

MODELOVÁNÍ SITUACÍ VZNIKAJÍCÍCH PŘI ZPOŽDĚNÍ VLAKŮ V OSOBNÍCH ŽELEZNIČNÍCH STANICÍCH

Michael Bažant¹, Michal Žarnay²

1. ÚVOD

V osobních železničních stanicích se často vyskytují situace, které každý uživatel železniční dopravy dobře zná. Vlak má zpoždění a přijíždí do stanice později než je jeho pravidelný čas příjezdu. Tím se vytvoří odchylka od plánu železniční dopravy, která si může vynutit další odchylky v provozu stanice.

Ve větších stanicích většinou čekají na zpožděný přijíždějící vlak přípojné vlaky. V souvislosti s těmito situacemi vzniká otázka, jestli a jak dlouho mají tyto přípojné vlaky čekat na zpožděný vlak.

Dalším problémem je změna plánu obsluhy vlaků ve stanici, zejména se jedná o plán obsazení kolejí, plán přidělení obslužného personálu a případně i plán přidělení dalších technických zařízení nutných pro obsluhu vlaku ve stanici.

Železniční společnosti mají vypracované pomůcky pro řešení naznačených problémů. V realitě jsou pomůcky uplatňovány dispečery. Pokud chceme aplikovat tyto pomůcky i při počítačové simulaci osobních železničních stanic, musíme reálného dispečera nahradit počítačovými algoritmy.

Nahrazení reálného dispečera počítačovými algoritmy je primární motivací tohoto příspěvku. Komplexní rozhodovací problém, který známe z reálného provozu, je výhodné dekomponovat na tyto dílčí podproblémy:

- a) jaký přípojný vlak má čekat na zpožděný přijíždějící vlak a jakou dobu?
- b) kterou nástupištní hranu použije zpožděný vlak, je-li jeho pravidelná kolej u nástupiště obsazena jiným vlakem?
- c) definování dalších změn v plánu (změna přidělení lokomotivy, změna složení soupravy, změna v přidělení obslužného personálu apod.)

Tento příspěvek se týká prvních dvou dílčích podproblémů – problému čekání přípojného vlaku na zpožděný vlak i s návrhem jeho řešení v modelu a problému určení náhradní nástupištní koleje pro zpožděný vlak.

¹ Ing. Michael Bažant, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra informatiky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Tel.: +420 466 036 123, E-mail: michael.bazant@upce.cz

² Ing. Michal Žarnay, Žilinská univerzita, Fakulta riadenia a informatiky, Katedra dopravných sietí, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Tel.: ++421-41-513 4224, E-mail: michal.zarnay@fri.utc.sk

2. MODELOVÁNÍ ČEKÁNÍ NA PŘÍPOJNÝ VLAK

2.1. Výchozí předpoklady

Pro modelování tohoto problému je nutné si nejprve vysvětlit následující značení:

- přijíždějící zpožděný vlak i - r_i ,
- plánovaný příjezd přijíždějícího vlaku i k nástupišti - ${}^i t_{Pa}$,
- skutečný příjezd zpožděného vlaku i k nástupišti - ${}^i t_{Ra}$,
- odjíždějící přípojný vlak j - r_j ,
- plánovaný čas odjezdu přípojného vlaku j - ${}^j t_{Pd}$,
- skutečný čas odjezdu přípojného vlaku j - ${}^j t_{Rd}$.

Rozdíl mezi skutečnými a plánovanými časy tvoří doby zpoždění:

- zpoždění přijíždějícího vlaku i - ${}^i T_{Da} = {}^i t_{Ra} - {}^i t_{Pa}$,
- zpoždění odjíždějícího vlaku j - ${}^j T_{Dd} = {}^j t_{Rd} - {}^j t_{Pd}$.

Dále je nutné si definovat:

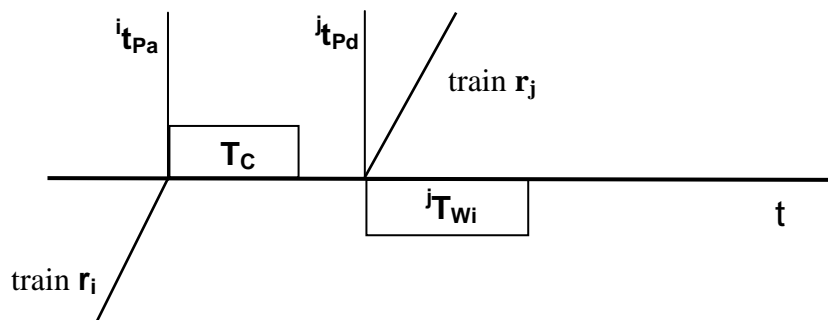
- přestupní dobu pro cestující mezi vlaky r_i a r_j - T_C ,
- čekací dobu vlaku r_j na zpožděný vlak r_i - ${}^j T_{Wi}$

Je zřejmé, že platí:

$${}^j t_{Rd} \geq {}^i t_{Ra} + T_C \quad (1)$$

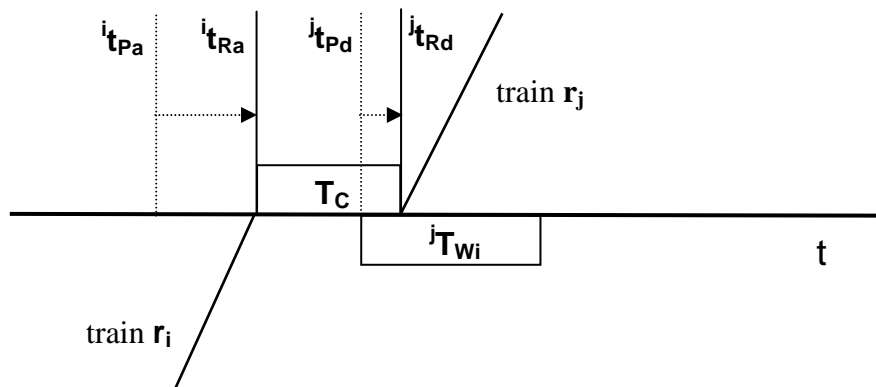
za podmínky, že vlak r_j čeká na vlak r_i .

Obrázek 1 ilustruje vztahy mezi uvedenými symboly v případě kdy nevznikají žádné odchylky od jízdního řádu. Doba mezi příjezdem prvního vlaku a odjezdem druhého vlaku musí být dostatečně dlouhá pro přestup cestujících mezi vlaky.



Obr. 1: Vztah mezi přijíždějícím a přípojným vlakem bez zpoždění

Na obrázku číslo 2 je znázorněna situace mezi zpožděným přijíždějícím vlakem a přípojným vlakem. Plánované časy jsou na rozdíl od reálných časů vyznačeny přerušovanou čarou.



Obrázek 2: Vztah mezi zpožděným příjíždějícím vlakem a přípojným vlakem

Pokud zpožděný příjíždějící vlak přijede před koncem čekací doby ${}^jT_{Wi}$, skutečný čas odjezdu přípojného vlaku lze vypočítat takto:

$${}^j t_{Rd} = {}^i t_{Ra} + T_C \quad (2)$$

V případě kdy příjíždějící zpožděný vlak přijede později, přípojný vlak odjede v čas svého pravidelného odjezdu a na zpožděný přípojný vlak nečeká.

Jsou ale určité situace kdy přípojný vlak musí čekat i za rámec stanovené čekací doby. Těmito situacím se věnuje následující kapitola.

2.2. Předpisy

Železniční společnosti stanovují předpisy pro dispečery, které se zabývají řešením situací vznikajících při zpoždění vlaků osobní dopravy. Metodika popsaná v tomto příspěvku se uplatňuje u českých a slovenských železničních společností.

Předpisy se zabývají těmito záležitostmi:

- přestupní dobou pro cestující
- čekací dobou přípojných vlaků
- případy, kdy má přípojný vlak čekat na zpožděný příjíždějící vlak určitě

Přestupní doba pro cestující

Přestupní doba T_C je odvozena od uspořádání a velikosti železniční stanice. V menších stanicích je uvedena pouze jedna hodnota přestupní doby. Ve větších stanicích s nástupišti a podchody se obvykle jedná o více než jednu hodnotu podle toho, zda musí přestupující použít při přesunu mezi přípoji podchod nebo nikoli a jak daleko sa musí přemístit.

Čekací doba přípojného vlaku

Čekací doba ${}^jT_{Wi}$ vyjadřuje jak dlouho má přípojný vlak r_j čekat na zpožděný přípojný vlak r_i . Tato doba, která je specifická pro danou stanici, neobsahuje již dříve uvedenou dobu pro přestup cestujících - T_C , což znamená že přípojný vlak může být ve skutečnosti zpožděný více než je jeho čekací doba, což lze vyjádřit tímto vztahem:

$$j_{t_{Rd}} \geq j_{t_{Pd}} + j_{T_{Wi}} \quad (3)$$

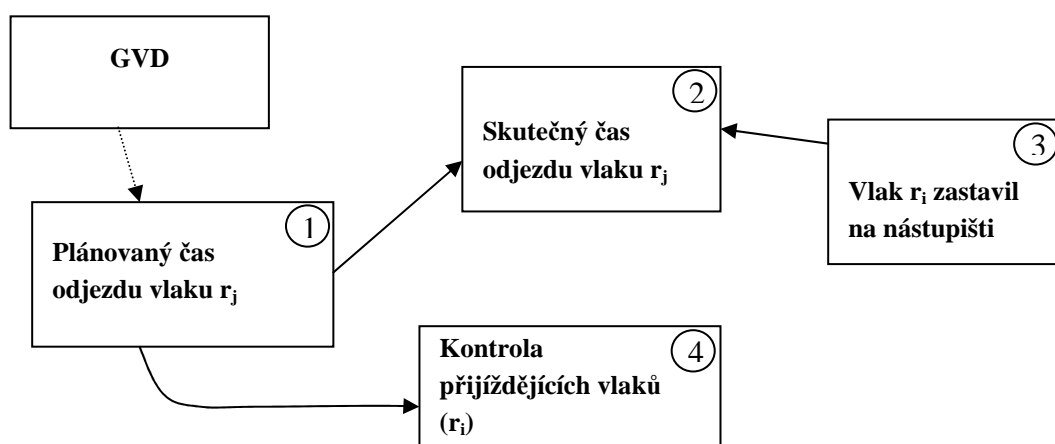
Pro každý odjíždějící vlak v dané stanici je stanovena buď základní nebo odlišná čekací doba. Základní čekací doba je určena pro každou dvojici vlaků podle kategorií, do kterých oba patří. Pokud mají určité konkrétní dvojice vlaků určené odlišné čekací doby, postupuje se podle nich.

Případy, kdy přípojný vlak musí čekat na zpožděný vlak i nad rámec čekací doby:

- Vlak r_i přijel před plánovaným odjezdem vlaku r_j , tzn. $i_{t_{Ra}} \leq j_{t_{Pd}}$,
- Vlak r_i přijel před koncem čekací doby vlaku r_j , tzn. $i_{t_{Ra}} \leq j_{t_{Pd}} + j_{T_{Wi}}$,
- Vlak r_i se nachází v okamžiku ukončení čekací doby přípojného vlaku r_j mezi vjezdovým nebo posledním cestovým návěstidlem a nástupištěm. Jestliže byl přijíždějící vlak zadržen u vjezdového nebo cestového návěstidla, prodlouží se příjnému vlaku čekací doba až o 5 minut a cestujícím se umožní přestup.
- Je-li v pomůcce ke GVD u přípojného vlaku uvedeno „určitě“, přípojný vlak má čekací dobu neomezenou.

2.3. Model

Na základě představených pravidel byl sestaven událostně orientovaný model, který je součástí simulačního modelu osobní železniční stanice. Model na obrázku 3 je sestaven ze čtyř událostí a vzájemných vazeb mezi událostmi. Vazby jsou naznačeny šipkami, které signalizují (ve směru šipky), že zpracování první události naplňuje druhou událost.



Obr. 3: Událostně orientovaný model čekání přípojných vlaků na zpožděný vlak

Událost č.1 je naplánovaná v simulačním modelu podsystémem, který zpracovává Grafikon vlakové dopravy (GVD). Podle toho, zda všechny přípoje v čase odjezdu j -tého vlaku přijeli včas nebo ne, se naplňuje skutečný odjezd tohoto vlaku

(událost 2) anebo kontrola přijíždějících vlaků (událost 4). Obdobným způsobem funguje zpracování dalších událostí.

Podrobnější popis fungování modelu možno najít v [1].

3. MODELOVÁNÍ URČENÍ NÁHRADNÍ NÁSTUPIŠTNÍ KOLEJE PRO ZPOŽDĚNÝ VLAK

Při zpoždění přijíždějícího vlaku může dojít k situaci, kdy má tento vlak pravidelnou kolej určenou pomůckou GVD „Plán obsazení kolejí“ obsazenu. V tomto případě může být zpožděnému vlaku mimořádně přidělena jiná kolej. S ohledem na postavení přípojných vlaků může být samozřejmě možné přidělit přijíždějícímu zpožděnému vlaku jinou kolej, i když má kolej určenou „Plánem obsazení kolejí“ v čase příjezdu volnou. Pro jednodušší vstupní předpoklady ale uvažujme nejprve s možností změny koleje jen u vlaku, který má v době žádosti o nástupištní kolej svou pravidelnou kolej obsazenu.

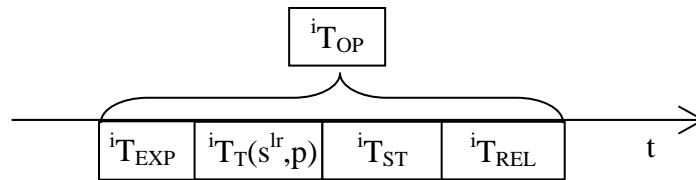
Náhradní kolej operativně přidělí výpravčí opožděnému vlaku s přihlédnutím k:

- a) aktuálnímu obsazení kolejí ve stanici,
- b) rozmístění přípojných vlaků,
- c) plánovanému obsazení kolejí v dalším časovém období.

Důležitým podkladem je také doba obsazení nástupištní koleje opožděným vlakem. Technologická doba obsazení nástupištní koleje - T_{OP} (Obr. 4) začíná ještě před příjezdem vlaku na tuto kolej a končí uvolněním nástupištní koleje.

Jako jednotlivé složky doby obsazení T_{OP} bychom mohli rozlišit:

- ${}^i T_{EXP}$ – doba čekání na příjezd vlaku k vjezdovému (poslednímu cestovému) návěstidlu tak, aby vlak nečekal u vjezdového (posledního cestového) návěstidla – začíná okamžikem, kdy je pro vlak r_i přestaveno návěstidlo na návěst dovolující jízdu - ${}^i t_s^h$ (${}^i t_s^{lr}$).
- ${}^i T_T(s^{lr}, p)$ – doba jízdy přijíždějícího vlaku od posledního návěstidla před nástupištěm na nástupištní kolej – začíná okamžikem průjezdu vlaku kolem posledního návěstidla před nástupištěm.
- ${}^i T_{ST}$ – doba pobytu vlaku ve stanici – tato doba začíná v čase skutečného zastavení vlaku na nástupištní koleji a končí okamžikem skutečného odjezdu vlaku.
- ${}^i T_{REL}$ – doba na uvolnění koleje u nástupiště tak, aby na tuto kolej mohl bez nutnosti čekání na uvolnění vlakové cesty přijet další vlak – tedy doba uvolnění vlakové cesty.



Obr. 4: Složky celkového času obsazení nástupištní koleje

Dobu technologického obsazení koleje u nástupiště lze tedy vyjádřit vztahem:

$${}^i T_{OP} = {}^i T_{EXP} + {}^i T_{T(s^{lr}, p)} + {}^i T_{ST} + {}^i T_{REL} \quad (4)$$

3.1. Případy časových kolizí v obsazení nástupištní koleje

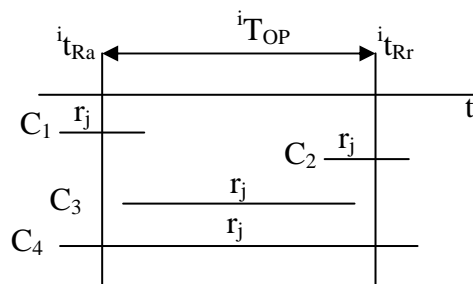
Při pokračování v analýze konfliktní doby obsazení nástupištní koleje dvěma vlaky, zpožděným vlakem r_i a vlakem r_j , který danou kolej obsazuje v danou dobu pravidelně, můžeme v zásadě identifikovat čtyři případy kolizí v obsazení koleje mezi nimi (viz Obr. 5):

C1: V okamžiku vzniku požadavku na obsazení koleje vlakem r_i (${}^i t_{Ra}$) je požadovaná kolej obsazená vlakem r_j , ale při výhledu na celou požadovanou dobu obsazení vlakem r_i (${}^i T_{OP}$) dojde k uvolnění koleje.

C2: V okamžiku vzniku požadavku na obsazení koleje vlakem r_i je požadovaná kolej volná, ale do okamžiku uvolnění koleje vlakem r_i je naplánované obsazení koleje vlakem r_j , které skončí až po předpokládaném konci doby ${}^i T_{OP}$.

C3: V okamžiku vzniku požadavku na obsazení koleje vlakem r_i je požadovaná kolej volná, ale do okamžiku uvolnění koleje vlakem r_i (${}^i t_{Rr}$) je naplánované obsazení koleje jiným vlakem r_j , který do doby uvolnění koleje vlakem r_i stihne ještě tuto kolej uvolnit.

C4: V době vzniku požadavku na obsazení koleje vlakem r_i je požadovaná kolej obsazená a do doby uvolnění koleje vlakem r_i nedojde k její uvolnění.



Obr. 5: Případy časových kolizí v obsazení nástupištní koleje

3.2. Návrh řešení kolize

Algoritmus modelující rozhodování výpravčího při přidělování koleje příjezdějícímu zpožděnému vlaku postupuje v řešení následujícím způsobem.

Nejdřív se snaží přidělit kolej, která je určená „Plánem obsazení kolejí“. Pokud je kolej určená touto pomůckou po celou dobu t_{TOP} volná, přidělíme příjíždějícímu vlaku tuto kolej a algoritmus končí.

Jestliže ale původně určená kolej není volná po celou požadovanou dobu, je nutné posoudit i možnost výběru náhradní koleje. Při výběru koleje (původně určené anebo náhradní) postupuje algoritmus podle kritérií uvedených v další části textu.

3.3. Kritéria pro zařazení nástupištní koleje do výběrové množiny a hodnocení výběru

Do výběrové množiny nástupištních kolejí je možné zahrnout pouze koleje, které splňují bezpodmínečně tato kritéria:

- délka nástupištní hrany – příjíždějícímu vlaku musí být přiřazena kolej s dostatečně dlouhou nástupištní hranou
- průjezdnost koleje – příjíždějícímu vlaku musí být přidělena nástupištní kolej umožňující odjezd na požadovanou výstupní traťovou kolej

Po výběru kolejí do výběrové množiny ohodnotíme možný výběr každé koleje jako řešení situace pokutovou funkcí, tzn. že hodnotíme negativní vliv výběru z několika hledisek. Celková pokutová účelová funkce má potom tvar:

$$P = \sum_{x \in \{A..C\}} P_x \quad (5)$$

kde A až C označují zvolená kritéria pro hodnocení (ne)vhodnosti koleje k výběru.

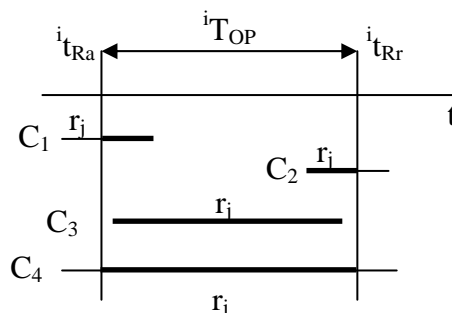
Dále následuje bližší popis každého kritéria, přičemž u všech existuje více možností zapsání kritériální funkce.

A) Konfliktní doba obsazení koleje (průnik t_{TOP}^i a t_{TOP}^j)

Konfliktní doba je průnikem mezi dobou obsazení příjíždějícím zpožděným vlakem t_{TOP}^i a dobou obsazení konfliktním vlakem t_{TOP}^j . V tomto kritériu jde o obsazení uvažované koleje oběma konfliktními vlaky. Konkrétně:

t_{IPs} – začátek intervalu doby průniku na nástupištní koleji

t_{IPE} – konec intervalu doby průniku na nástupištní koleji



Obr. 6: Případy časových kolizí v obsazení nástupištní koleje se zvýrazněnou dobou průniku na nástupištní koleji

B) Konfliktní doba obsazení zhlaví

Jedná se o konflikt při obsazení zhlaví při vjezdu zpožděného vlaku k nástupištní koleji. Modelování je obdobné jako v bodu A). Spravidla je tato doba kratší než konfliktní doba obsazení koleje.

Taktéž připadá v úvahu zavést do tohoto kritéria zohlednění kategorie vlaků. Opět je možné použít lineární nebo exponenciální součin doby průniku na zhlaví a kategorie vlaků:

$$P_B = (t_{ICe} - t_{ICs}) \cdot w_B \quad (6)$$

nebo

$$P_B = w_B \cdot e^{(t_{ICe} - t_{ICs})} \quad (7)$$

,kde proměnné obdobně odpovídají začátku a konci intervalu a váze w_B .

C) Přestupní doba mezi zpožděným vlakem a přípojnými vlaky

V tomto kritériu jde o vyhodnocení rozdílů mezi časem skutečného příjezdu zpožděného vlaku r_i (${}^i t_{Rp}$) a časy plánovaných odjezdů všech přípojných vlaků r_j (${}^j t_{Pd}$).

$$P_C = \sum_{\forall r_j \in E(r_i)} -Y \cdot T_{Ckl} \cdot w_C \quad (8)$$

, kde $Y = \min \{ {}^j t_{Pd} - {}^i t_{Rp}; 0 \}$, čili platí, že čím je více času mezi příjezdem vlaku r_i a odjezdem vlaku r_j , tím je to lepší, a tedy z celkové pokuty víc ubude. Jestli je okamžik zastavení vlaku r_i až po plánovaném odjezdu vlaku r_j (${}^j t_{Pd} - {}^i t_{Rp} < 0$), pak se vezme 0, protože, plánovaný odjezd r_j se posune na potřebný pozdější moment. T_{Ckl} je doba potřebná na přestup mezi kolejemi k a l , kde dané vlaky stojí.

$$P_C = \sum_{\forall r_j \in E(r_i)} -Y \cdot w_C \quad (9)$$

, kde $Y = \min \{ {}^j t_{Pd} - {}^i t_{Rp} - T_{Ckl}; 0 \}$

Pro některé přípoje je přestupní doba důležitější než pro jiné, například když přestupuje hodně lidí anebo z jiného důvodu se jedná o důležitý přípoj. Pak možno váhy w_C dále specifikovat podle důležitosti pro některé kombinace vlaků: zpožděného r_i a jeho přípoje r_j .

3.4. Použití kritérií

Uvedená kritéria považujeme za základní pro hodnocení výběru nástupištních kolejí pro zpožděný vlak. Nabízejí se i další kritéria, jako např. nedodržení plánu obsazení kolejí, zpoždění dalších vlaků nebo časová náročnost příjezdu k nástupišti. Jejich použití je možno zvážit při další specifikaci modelu.

Pokud vybrané vztahy vybraných kritérií vložíme do vztahu (5), dostaneme výslednou kritériální funkci, která obsahuje výrazy reprezentující:

- časové okamžiky a doby trvání,
- kategorie vlaků,

c) váhy w_i .

Informace vztahované k bodům a) a b) získáme snadno z popisu aktuálně řešené situace v modelu. Tyto hodnoty mohou a patrně vždy i budou při každém řešení situace jiné.

Na druhé straně by měli být pevně určené váhy w_i pro řešení všech rozhodovacích situací. Tyto hodnoty jsou však na počátku modelování konkrétní stanice neznámé a je jich třeba pro každý model určit vopřed.

Pro jejich určení se předpokládá empirický způsob, tedy zpracování rozhodovacích situací v realitě stanice, které byly v minulosti řešeny výpravčím. Tím se vytvoří množina hodnot, která by mohla tuto realitu popisovat. Přesnost těchto hodnot bude záviset od množství probraných situací a také od různorodosti řešených problémů ve stanici.

4. ZÁVĚR

Navrhnutý model rozhodování je v čase tvorby tohoto příspěvku aplikován na konkrétním simulačním modelu stanice Praha hlavní nádraží s cílem ověření a vyhodnocení uvedených kritérií u problému určení náhradní nástupištní koleje.

5. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BAŽANT, M., ŽARNAY, M.: Simulation model of Train Connections for Delayed Trains in Passenger Stations. In *International Symposium ŽEL 2005. Sborník příspěvků konference. Žilinská univerzita. Žilina: Žilinská univerzita, 2005, 2. díl, str. 142-147, ISBN 80-8070-400-7*
- [2] BAŽANT, M., ŽARNAY, M.: Formalizace řešení přidělení náhradní nástupištní koleje pro zpožděný vlak. In *Sborník příspěvků konference INFOTRANS 2005. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2005, pp.29-34, ISBN 80-7194-792-X*

6. ANOTACE

Jednou z hlavních výhod simulačního modelu osobních železničních stanic může být analýza systému při vzniku odchylek od jízdního řádu. Časové odchylky jsou většinou v realitě zpoždění osobních vlaků na příjezdu do stanice.

Jestliže má simulační model řešit situace vznikající při zpoždění vlaků osobní dopravy, je nutné řešit zejména tyto dva základní problémy: které přípojné vlaky mají čekat na zpožděné přijíždějící vlaky a kterou nástupištní kolej má opožděný vlak použít. Řešením těchto problémů se zabývá tento příspěvek.

7. ABSTRACT

One of major benefits of train operation simulation models of passenger train station can be an analysis of a system when time deviations from train timetable occur. Time deviations are in reality created in most cases by arrival delays of trains coming to station.

When the simulation model is supposed to solve the situations with delayed incoming trains, there are especially two main types of decisions to be made: what train connections shall wait for the delayed train and what track shall the delayed train use in the station. Solving of these problems is the subject of this paper.