Problematika čekacích dob a zastavování ve veřejné hromadné dopravě

Martin Jacura, Lukáš Týfa
České vysoké učení technické v Praze Fakulta dopravní, Ústav dopravních systémů
e-mail: jacura@fd.cvut.cz, tyfa@fd.cvut.cz

Abstrakt

The paper submitted focuses on the issue of waiting times between connections (within the same or two different modes of transport) as well as a number and distance of halts on a certain transport line. This area, however, lies very often on the outskirts of experts' interest. The paper describes optimal waiting period between connections – solution of waiting for connections in extraordinary cases (delays) as well as a number of halts on public transport lines. It aims at drawing attention to this issue and outlining further steps to be undertaken in its investigation.

1. Důležitost popisované oblasti

Specifickou a zároveň velmi závažnou problematikou veřejné hromadné dopravy (VHD) je zajištění přestupních vazeb mezi jejími jednotlivými linkami (stejných nebo odlišných druhů dopravy) a jejich řešení při vzniku nepravidelností. V současnosti je v ČR vytváření návazností v přestupních uzlech doménou železniční dopravy a objevuje se v rámci integrovaných dopravních systémů (IDS). Tato skutečnost je cestujícími kladně hodnocena a mnohdy u nich rozhoduje o volbě druhu dopravy. Při provozních mimořádnostech jsou přestupní vazby obvykle po stanovenou dobu zachovávány, ale ze strany koordinátorů IDS, resp. objednatelů VHD (Ministerstvo dopravy, kraje), však stále častěji zaznívají požadavky na jízdu spojů přesně podle jízdního řádu, tzn. bez čekání na zpožděné přípoje. S rozvojem IDS a integrálního taktového grafikonu tak nabývá na významu otázka, kdy je výhodné přípoje zachovat. V současnosti se v koncepční fázi nastavuje maximální doba čekání na přípoj mezi jednotlivými linkami, resp. spoji, VHD podle zkušeností tvůrců jízdních řádů a podle požadavků objednavatelů závazků veřejné služby.

Velmi aktuální a častá diskuse mezi dopravci, objednateli VHD (vč. obcí) probíhá již několik let v ČR ohledně míst zastavení na jednotlivých linkách, resp. spojích. K tomu se ještě přidává tlak ze strany obcí na vybudování nových zastávek pro zlepšení dopravní obsluhy jejich území. Je však nutno si uvědomit, že každé zastavení prostředku VHD (vlaku, autobusu) přináší kromě zkrácení docházkové vzdálenosti pro cestující také mnohá negativa: vyšší energetickou spotřebu (ztráty při brždění a nárůst energie při rozjezdu z klidu), větší opotřebení některých částí vozidel, delší cestovní dobu pro cestující, kteří zastávkou projíždějí, a delší oběh dopravních prostředků a provozního personálu dopravce.

Jde „pouze" o úvodní popis dané oblasti, který upozorní na její důležitost a nastíní další postup jejího zkoumání. V druhé kapitole je proto nastíněn teoretický základ řešení problematiky přestupních vazeb, a to stanovení mezní (optimální) čekací doby mezi přípoji při zpoždění spoje, na nějž navazují další. V kapitole třetí je možné se dočíst v podobném duchu o rozhodování o počtu, resp. rozmístění, zastávek na lince VHD s ohledem na atraktivitu linky pro cestující.

2. Čekací doby mezi linkami veřejné hromadné dopravy

Problematika dodržení přípojových vazeb je, zejména dnes, velice citlivá. Na jedné straně stojí zastánci jízdy přesně podle jízdního řádu, kteří dogmaticky odmítají sebemenší čekací doby na z jakéhokoli důvodu opožděný spoj, na druhé straně jsou stoupenci zásady, že spolehlivost a přitažlivost VHD je dána čekáním vždy a na všechny spoje. Stejně jako v jiných praktických případech i zde leží optimální řešení někde mezi oběma krajními názory.

Při určení čekací doby je zapotřebí hledat nejvyšší míru užitku pro cestujícího. Na jedné straně budou výrazně poškozeni cestující vyčkávající v přestupním bodě v dopravním prostředku na opožděný spoj a nastupující v nácestných zastávkách do zpožděného spoje. Na druhé straně je způsobena újma cestujícím, kteří přijíždějí do přestupní stanice v opožděném spoji a ztráta přípoje pro ně znamená zpoždění v cílové zastávce v řádu minut až hodin (podle intervalu a počtu dalších přestupů).

Nelze opomenout fakt, že pro minimalizaci čekacích dob hovoří tzv. lavinový efekt, jenž je zpožděním prvního spoje vyvolán. Jsou-li ve všech přestupních stanicích striktně zachovány přestupní vazby, pak lze s určitou nadsázkou tvrdit, že zpoždění např. vlaku na Šumavě se promítne až v Beskydech. Na jednokolejných tratích se může v důsledku omezených možností křižování projevovat zpoždění jednoho spoje v provozních nepravidelnostech dokonce ještě několik hodin.

2.1 Mezní čekací doba

Autoři se v této kapitole pokusili naznačit formální přístup k určení mezní (optimální) doby čekání přípoje na zpožděný spoj. Je možné vytvořit mnoho matematických funkcí, které by nějakým způsobem kvantifikovaly újmu, která vznikne cestujícím buď čekajícím při přestupu na další návazný spoj, když jim podle jízdního řádu plánovaný vlak nebo autobus ujel (skupina „příjezdová“), nebo těm, kteří – z jejich pohledu zbytečně – čekají v dopravním prostředku na přestupující cestující ze zpožděného spoje jiné linky (skupina „odjezdová“).

Uvedenou situaci lze popsat veličinami s finančními jednotkami, ale autoři pro jednoduchost a názornost prozatím zvolili součin počtu osob a doby čekání. Protože je nutné ještě přihlédnout k tomu, že formální vztah by měl být obecně použitelný jak pro cesty v rámci MHD, tak také VHD v regionu nebo v rámci státu, přistupuje do navrhované funkce ještě tzv. koeficient citlivosti cestujícího na zpoždění, tj. různá míra akceptování různě velkého zpoždění pro různě dlouhé cesty (podrobněji viz podkapitola 2.2). Matematický výraz má tedy podobu (1).

$$F = O \cdot t_{cek} \cdot c \tag{1}$$

kde: F – újma vzniklá cestujícím zpožděním [os·min]
O – počet osob ve spoji cestujících stejnou celk. cestovní dobu [os]
t_{cek} – doba čekání (podrobněji vysvětlena dále) [min]
c – koeficient citlivosti cestujícího na zpoždění [-]: $0 < c < 1$

Při učení mezní doby zpoždění, při které se z hlediska újmy cestujících vyplatí ještě čekat v přestupním bodě na zpožděný spoj, vychází autoři z porovnání funkce F ve dvou extrémních případech. První krajní situace nastane tehdy, když v přestupním bodě nebude přípojný spoj nikdy čekat. V tom případě budou cestující ve spoji, který do přestupního budu přijel (skupina „příjezdová“), čekat na další spoj návazné linky dobu t_{cek}, která je rovna linkovému (příp. traťovému) intervalu navazující linky VHD zkrácenému o zpoždění, tj. čas zbývající do pravidelného odjezdu navazujícího spoje. K druhému meznímu případu dojde tehdy, když naopak přípojný spoj čeká vždy na příjezd spoje, pro nějž je přípojem. Pak je postižena skupina „odjezdová“ a dobou čekání t_{cek} je pro ni právě doba zpoždění spoje, na nějž se čeká v přestupním bodě, protože o tento čas musí cestující této skupiny déle trávit čas v dopravním prostředku VHD.

Dále je nutno vzít v úvahu skutečnost, že obě uvedené skupiny jsou nesourodé z pohledu délky cesty, a tak podle výše uvedené zásady bude i jejich citlivost na zpoždění rozdílná. Proto bude funkce újmy obou skupin cestujících F vždy součtem součinů koeficientu citlivosti podle celkové cestovní doby určité části cestujících a příslušného počtu osob v této skupině.

Upřesněná podoba výrazu (1) tedy odpovídá vztahům (2) a (3).

$$F_{prij} = (i - t_z) \cdot \sum_{(j)} O_j \cdot c_j \qquad (2)$$

$$F_{odj} = t_z \cdot \sum_{(k)} O_k \cdot c_k \qquad (3)$$

kde: F_{prij} – újma vzniklá „příjezdové“ skupině cestujících [os·min]
F_{odj} – újma vzniklá „odjezdové“ skupině cestujících [os·min]
i – linkový interval přípojné linky (příp. traťový interval) [min]
t_z – doba zpoždění [min]: $t_z < i$

Mezní doba zpoždění se tedy spočte z rovnosti pravých stran výrazů (2) a (3):

$$(i - t_{z,mez}) \cdot \sum_{(j)} O_j \cdot c_j = t_{z,mez} \cdot \sum_{(k)} O_k \cdot c_k \qquad (4)$$

$$\Rightarrow \quad t_{z,mez} = \frac{\sum_{(j)} O_j \cdot c_j}{\sum_{(j)} O_j \cdot c_j + \sum_{(k)} O_k \cdot c_k} \cdot i \qquad (5)$$

kde: $t_{z,mez}$ – mezní doba zpoždění [min]

Výraz (5) lze interpretovat tak, že mezní doba zpoždění je takovým dílem intervalu přípojné linky, který je roven podílu redukovaného počtu cestujících (počet cestujících násobený koeficientem citlivosti cestujících na zpoždění) „příjezdových“ na celkovém počtu cestujících v obou spojích (tj. „příjezdovém“ i „odjezdovém“).

2.2 Koeficient citlivosti cestujícího na zpoždění

Předpokládá se, že tolerance na délku zpoždění cestujícími roste s délkou přepravní cesty – čím kratší je celková cestovní doba, tím kratší zpoždění považují cestující za přijatelné. Pravděpodobně bude mít na tuto citlivost vliv i pravidelnost cesty, ale zjednodušeně je možné tvrdit, že ta bude klesat úměrně s cestovní dobou. Přesné vyjádření závislosti tolerance na cestovní době bude předmětem dalšího zkoumání. Prozatím se autoři domnívají, že jejímu grafickému zobrazení se nejvíce podobá tzv. logistická křivka (S-křivka)[1].

Jestliže nezávislou proměnnou bude celková cestovní doba cestujícího a závislou proměnnou míra tolerance zpoždění cestujícím, tak se dá empiricky předpokládat, že při krátké cestovní době cestující zpoždění nestrpí (míra tolerance na zpoždění bude těsně nad nulovou hodnotou), s rostoucí celkovou cestovní dobou

[1] Logistická funkce se používá pro popis výkonnosti technického systému nebo poptávky po drahém spotřebním zboží v čase. Jde o dvě exponenciály spojené v inflexním bodě v hladkou křivku ve tvaru písmene „S“, která má dvě vodorovné asymptoty. Funkční hodnoty logistické křivky se zvyšují nejprve pozvolna, v okolí inflexního bodu rostou velmi výrazně, poté významně na růstu ubírají a pomalu se přibližují k horní asymptotě.

pak bude citlivost na zpoždění relativně rychle opadat a od určité velmi dlouhé celkové cestovní doby už se nebude téměř měnit a bude skoro neznatelná.

Logistická křivka má více matematických forem (vzájemně ekvivalentních), jednu z variant pro určení míry tolerance zpoždění cestujícím představuje výraz (6). Aby dosazení míry tolerance do funkce újmy cestujících ze zpoždění *F* odpovídalo logice skutečnosti (funkce *F* nabývá tím větších hodnot, čím je větší negativní vliv na cestující ze zpoždění), tedy aby koeficient citlivosti cestujícího byl největší při minimální míře jeho tolerance zpoždění, je nutné provést převod z veličiny míra tolerance na proměnnou koeficient citlivosti cestujícího podle vztahu (7).

$$C = \frac{q}{1 + a \cdot b^{t_{celk}}} \quad (6)$$

$$c = 1 - C \quad (7)$$

kde: C – míra tolerance zpoždění cestujícím [-]: $0 < C < 1$
c – koeficient citlivosti cestujícího na zpoždění [-]: $0 < c < 1$
q – horní asymptota logistické funkce [-]: $q = 1$
a – parametr logistické funkce [-]: $a > 1$
b – parametr logistické funkce [-]: $0 < b < 1$
t_{celk} – celková cestovní doba cestujícího [min]

Určení obou neznámých parametrů logistické funkce *a* a *b* je možné pouze na základě regresní analýzy výsledků průzkumu mezi cestujícími, což bude předmětem dalšího výzkumu.

V železniční dopravě jsou přípojové vazby dlouhodobě zažité. Existují základní čekací doby (*EC*, *IC*, *Ex* jen na vlaky stejné kategorie – 5 min; *R*, *Sp* – 5 min; *Os* – 10 min) a odchylná výměra čekací doby, kdy jde buď o její prodloužení (nejbližší spoj týmž směrem jede až za dlouhou dobu, existuje pravidelná silná přestupní frekvence), nebo naopak o přestupní doby nulové – „vlak nečeká na žádné přípoje“ (u taktového grafikonu s intervalem obvykle 30 min a méně, nezbytná jízda vlaku včas např. s ohledem na další přípoje, minimální přestupní frekvence apod.). Jistým extrémem je pak situace tzv. „čeká vždy“, což se objevuje zejména u posledních večerních spojů. Zatím jsou autoři toho názoru, že čekací doba na zpožděný spoj by neměla přesáhnout polovinu linkového intervalu. Pokud interval mezi následnými spoji téhož směru a stejné cílové stanice klesá pod 30 min včetně, lze oprávněně prosazovat čekací dobu blízkou nule (s ohledem na propustnost trati).

3. Četnost zastavování linky veřejné hromadné dopravy

Jak již bylo naznačeno v úvodní kapitole, zvýšení četnosti zastavení spojů na určité lince přináší na jedné straně zlepšení dostupnosti VHD pro obyvatele a návštěvníky příslušné lokality, na druhé straně však zvyšuje náklady dopravce a zároveň snižuje atraktivitu linky pro cestující, kteří projíždějí mnoha místy zastavení tím, že se jim s každým zastavením vozidla prodlužuje cestovní doba. Obecným řešením popsaného problému je zavedení více linek na dané trase s různou četností zastavování a dodržování zásady, že čím je četnost zastavování linky větší (tj. průměrná vzdálenost mezi místy zastavení kratší), tím je celková délka linky kratší.

V této kapitole bude dále naznačen obecný exaktní přístup k řešení této oblasti, který se skládá z několika kroků. Nejprve je nutné matematicky popsat tarif dopravce, resp. IDS, poté přibližně stanovit počet cestujících, kteří budou přepraveni mezi každými dvěma místy zastavení, a následně lze porovnat tržby dopravce s jeho náklady. Dále se pro zjednodušení počítá s tím, že kapacita dopravních prostředků, resp. souprav, je dostatečná pro frekvenci všech potenciálních nácestných zastávek.

3.1 Tarif veřejné hromadné dopravy

Ke stanovení výše tržby dopravce je nutné popsat jeho tarif. Hledá se tedy závislost jednotkové ceny na ujeté vzdálenosti nebo na počtu projetých tarifních pásem (zón). Za axiom v této souvislosti autoři považují fakt, že s rostoucí přepravní vzdáleností bude jednotková cena klesat. To je možné zdůvodnit jednak fixními náklady dopravce vzniklými s přepravou bez ohledu na ujetou vzdálenost, které se musí „rozpustit“ do jednotkové ceny, a jednak marketingovým tahem, kterým se dopravce snaží zvýšit své výkony, a tak poskytuje cestujícímu množstevní slevu (v tomto případě se považuje za množství tarifní vzdálenost). Otázkou tedy je, jak tarif v osobní VHD namodelovat co nejvěrněji podle praxe. Pokles jednotkové ceny za přepravu se nepředpokládá konstantní (tj. nepřímo úměrný), a tak autoři tohoto článku považují exponenciální nebo logaritmickou klesající funkci za vhodný obraz průběhu závislosti jednotkové ceny na přepravní vzdálenosti – viz (8) a (9).

$$k = \frac{K_{\max}}{a^{l}} \tag{8}$$

$$k = -a' \cdot \ln l + b' \tag{9}$$

kde: k – cena za přepravu na jednotkovou vzdálenost (např. [Kč/km])
l – přepravní vzdálenost nebo počet pásem IDS (např. [km])
K_{max}, a, a', b' – parametry funkcí

Aby obě funkce splnily požadavek na klesající průběh a aby byly funkční hodnoty kladné v dostatečné šíři definičního oboru (definičním oborem v obou případech budou nezáporná reálná čísla nezávislé proměnné l), musí být pro konstanty stanoveny následující podmínky: a, $a' > 1$ (funkce musí být klesající) a K_{max}, $b' > 0$ (kladné funkční hodnoty). Logaritmická funkce je výhodná v tom, že osa funkčních hodnot je asymptotou, ale její nevýhodou je protnutí osy definičního oboru (byť vhodnou volbou konstant v dostatečně velké hodnotě). Exponenciální funkce má přednost v tom, že osa definičního oboru je její asymptotou. Z tohoto důvodu se jeví pro popis tarifu jako výhodnější funkce exponenciální. Konstanty obou funkcí se mohou stanovit například regresní analýzou na základě znalosti tarifu dopravce.

3.2 Odhad přepravních proudů cestujících

Stanovit počet přepravených cestujících mezi zadanými dvěma místy jakýmkoli prostředkem VHD je sám o sobě velmi složitý úkol vyžadující velké množství vstupů, značné zkušenosti, kalibraci obecných modelů a zafixování mnoha proměnných. V kontextu úvodu kapitoly 3 byla hledána vazba pouze mezi počtem přepravených cestujících a cestovní dobou mezi dvěma libovolnými místy zastavení. Tento přístup mimo jiné předpokládá nezávislost (nulovou elasticitu) na ceně za přepravu, resp. model už v sobě musí tento vliv zahrnovat. Také je možné usuzovat na to, že počet přepravených cestujících bude růst s klesajícím linkovým intervalem (zvyšující se atraktivitou VHD), což rovněž není v následujícím výpočtu zahrnuto.

Stejně jako pro jednotkovou cenu, tak i pro závislost množství cestujících na cestovní době musí empiricky platit, že je klesající. Autoři opět předpokládají, že prozatím nejlepším modelem bude klesající exponenciální funkce (10).

$$O = \frac{O_{\max}}{A^{t}} \tag{10}$$

kde: O – počet přepravených cestujících [os]
t – cestovní doba [min]
O_{max}, A – parametry funkcí: $O_{max} > 0$, $A > 1$

S ohledem na různý přepravní potenciál dvou obecných míst se zastavením linky VHD bude veličina O_{max} považována za proměnnou stejně jako cestovní doba. Hodnotu obou parametrů funkce (10) je obtížné stanovit – nabízí se pouze vlastní přepravní průzkum, vyhodnocení sčítání cestujících na již provozovaných linkách nebo analýza ankety mezi cestujícími.

3.3 Porovnání tržeb a nákladů dopravce

Jestliže se bude předpokládat klasické tržní prostředí, tj. provozování VHD na podnikatelské riziko dopravce, musí platit vztah (11), aby bylo provozování spoje pro dopravce rentabilní.

$$R \geq D + Z \tag{11}$$

kde: R – tržba z přepravy cestujících (výnosy dopravce)
D – náklady dopravce na provozování spoje
Z – zisk dopravce před zdaněním

Tržbu dopravce získanou z přepravy cestujících lze s využitím zásad popsaných v předchozím textu zapsat výrazem (12).

$$R = O \cdot l \cdot k \tag{12}$$

Stanovit náklady dopravce na určitý spoj lze zjednodušeně vztahem (13).

$$D = d_l \cdot l + d_t \cdot t + d_z \cdot n \tag{13}$$

kde: d_l – náklady na ujetí jednotkové vzdálenosti (např. [Kč/km])
d_t – náklady na provoz za jednotku času (např. [Kč/h])
d_z – zvýšení provozních nákladů v důsledku jednoho zastavení na zastávce
n – počet mezilehlých zastávek spoje (tedy vyjma výchozí a konečné)

Jestliže se na určitém spoji označí místa zastavení postupně od výchozí zastávky přirozenými čísly začínajícími jedničkou, je možné náklady a výnosy dopravce zapsat výrazy (14) a (15).

$$R = \sum_{[i,j] \in M} \frac{O_{\max,ij}}{A^{t_{ij}+(j-i-1)\cdot t_z}} \cdot l_{ij} \cdot \frac{K_{\max}}{a^{l_{ij}}} \tag{14}$$

$$D = d_l \cdot l_{1,n+2} + d_t \cdot \left(t_{1,n+2} + t_z \cdot n\right) + d_z \cdot n \tag{15}$$

kde: i,j – pořadové číslo místa zastavení
M – množina všech možných dvojic míst zastavení[2]
t_z – časová ztráta vzniklá zastavením na zastávce (brždění, rozjezd, nástup a výstup cestujících)

Vzájemným porovnáváním nákladů a výnosů pro různé počty a místa zastavení je možné určit ty varianty rozmístění zastávek, kdy je provozování daného spoje pro dopravce ekonomicky efektivní.

4. Závěr

Toto pojednání mělo zejména upozornit na závažnost zmíněné problematiky a na možnosti využití exaktních postupů pro řešení praktických problémů. Detailní rozpracování popsané oblasti je autory plánováno na nejbližší léta. Nejprve bude řešena oblast železniční dopravy, později se rozšíří na celou oblast VHD.

Příspěvek byl zpracován za podpory grantu MSM 6840770043.

[2] Počet prvků množiny M (uspořádané dvojice pořadových čísel míst zastavení) je roven polovině variace 2. třídy z celkového počtu zastávek (n+2) bez opakování, tj. ½·(n^2+n-2).