Ostře sledované tramvaje

Ondřej Nevěřil, Otakar Vítek

Gymnázium Zábřeh; Gymnázium Brno, třída Kapitána Jaroše 14

- Zabýváme se statistickou charakteristikou zpožďování tramvají a dopadem na cestovní dobu.
- Zkoumáme fenomén bus bunchingu, aneb souběžné jízdy více dopravních prostředků stejné linky bezprostředně po sobě.
- Pomocí numerických simulací stanovíme, jaká je z pohledu cestujícího optimální jízdní doba dopravních prostředků, a přímým pozorováním pražské dopravy určíme, jaký má fenomén bus bunchingu dopad na pražské cestující.

Úvod

Při analýze zpoždění tramvajových linek využíváme základní statistické charakteristiky. Střední hodnotu náhodné veličiny X značíme $\langle X \rangle$.

Variance

$$\mathrm{var}(X) = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 \tag{1}$$

udává míru kolísání hodnot kolem průměru. Kovariance

$$\mathrm{cov}(X, Y) = \langle XY \rangle - \langle X \rangle \langle Y \rangle \tag{2}$$

charakterizuje vzájemnou závislost veličin. Autokovarianci definujeme jako

$$\mathrm{autocov}(X) = \mathrm{cov}(x_i, x_{i+1}). \tag{3}$$

Čekací doba cestujícího je čas mezi příchodem na zastávku a odjezdem nejbližšího spoje. Pro interval mezi spoji I a zpoždění Z platí

$$T_c = \frac{I}{2} + \frac{2}{I}\big(\mathrm{var}(Z) - \mathrm{autocov}(Z)\big). \tag{4}$$

Růst variance zpoždění vede k prodlužování čekací doby, což motivuje studium dynamiky zpoždění.

Zpoždění modelujeme jako náhodnou veličinu. Doba nástupu cestujících je popsána vztahem

$$T_p = \frac{(t_2 - t_1)pc}{1 - pc}, \tag{5}$$

kde t_1 a t_2 jsou časy odjezdu a příjezdu dvou po sobě jdoucích spojů a parametry p, c určují intenzitu příchodu cestujících a rychlost nástupu.

Metody

Model předpokládá, že tramvaj odjede pouze tehdy, pokud:

1. odjela předchozí tramvaj,
2. nastoupili všichni čekající cestující,
3. nastal čas odjezdu podle jízdního řádu.

Doba pobytu odpovídající jízdnímu řádu je

$$t_j = T + Ipc, \tag{6}$$

kde T je jízdní doba mezi zastávkami. Pokud tramvaj nabere zpoždění δ, pak se na každé další zastávce zvětší faktorem

$$\frac{1}{1 - pc}, \tag{7}$$

takže po n zastávkách dosáhne hodnoty

$$\delta\left(\frac{1}{1 - pc}\right)^n. \tag{8}$$

Pro ověření modelu jsme vytvořili numerickou simulaci s 20 stejně vzdálenými zastávkami a rovnoměrným příchodem cestujících. Každý úsek měl základní jízdní dobu T_0, která byla náhodně upravována: se šancí 20 % o 0,3 min, s 5 % o 0,6 min, s 1 % o 1,2 min a s 10 % se naopak zkrátila o 0,3 min.

Pevnými parametry byly interval spojů a rychlost nástupu cestujících (p, c). Měnili jsme pouze hodnotu T_0, abychom simulovali jízdní řády s časovou rezervou i bez ní.

Celkem bylo provedeno 10^5 realizací. Sledovali jsme průměrná zpoždění, jejich variance a autokovarianci mezi po sobě jedoucími spoji.

Pro porovnání s reálným provozem byla využita data z linek 17 a 22 získaná z mapy PID během dopravní špičky. Analyzovány byly pouze spoje jedoucí po standardní trase.

Výsledky a diskuse

Simulace ukázaly, že malé časové rezervy v jízdním řádu umožňují tramvajím absorbovat běžná zpoždění bez vzniku nestability provozu. Při větších rezervách jsou zpoždění minimální, avšak za cenu delší cestovní doby.

Pokud jízdní řád odpovídá skutečné době jízdy, i malé poruchy se mohou šířit mezi spoji, zvyšovat průměrné zpoždění a prodlužovat čekací dobu cestujících.

Naopak při příliš napjatém jízdním řádu dochází k akumulaci zpoždění a vzniku *bus bunchingu* (obr. 1).

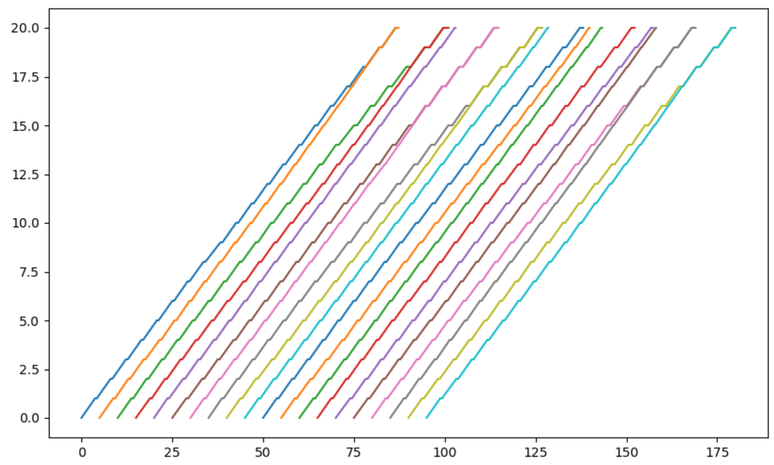

Figure 1. Simulace provozu při $T_0 = 3.75$.

Figure 2. Vývoj průměrného zpoždění (nalevo) a korelačního koeficientu (napravo) v simulaích pro různá T_0.

Naměřená data neumožňují úplné kvantitativní srovnání se simulací, avšak vykazují obdobné tendence. Ve špičce se objevují náznaky shlukování spojů a zvýšené korelace mezi následnými tramvajemi.

Výsledky naznačují, že mírné prodloužení jízdních dob v jízdním řádu by mohlo vést ke stabilnějšímu provozu a kratším čekacím dobám cestujících.

Figure 3. Vývoj průměrného zpoždění (nalevo) a korelačního koeficientu (napravo) u linky 22.

Závěr

Simulace potvrdily, že zpoždění mohou vést ke shlukování spojů (*bus bunching*) a tím prodlužovat čekací dobu cestujících. Tento efekt lze zmírnit zavedením časových rezerv v jízdním řádu.

Analýza reálných dat však neposkytla jednoznačný důkaz tohoto jevu. Možným vysvětlením je, že zpoždění nejsou nezávislá náhodná událost, ale vznikají vlivem přetrvávajících faktorů, jako jsou dopravní situace či mimořádné události.

Budoucí výzkum by se proto měl zaměřit na modelování konkrétních příčin zpoždění. Jejich zahrnutí by mohlo zpřesnit popis provozu a objasnit rozdíly mezi simulací a skutečnými daty.

Reference

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT: Web Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT. Dostupné z: https://fjfi.cvut.cz

Wikipedie: Variance (rozptyl). Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Rozptyl_(statistika)

Mapa spojů Pražské Integrované Dopravy včetně aktuální polohy vozů, jejich zpoždění atd. Dostupné z: https://mapa.pid.cz/

Wikipedie: náhodný proces. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Rozptyl_(statistika)