

ANALÝZA SOUVISLOSTÍ MEZI VYBRANÝMI UKAZATELI JÍZDNÍHO ŘÁDU

Pavel Krýže¹

1. ÚVOD

Podoba jízdního řádu v osobní hromadné dopravě je výsledkem kompromisu mezi kvalitou požadovanou cestujícími na straně jedné a provozními a investičními náklady na straně druhé. Příspěvek se zabývá vztahy mezi třemi ukazateli: čekáním cestujících při přestupech, rozsahem dopravy a krácením cestovních dob, které bylo dosaženo investičními opatřeními. Principiální vztahy mezi těmito veličinami jsou sice zřejmé, kvantifikace těchto vztahů je ale problematická. O ni se v podmínkách dálkové železniční osobní dopravy v České republice pokouší tento příspěvek. Důsledně přitom uvažuje taktový jízdní řád a pro generování variant jízdního řádu využívá genetické algoritmy.

2. GENETICKÉ ALGORITMY

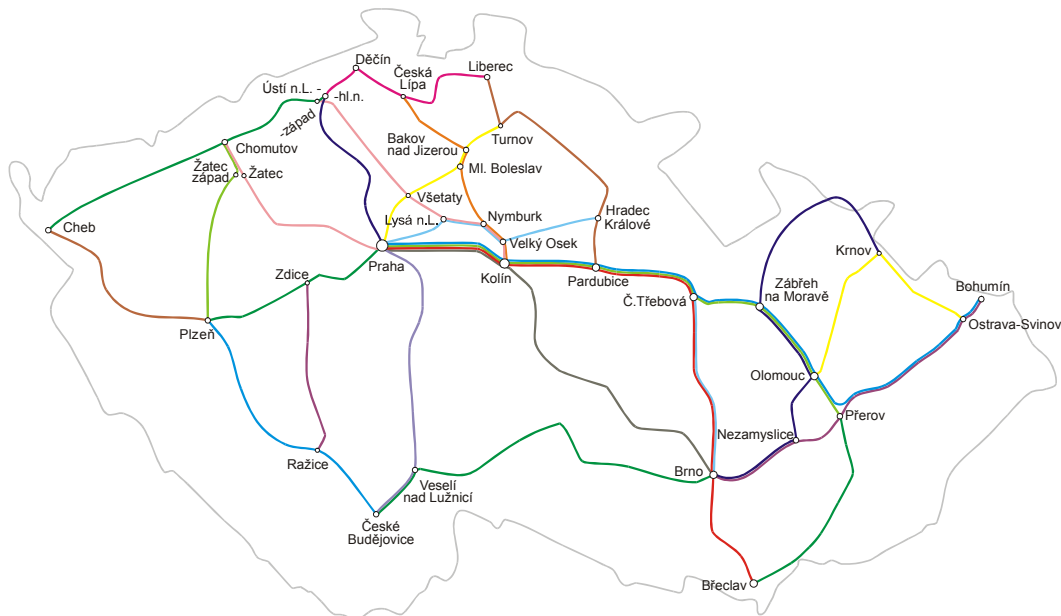
Metoda využívající genetické algoritmy se v několika ohledech liší od klasických optimalizačních metod. Používá náhodný výběr, z čehož vyplývá, že metoda je nedeterministická, a může tedy při každé optimalizaci poskytnout jiné řešení. Během optimalizace si udržuje „populaci kandidátů řešení“. Jen jedno anebo několik z nich je příznivých; ostatní členové populace jsou vzorovými body zkoumaného prostoru, ve kterém může být později nalezeno lepší řešení. To pomáhá vyvarovat se lokálního optima. Periodicky se provádějí náhodné změny (mutace) jednoho nebo více členů populace, a tím se získávají noví kandidáti řešení. Průběžně je vykonávána selekce: nejvhodnější členové populace přežívají a ti nejméně vhodní jsou eliminováni. Nevýhodou metody je, že nelze rozpoznat, zda nalezené řešení je optimální; s tím též souvisí, že metoda nemá pevné pravidlo pro zastavení optimalizace.

Genetické algoritmy lze využít i pro optimalizaci taktových jízdních řádů. V rámci úlohy optimalizace taktového jízdního řádu je definována účelová funkce reprezentující kvalitu daného řešení jízdního řádu a soustava podmínek, která reprezentuje kapacitní omezení, jako jsou následná mezidobí, provozní intervaly anebo nemožnost obsazení jednokolejného úseku protijedoucími vlaky.

¹ Ing. Pavel Krýže, PhD., České dráhy, a.s., Nábřeží L. Svobody 1222, Praha 1, Tel.: +420 606 623 176, E-mail: kryze@gr.cd.cz

3. MODEL DOPRAVY

Zde použitý model dálkové železniční osobní dopravy vychází z modelu vytvořeného již v rámci jiné práce [3]. Je uvažováno 24 linek, jejichž trasy jsou vyznačeny na obrázku 1. Jak je z obrázku patrné, nejsou uvažovány mezinárodní vazby – žádná z tras nepřekračuje státní hranice. Trasování linek a cestovní doby vycházejí z GVD 2004/2005. Jsou sledovány 103 přestupní vazby, přestupní doby jsou uvažovány o velikosti 3 min, ve stanicích s podchody 5 až 7 min. Dále je sledováno 12 úseků, které současně pojíždějí dvě nebo více linek, a je zde tedy třeba respektovat mezi vlaky stejného směru příslušné následné mezidobí.



Obr. 1: Trasy linek zahrnutých do modelu

Zabudovat podmínku nedovoleného současného obsazování jednokolejného úseku dvěma protijedoucími vlaky je principiálně možné, na druhou stranu to znamená výrazný nárůst proměnných a tím i složitosti úlohy, a proto tato skutečnost není sledována. Vychází se z předpokladu, že v jednokolejných úsecích využívaných vlaky dálkové osobní dopravy je četnost míst umožňujících křížování vlaků poměrně vysoká, a tedy posuny tras nutné pro dosažení bezkonfliktnosti jsou relativně malé. V těchto úsecích byly pouze mírně prodlouženy cestovní doby. Realizovaný postup pochopitelně nezaručuje, že nalezené řešení bude z tohoto hlediska reálné, pro ověření by bylo nutno precizně zkonstruovat časové polohy těchto vlaků. Dalším zjednodušením je přísné uplatňování zásady nulové symetrie. Tím pro reprezentaci časových poloh vlaků obou směrů jedné linky postačuje jediná proměnná, neboť časová poloha vlaku jednoho směru přesně určuje polohu vlaku protijedoucího. Tak se počet proměnných reprezentujících časovou polohu vlaku redukuje na polovinu.

Účelová funkce je stanovena následovně:

$$u = a \cdot \Sigma \text{čekání} + b \cdot \Sigma \text{vlkm} + c \cdot \Sigma \text{krácení} \quad (1)$$

kde Σ čekání – celosíťová hodnota čekání cestujících při přestupech za období 60 min

Σ vlkm – průměrný celosíťový výkon ve vlakových kilometrech za 60 min

Σ krácení – celosíťová suma krácení cestovních dob

a, b, c – koeficienty zohledňující váhu daného kritéria; předpokládá se, že $a + b + c = 1$

Celosíťová hodnota čekání cestujících je definována takto:

$$\Sigma \text{čekání} = \sum_i f_i \cdot c_i \quad (2)$$

kde f_i – počet přestupujících cestujících v přestupní vazbě i

c_i – doba čekání nad rámec přestupní doby v přestupní vazbě i

Rozsah dopravy je determinován třemi možnými velikostmi taktového intervalu u každé linky: 120, 60 anebo 30 minut. Počty přestupujících cestujících v jednotlivých relacích (f_i) jsou stanoveny na základě autorova hrubého odhadu. Maximální dovolená hodnota krácení cestovních dob je v každém úseku stanovena na 30% ze stávající cestovní doby.

S pomocí koeficientů a, b, c se převádí dosud vícekritériální úloha na kritérium jediné. Hodnoty těchto koeficientů je vhodné průběžně měnit, lze tak získat různorodější množinu řešení.

Proměnnými úlohy jsou:

- časové polohy vlaků jednotlivých linek – 24 proměnných (1 proměnná pro každou linku)
- velikosti taktových intervalů jednotlivých linek – 24 proměnných (1 proměnná pro každou linku)
- krácení cestovních dob v jednotlivých úsecích – 40 proměnných (1 proměnná pro každý úsek)

Je třeba zdůraznit, že jsou sledovány pouze souhrnné, agregátní ukazatele. To například znamená, že není sledována kvalita konkrétní přestupní vazby, a tedy velmi příznivá hodnota souhrnného ukazatele „ Σ čekání“ nezaručuje, že náhodně zvolená přestupní vazba musí být příznivá rovněž.

4. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

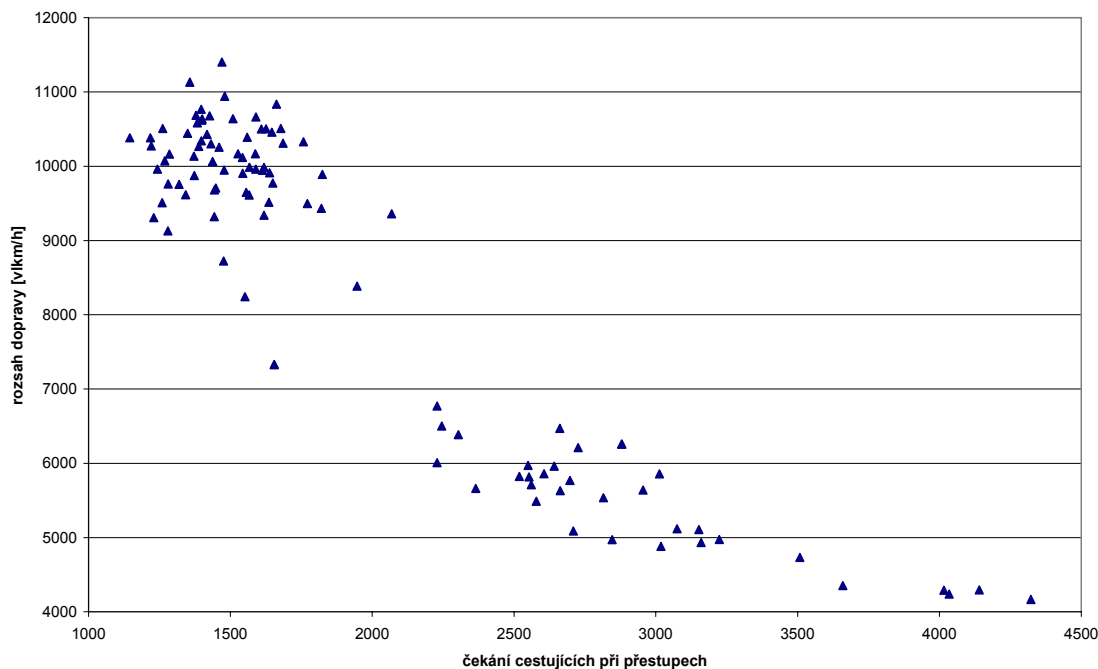
Popsaný model dopravy byl použit pro tři okruhy analýz:

Zkoumání vztahů mezi rozsahem dopravy a čekáním cestujících při přestupech

Účelová funkce v tomto případě vychází ze vztahu (1), z něhož je vypuštěn poslední člen ($c \cdot \Sigma$ krácení) – krácení cestovních dob není uvažováno, hodnoty

cestovních dob jsou ponechány v současné podobě. Počet proměnných je 48. Úloha má dvě souhrnná kritéria: rozsah vlakové dopravy a čekání cestujících při přestupech.

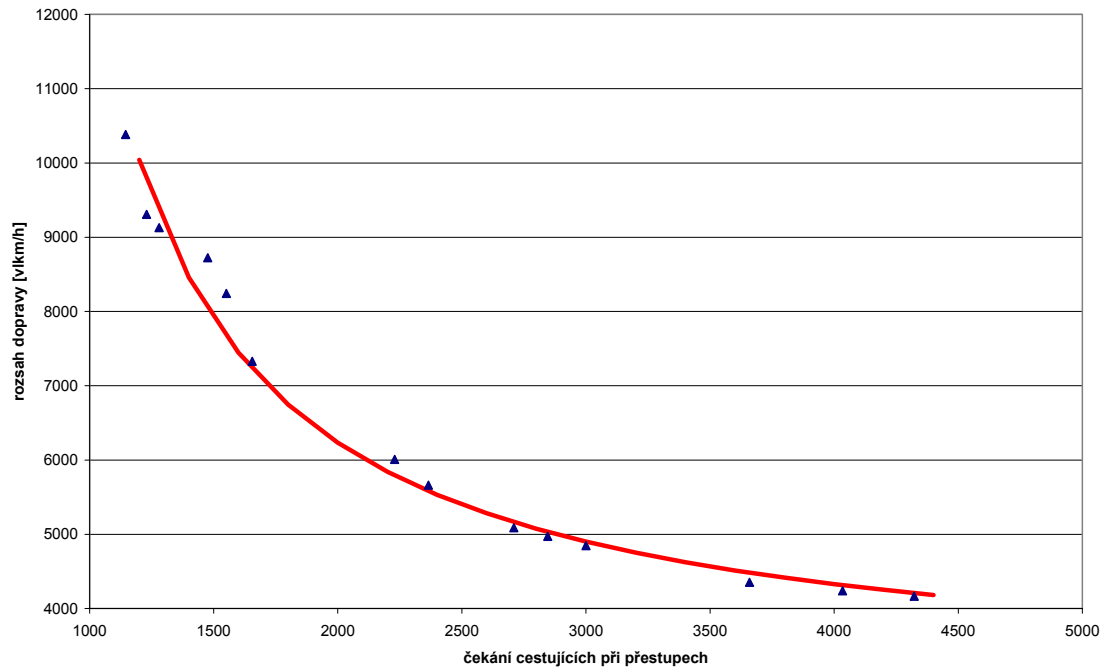
S pomocí genetických algoritmů bylo vyhledáno cca 100 variant jízdního řádu. Výsledky jsou znázorněny na obrázku 2. Každý ze zakreslených trojúhelníků představuje jedno nalezené řešení.



Obr. 2: Nalezená řešení – sledováno čekání cestujících a rozsah dopravy

Nejlepší řešení by bylo takové, které by představovalo nejmenší čekání cestujících, a současně nejmenší rozsah dopravy. Nalezení takového řešení je ale krajně nepravděpodobné a i z obrázku je zřejmé, že opravdu nalezeno nebylo. Proto je užitečné vybrat aspoň paretoovsky optimální řešení. To jsou v tomto případě řešení vyznačující se takovou hodnotou čekání cestujících, která nemůže být zkrácena, aniž dojde k nárůstu rozsahu dopravy (popř. lze vztah vyjádřit naopak: řešení vyznačující se takovým rozsahem dopravy, který nemůže být omezen, aniž dojde k nárůstu čekání cestujících).

Paretoovsky optimální řešení jsou zakreslena na obrázku 3. Současně je do obrázku zakreslena hyperbola, která relativně věrně aproximuje průběh těchto řešení.



Obr. 3: Paretoovsky optimální řešení a jejich aproximace hyperbolou

Hyperbolu lze popsat empiricky odvozeným vztahem:

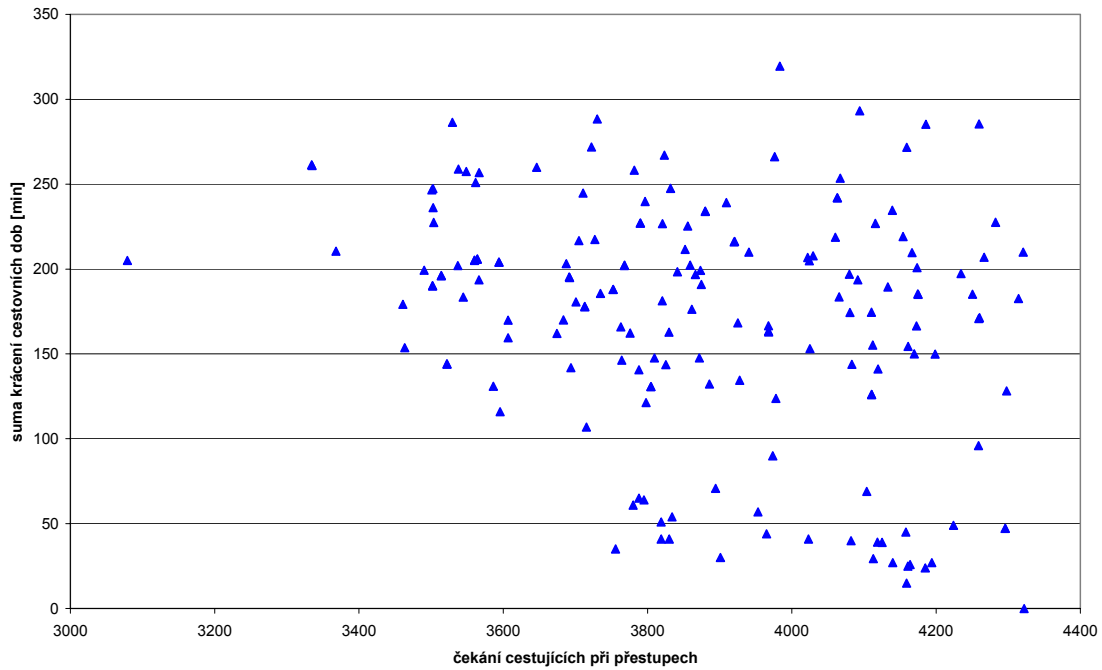
$$\Sigma \text{vlkm} = \frac{5000000}{\Sigma \text{čekání} - 500} + 2900 \quad (3)$$

Zkoumání vztahů mezi krácením cestovních dob a čekáním cestujících při přestupech

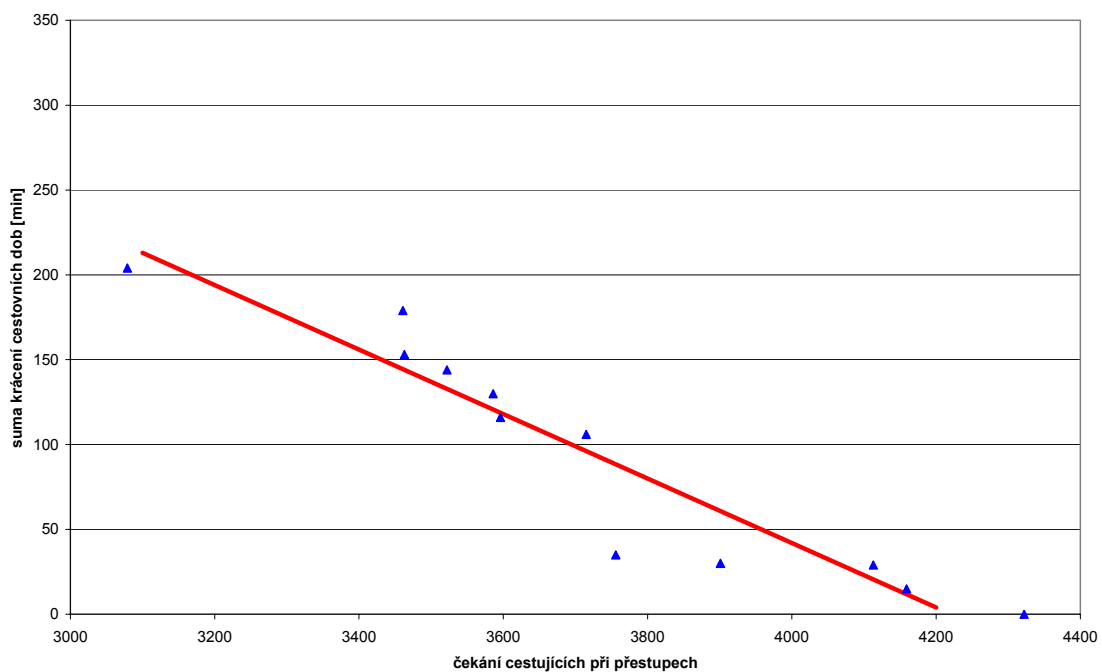
Účelová funkce v této úloze opět vychází ze vztahu (1), tentokrát je z něho vypuštěn druhý člen ($b \cdot \Sigma \text{vlkm}$). V modelu není uvažována změna rozsahu dopravy – na všech linkách je uvažován taktový interval o velikosti 120 min. Počet proměnných je 64. Úloha má opět dvě souhrnná kritéria: krácení cestovních dob a čekání cestujících při přestupech.

V tomto případě bylo vyhledáno přibližně 170 variant jízdního řádu. Výsledky jsou znázorněny na obrázku 4.

Paretoovsky optimální řešení jsou zakreslena na obrázku 5. V tomto případě není nalezení křivky popisující souvislost mezi oběma veličinami tak jednoduché jako v předchozím případě. V obrázku je zakreslena úsečka nalezená s pomocí metody nejmenších čtverců.



Obr. 4: Nalezená řešení – sledováno čekání cestujících a krácení cestovních dob



Obr. 5: Paretovsky optimální řešení a jejich aproximace lineární závislostí

Úsečku lze popsat empiricky odvozeným vztahem:

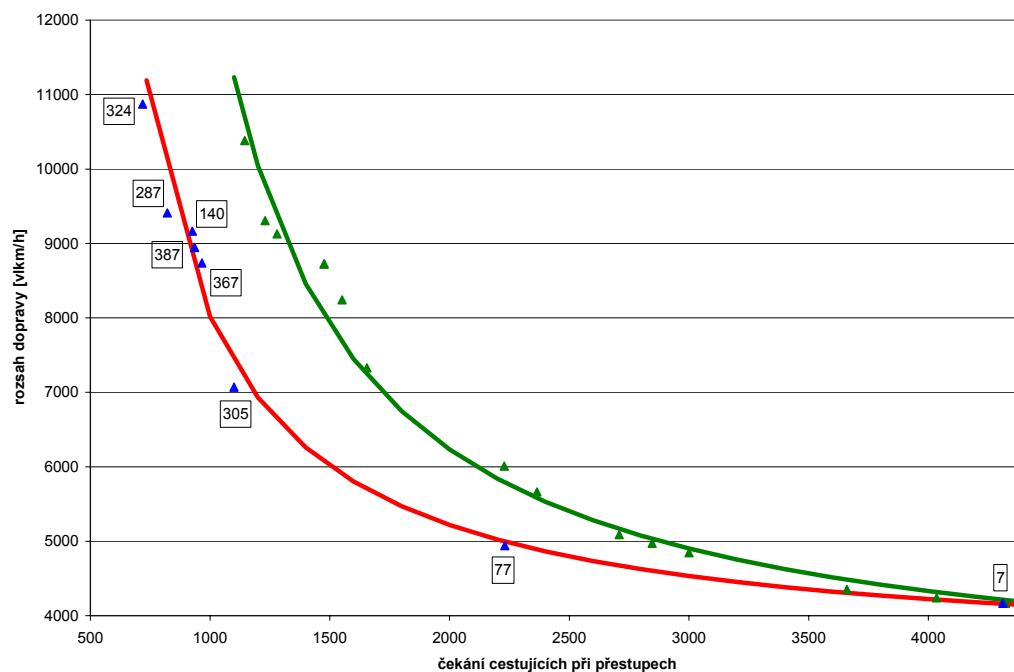
$$\Sigma \text{krácení} = -0,19 \cdot \Sigma \text{čekání} + 802 \quad (4)$$

Zkoumání vztahů mezi rozsahem dopravy, krácením cestovních dob a čekáním cestujících při přestupech

Konečně nastává plné využití účelové funkce uvedené ve vztahu (1). Počet proměnných je 88. Úloha má tři souhrnná kritéria: rozsah dopravy, krácení cestovních dob a čekání cestujících při přestupech.

V tomto případě bylo vyhledáno přibližně 150 variant jízdního řádu. Jak se však následně ukázalo, je to příliš málo výsledků pro provedení zobecnění. Pro tyto účely by pravděpodobně bylo nutné vyhledat počet řešení, který by byl řádově vyšší.

Pro ilustraci jsou vybraná paretoovsky optimální řešení zakreslena na obrázku 6. Hodnoty uvedené u jednotlivých řešení představují uvažovaná zkrácení cestovních dob. Pro srovnání jsou zeleně zakreslena řešení z obrázku 3 (u nich nejsou předpokládána žádná investiční opatření).



Obr. 6: Paretoovsky optimální řešení, jejich aproximace a srovnání s variantou neuvažující krácení cestovních dob (zeleně); hodnoty v rámečku označují předpokládané krácení cestovních dob

Shrnutí dosažených výsledků

V tabulce 1 jsou uvedeny dosažené výsledky převedené na procentuální hodnoty. Hodnoty ve druhém a třetím sloupci udávají, o kolik procent musí být zvýšen rozsah dopravy, resp. zkráceny cestovní doby, aby by dosaženo požadovaného zkrácení čekání cestujících při přestupech uvedeného v prvním sloupci. Z údajů ve druhém sloupci je zřejmý nadproporcionální růst hodnot rozsahu dopravy. Hodnoty v tabulce platí jen při uvažování jednoho druhu opatření: buď zvýšení rozsahu dopravy

anebo zkrácení cestovních dob. Vyhodnocení současného působení obou opatření není z výše uvedených důvodů provedeno.

zkrácení dob čekání cestujících při přestupech o [%]	vyžaduje provést opatření v podobě	
	zvýšení rozsahu dopravy o [%]	zkrácení cestovních dob o [%]
5	2,1	1,1
10	4,2	2,3
15	6,5	3,4
20	9,1	4,6
25	12,2	5,8
30	15,8	nelze stanovit, protože v této oblasti nebyla nalezena žádná řešení
40	25,1	
50	39,2	
60	63,1	
70	112,1	

Tab. 1: Potřeba zvýšení rozsahu dopravy, resp. zkrácení cestovních dob v závislosti na požadovaném zkrácení dob čekání cestujících při přestupech

5. ZÁVĚR

Výsledkem tohoto příspěvku je uskutečněná kvantifikace vazeb mezi rozsahem vlakové dopravy a krácením cestovních dob na straně jedné a kvalitou přestupních vazeb na straně druhé.

Přijaté závěry se vztahují ke konkrétnímu modelu dopravy. Proto vyvozené závěry nelze aplikovat u modelů s jinou konfigurací linek a jinými vahami přestupních vazeb. Jen omezeně byla brána v potaz kapacitní omezení, čímž jsou zkresleny zvláště varianty s velkým rozsahem dopravy. V modelu byla sledována pouze kvalita přestupních vazeb, naproti tomu sledování relací, kde existuje přímé, bezpřestupové spojení, bylo pomínuto. Přitom kvalita těchto relací je také ovlivňována velikostmi taktových intervalů a mírou krácení cestovních dob. Případná eliminace těchto nedostatků může být předmětem dalších studií.

6. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Kolonko, M., Nachtigall, K., Voget, S. *Optimierung von integralen Taktfahrplänen mit genetischen Algorithmen*, Universität Hildesheim, Hildesheim, 1996, ISSN 0941-3014.
- [2] Kolonko, M., Fengler, W. Entwicklung von Fahrplänen unter mehrfacher Zielsetzung, *Der Nahverkehr*. 1997, č. 11, s. 45-48, ISSN 0722-8287.
- [3] Krýže P. *Systematický jízdni řád a propustnost*, dizertační práce, Pardubice, 2005.
- [4] Mařík, R. Matematika – Metoda nejmenších čtverců, učební text, internet.
- [5] Tuzar, A. *Teorie dopravy*, skriptum, Univerzita Pardubice, Pardubice, 1996, ISBN 80-7194-039-9.

7. ANOTACE

Podoba jízdního řádu je výsledkem kompromisu mezi kvalitou požadovanou cestujícími na straně jedné a provozními a investičními náklady na straně druhé. Příspěvek se snaží kvantifikovat souvislosti mezi některými faktory, které jízdní řád určují. Pro názornou demonstraci byl zvolen model dálkové železniční osobní dopravy na území České republiky. S pomocí matematických metod jsou generovány různorodé varianty taktového jízdního řádu. Tyto varianty jsou následně srovnávány podle rozsahu dopravy, investičních opatření prováděných za účelem zkrácení cestovních dob a kvality přestupních vazeb.

8. ABSTRACT

The form of the timetable is a result of a compromise between the quality passengers ask for on the one hand and operational and investment costs on the other hand. The article tries to quantify relationships between some factors, which determine the timetable. The model of long-distance railway passenger transport was chosen for a demonstration. With a support of mathematical methods different variants of timetable were generated. These variants were then compared by volume of transport, investment measures performed in order to shorten running times and a quality of transfer relationships.