec výše uvedeného postupu, vzniklé např. z ekonomických, provozních důvodů, ale také třeba díky zohlednění místních specifík. V případě konstrukce modelu jako multimodálního je možné sledovat i vývoj ukazatele dělby přepravní práce (modal split).

Závěr

Uvedený postup je navržen tak, aby při tvorbě linkového vedení byla zohledněna jak vlastní poptávka cestujících po přepravě, tak i změněný přístup spojený s tvorbou IDS ve smyslu tvorby hierarchizované struktury linek.

Zároveň je nutno podotknout, že tento postup poskytuje jen výchozí řešení k dalším diskuzím a jednáním, neboť např. ekonomické, ale i některé další aspekty pro-

vozu VHOD jsou zahrnuty pouze okrajově. Řešení bez dalších posouzení není možné považovat za finální i z toho důvodu, že při zjišťování VHOD působí i řada dalších místních a často velmi specifických faktorů. Tyto faktory jsou na takto obecné úrovni matematicky těžko zohlednitelné, ale v realitě praktického provozu k nim přihlédnuto být musí.

Aplikací uvedeného postupu na případ inspirovaný praxí v rámci [2] byla prokázána jeho funkčnost pro řešení praktických problémů.

Recenzent textu: Doc. Ing. Karel Sellner, CSC.

Tento příspěvek byl zpracován s podporou
Institucionálního záměru MŠM 0021627505
„Teorie dopravních systémů“.

Použitá literatura:

- [1] ČERNÁ, A. – ČERNÝ, J.: *Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech*. Pardubice: Institut Jana Pernera, 2004, 150 s., 1. vyd. ISBN 80-86530-15-9.
[2] BULÍČEK, J.: *Lokace přestupních uzlů v integrovaných dopravních systémech ve vazbě na linkotvorbu*. Disertační práce, školitel Mojžíš, V. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010, 120 s. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/36132>.
[3] JANÁČEK, J.: *Optimalizace na dopravních sítích*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilíně, 2006, 2. prepracované vydání, 248 s. ISBN 80-8070-586-0.

Ing. Josef Bulíček,
Prof. Ing. Vlastislav Mojžíš, CSC.
Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Zaujalo nás

Vysokým počtem nehod o prázdninách a celkovou problematikou dopravy se má zabývat expertní komise, která v těchto dnech vzniká ve spolupráci ministerstev dopravy a vnitra.

ČTK to řekl mluvčí ministerstva dopravy Karel Hanzelka. Komise by měla mít přibližně 15 členů a povede ji poslanec a dopravní expert Stanislav Huml. Pracovat začne pravděpodobně počátkem září. Od počátku letošních prázdnin, které začaly na některých školách už 25. června, zemřelo na silnicích k dnešnímu dni podle předběžných policejních statistik 103 lidí. Tragické nehody neměly podle dopravních policistů společného jmenovatele. Řidiči se podle policistů chovají zkratkovitě a zhoršila se i jejich disciplína.

Haló noviny, 22. 7.

připravuje (kal)