

PODPORA OPTIMÁLNÍHO OPERATIVNÍHO PLÁNOVÁNÍ PROVOZU V OSOBNÍCH ŽELEZNIČNÍCH STANICÍCH SUPPORT OF OPTIMAL OPERATIVE PLANNING RELATED TO PASSENGER RAILWAY STATIONS

Ludmila Jánošíková¹, Michael Bažant, Antonín Kavička²

Anotace: Článek se zaměřuje na vybrané problémy spojené s operativním řízením provozu osobních železničních stanic. Typickým problémem je výskyt zpoždění vlaku na příjezdu, což může mít za následek narušení platného jízdního řádu (zejména vzhledem k plánovaným odjezdům vlaků) a plánu obsazení kolejí. Za této situace musí dispečer operativně řešit problémy spojené s potenciálním výskytem konfliktů vzhledem k jízdám vlaků. Pozornost je věnována formalizaci modelu dispečerova rozhodovacího procesu s využitím metod matematického programování. Vstupy do modelu odrážejí potenciální zpoždění přijíždějících vlaků. Výstupy z modelu řeší zejména problémy: kterou nástupištní kolej přidělit přijíždějícímu vlaku a jak dlouho mají čekat přípojné vlaky na zpožděný přijíždějící vlak. Účelová funkce uplatňuje multikriteriální přístup sledující dva cíle: redukovat vliv zpoždění vlaků na odjezdu na provoz v železniční síti (tj. minimalizovat odchylky od platného jízdního řádu) a zároveň minimalizovat potíže působené cestujícím (např. nevhodnými podmínkami pro přestupy). Zmíněný model se může využít při podpoře dispečerského řízení reálného provozu nebo v příslušných simulačních modelech.

Klíčová slova: Osobní železniční stanice, operativní plánování, přidělování nástupištních kolejí, smíšené celočíselné programování, simulace provozu

Summary: The paper deals with problems arising in a passenger railway station during real-time operation when delays of incoming trains can disturb the timetable and the platform allocation plan. In such a situation a dispatcher must operatively solve the problems related to possible conflicts of train movements. In the paper, a dispatcher's decision-making process is formalised using a mathematical programming approach. Inputs to the model contain potential delays of incoming trains. Outputs from the model are decisions on: which platform track is to be assigned to the arriving train and how long connecting trains should wait for the incoming delayed train. The objective function combines multiple criteria which encompass two goals: to reduce disturbance propagation through the railway network, i.e. to minimise deviations from the timetable, and at the same time to minimise the inconvenience put to the passengers. The model can be used as a real-time decision support for a dispatcher or as a part of a relevant simulation model.

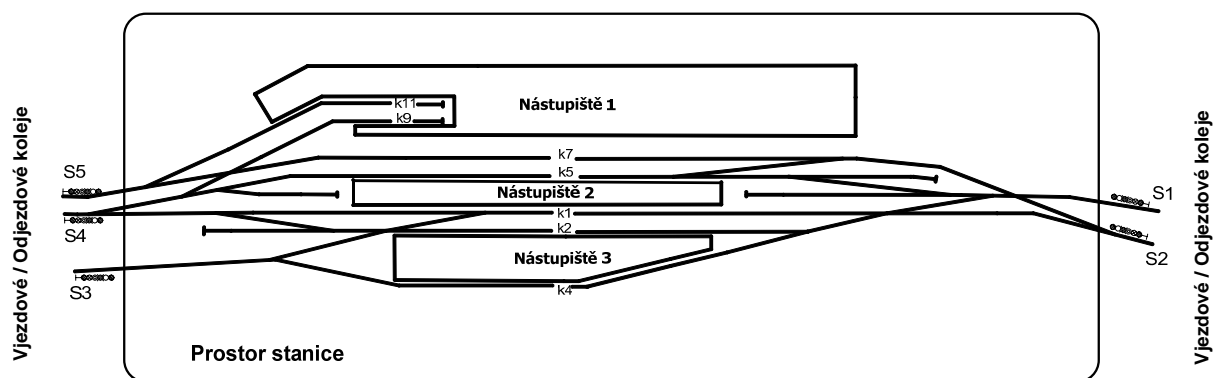
Key words: Passenger railway station, operative scheduling, platform track assignment, mixed integer programming, traffic simulation

¹ doc. Ing. Ludmila Jánošíková, CSc., Žilinská univerzita, Fakulta riadenia a informatiky, Katedra dopravných sietí, Univerzitná 8215/1, SK-010 26 Žilina, Tel. +421 41 5134 220, E-mail: Ludmila.Janosikova@fri.uniza.sk

² Ing. Michael Bažant, Ph.D., doc. Ing. Antonín Kavička, Ph.D., Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra softwarových technológií, Nám. Čs. legií 565, CZ-532 10 Pardubice, Tel. +420 466 036 645, E-mail: Michael.Bazant@upce.cz, Antonin.Kavicka@upce.cz

1. ÚVOD

Operativní řízení železničního provozu ve velkých osobních stanicích je spojeno s výskytem celé řady specifických problémů (např. zpoždění vlaků na příjezdu), jejichž řešení ovlivňuje kvalitu obsluhy cestujících jednak v rámci příslušné stanice a dále může dílčím způsobem působit i na kvalitu obsluhy cestujících v přilehlé železniční síti. Ve velkých železničních stanicích mohou vlaky přijíždět z, resp. odjíždět do několika směrů. Infrastruktura kolejí těchto stanic je bezprostředně napojena na řadu traťových kolejí (někdy označovaných jako koleje *vjezdové*, resp. *odjezdové* vzhledem k dané stanici) a dále disponuje větším počtem kolejí *nástupištních*. V případě, že všechny vlaky (zúčastňující se staničního provozu) jezdí na čas, lze železniční provoz řídit podle předem vytvořených plánů (grafikonu vlakové dopravy, plánu obsazení kolejí apod.). Tyto plány specifikují jak příslušné časy (např. odjezdů a příjezdů vlaků), tak přiřazení různých typů obslužných zdrojů vlakům (např. nástupištních kolejí přijíždějícím, resp. odjíždějícím vlakům). V reálném provozu jsou však zmíněné plány narušovány náhodnými vlivy. Dispečer tedy musí operativně přizpůsobit provoz stanice změněným podmínkám, aby nedocházelo zejména ke konfliktům v souvislosti s jízdami (pohyby) vlaků. Příkladem takového konfliktu může být situace, kdy zpožděný vlak nemůže přijet k pravidelně plánované nástupištní koleji, neboť tato je v aktuálním čase obsazena jiným vlakem. Dispečer tedy musí rozhodnout, zda může daný vlak přijet k jiné (náhradní) nástupištní koleji, anebo má čekat u vjezdového návěstidla. Navíc mohou ve stanici stát přípojné vlaky, které čekají na daný zpožděný vlak. Dispečer tak musí dále určovat, zda mají tyto vlaky čekat a v jakém čase mají odjet. Schematické znázornění ilustrační osobní železniční stanice uvádí obrázek 1 (symboly S1-S5 označují vjezdová návěstidla).



Zdroj: Autoři

Obr. 1 – Schéma ilustrační osobní železniční stanice

Pro své rozhodování dispečer využívá jednak pravidla daná konkrétní železniční společností a jednak své vlastní zkušenosti pro řešení problémových situací. Jeho rozhodnutí zohledňují dva hlavní (částečně konfliktní) cíle: omezovat vliv narušení pravidelného staničního provozu na provoz na železniční síti (tj. minimalizovat odchylky od jízdního řádu) a současně minimalizovat potíže způsobované cestujícím. Minimalizace obtíží vznikajících cestujícím může kupříkladu znamenat, že mohou být účelově zpožděny (dle daných pravidel) přípojné vlaky na odjezdu, do nichž mohou přestupovat cestující ze zpožděných vlaků na

příjezdu do stanice. Dalším příkladem může být přiřazení náhradní nástupištní koleje zpožděnému přijíždějícímu vlaku v těsné blízkosti původně plánované koleje apod.

Rozhodovací proces dispečera je prezentován ve formě modelu využívajícího matematického programování. Tento model lze potenciálně aplikovat pro podporu řízení provozu v reálném čase anebo jako součást simulačního modelu osobní železniční stanice, např. v rámci softwarového nástroje Villon [1], [2], [12].

2. PŘEHLED STAVU ŘEŠENÍ

Přidělování nástupištních kolejí vlakům v osobních železničních stanicích úzce souvisí s problematikou (stavění) vlakových cest. Pro zmíněné vlakové cesty jsou určující jednak vjezdové, resp. odjezdové koleje a jednak příslušné koleje nástupištní. Plánování provozu osobní železniční stanice zahrnuje mimo jiné určování časů příjezdů a odjezdů vlaků. Jízdy vlaků musí vyhovovat bezpečnostním podmínkám a musí být bezkonfliktní z hlediska času i prostoru.

Výzkum na poli plánování provozu v železničních stanicích (a přilehlých tratích) se v posledních letech soustředil zejména na oblast optimalizace grafikonu vlakové dopravy a dále na optimalizace směřování vlakových cest na infrastrukturách kolejišť. Zmíněné problémy byly většinou řešeny metodami matematického programování. Například, problém časového plánování vlakové dopravy (jízdniho řádu) na traťovém koridoru byl formulován s využitím smíšeného celočíselného programování a řešen Lagrangeovou relaxací [7]. Pro tvorbu plánu obsazení (nástupištních) kolejí byla aplikována metoda celočíselného programování řešící problém barvení grafu [6]. Problém směřování vlakových cest v kolejišti byl popsán jako úloha hledání nejčinnější nezávislé množiny vrcholů v grafu s využitím bivalentního programování, přičemž algoritmus řešení uplatnil metodu větvení a řezů [14]. V jednom z dalších přístupů, který je prakticky orientovaný, bylo upuštěno od aplikace metod celočíselného programování, které bylo nahrazeno heuristikou řešící problémy tvorby grafikonu a směřování vlakových cest současně [8]. Algoritmus řešení zahrnoval, resp. zohledňoval provozní pravidla, náklady, preference a kompromisní přístupy, které jsou uplatňovány odborníky z praxe vytvářejícími plány ručně.

Všechny výše uvedené přístupy se zaměřují na tvorbu tzv. *statických plánů* (např. jízdniho řádu a plánu obsazení kolejí), jejichž uplatnění se předpokládá v podmínkách pravidelného železničního provozu. Tyto plány nepočítají s možnými zpožděními vlaků ani s jinými náhodnými vlivy na staniční provoz. Navíc je nutné konstatovat, že výpočty spojené s výše uvedenými modely jsou značně výpočetně náročné. Není tedy možné získávat příslušná řešení ve velmi krátkém čase, aby je bylo možné uplatnit při operativním řízení provozu stanice nebo v průběhu simulačního experimentu. Z tohoto důvodu se výzkum rovněž zaměřuje na tvorbu *dynamických plánů*, jejichž posláním je odrážet požadavky provozu zatíženého nepravidelnostmi (tj. vzhledem k výskytu nepravidelností vyvstává například potřeba přeplánovat časy příjezdů a/nebo odjezdů vlaků, přesměrovat vlakové cesty apod.).

Předpovídání narušení pravidelného provozu a minimalizace důsledků jejich výskytu hraje čím větší roli, čím je hustota dopravy vyšší. Tomuto problému se výzkum intenzivně věnuje v poslední dekádě. Výsledky výzkumu z oblasti železničních dopravních systémů jsou dobře zmapovány v [13]. Většina přístupů se věnuje šíření poruch z pohledu železniční sítě jako celku, resp. její jisté regionální části. Z tohoto důvodu nepracují příslušné modely na dostatečné úrovni podrobnosti, aby byly schopny zachytit problémy jednotlivých stanic, příp. uzlů.

Na druhé straně byly vyvinuty i přístupy, které jsou aplikovatelné pro řešení vybraných problémů v samotných stanicích. Separátní řešení problému přidělení nástupištní koleje (potenciálně zpožděnému vlaku na příjezdu do stanice) bylo představeno v [4] a [5], přičemž pro podporu rozhodování byla využita umělá neuronová síť.

Další z přístupů je realizován v nástroji na podporu rozhodování ROMA (Railway traffic Optimization by Means of Alternative graphs) [10]. Jakmile dojde k narušení pravidelného provozu, jsou počítány nové vlakové cesty (přesměrování) s využitím metody *tabu search*. Poté je řešeno přeplánování příjezdů a odjezdů vlaků jako *job-shop rozvrhovací problém* s uplatněním metody *větví a hranic*. Zde je však ještě nutno konstatovat, že přesměrování vlakových cest je přepočítáno pouze zjednodušeně, jelikož pro každý vlak je uvažována pouze jedna alternativní vlaková cesta. Dalším nedostatkem tohoto přístupu je nezohlednění přípojů mezi vlaky.

Největší inspirací pro naše řešení problému přidělování kolejí představoval zdroj [9], v němž se odrážejí realie osobní železniční dopravy v Indii. Operativní přidělování nástupištních kolejí vlakům vjíždějícím do rušné stanice je řešeno za pomoci matematického programování. Matematický model jsme upravili pro podmínky železniční dopravy v Evropě a dále jej obohatili o zohlednění přípojných vlaků a sledování zpoždění vlaků na odjezdu ze stanice. Model je prezentován v následující části, přičemž výsledky výpočetních experimentů zachycuje část čtvrtá. V závěru jsou zhodnoceny přínosy prezentovaného přístupu a naznačeno směřování dalšího výzkumu.

3. FORMULACE PROBLÉMU

Předmětem zkoumání, tak jak byl obecně představen v rámci předcházejících částí, je operativní plánování příjezdů vlaků k , resp. odjezdů vlaků od stanovených nástupištních kolejí v rámci určitého plánovacího období. Podrobněji lze formulovat následující dílčí rozhodovací problémy:

- pro každý z přijíždějících vlaků určit, ke které nástupištní koleji má přijet ,
- není-li v aktuálním čase k dispozici žádná volná nástupištní kolej, jak dlouho mají přijíždějící vlaky čekat u vjezdového návěstidla,
- pro každý z přípojných vlaků určit, kdy má odjet .

Uvedená rozhodnutí jsou modelována třemi základními proměnnými, které:

- přiřazují nástupištní koleje přijíždějícím vlakům,
- definují časy odjezdů přijíždějících vlaků od vjezdového návěstidla směrem k nástupištím,

- specifikují časy odjezdů tranzitních a přípojných vlaků od nástupišť.

Účelová funkce vytvářeného modelu zahrnuje dva následující cíle (odpovídací charakteru rozhodování staničního dispečera):

- a) minimalizovat zpoždění vlaků na odjezdu ze stanice,
- b) minimalizovat potíže způsobované cestujícím.

První z cílů je splněn, jestliže je minimalizována odchylka mezi reálným časem odjezdu daného vlaku a příslušným časem plánovaným v platném jízdním řádu. Časy odjezdů vlaků mohou být ovlivňovány přidělováním nástupištních kolejí. Jedou-li všechny vlaky na čas, je přidělování nástupištních kolejí jednoznačně určeno *plánem obsazení kolejí*, který je vytvářen pro každou větší osobní železniční stanici. Jsou-li však některé vlaky zpožděny, dispečer přiděluje nástupištní koleje na základě svých zkušeností a explicitních pravidel. V níže představeném modelu odráží část účelové funkce uvedená pravidla tak, aby byly vlakům přidělovány ty nejvhodnější nástupištní koleje. Tato část účelové funkce implicitně minimalizuje potíže vznikající cestujícím tím, že (mimo jiné) minimalizuje odchylky v přidělování kolejí vzhledem k plánu obsazení kolejí. To znamená, že cestující čekající u pravidelně plánované nástupištní koleje se nemusí přemísťovat příliš daleko, nastane-li v přidělení koleje změna. Není-li v čase příjezdu vlaku do stanice k dispozici žádná volná nástupištní kolej, musí tento čekat u vjezdového návěstidla. Důsledkem toho je výskyt zpoždění vlaku na příjezdu (k nástupišti), což má rovněž negativní vliv na cestující. Proto poslední část účelové funkce minimalizuje zpoždění vlaků vznikající čekáním u vjezdového návěstidla.

Vstupy do modelu matematického programování jsou následující:

1. infrastruktura kolejiště stanice,
2. plánovací období (horizont),
3. obsazení kolejí na počátku plánovacího období (toto obsazení je závislé na příjezdech vlaků uskutečněných ještě před aktuálním plánovacím obdobím),
4. seznam přijíždějících vlaků, přičemž požadovaná data pro každý vlak jsou následující:
 - (a) příjezd k vjezdovému návěstidlu,
 - (b) doba jízdy od vjezdového návěstidla k nástupištní koleji,
 - (c) doba pobytu u nástupiště,
 - (d) pravidelně plánovaná nástupištní kolej,
 - (e) vjezdová (traťová) kolej,
 - (f) seznam přípustných nástupištních kolejí pro přidělení,
 - (g) seznam přípojných vlaků (včetně čekacích dob), které na daný vlak čekají,
5. seznam odjíždějících (tranzitních a přípojných) vlaků, zahrnující pro každý vlak:
 - (a) plánovaný čas odjezdu,
 - (b) dobu pobytu u nástupiště,
 - (c) časové období potřebné pro odjezd od nástupištní koleje,
 - (d) pravidelně plánovaná nástupištní kolej,
6. technologické konstanty:
 - (a) maximální časové období, po jehož uplynutí má být kolej uvolněna,
 - (b) normální doba na přestupy (cestujících),

(c) zkrácená doba na přestupy (cestujících).

Všechny časové údaje jsou uváděny v minutách.

V dalším je uvedena formulace účelové funkce včetně omezujících podmínek. Nejdříve je potřeba vysvětlit následující symboly.

Indexy, které v matematickém modelu reprezentují objekty

i, j, l vlak

k kolej

$r(i)$ pravidelně plánovaná nástupištní kolej pro vlak i

$s(i)$ párová kolej ke koleji $r(i)$; koleje u stejného nástupiště jsou párové (pro dané $r(i)$ nemusí $s(i)$ existovat)

$q(i)$ vjezdová (traťová) kolej pro vlak i

Vstupní parametry (konstanty)

t_i^{soj} doba pobytu vlaku i u nástupiště

t^{soj} minimální doba pobytu vlaku u nástupiště

t^{arr} doba jízdy vlaku od vjezdového návěstidla k nástupišti

t^{dep} doba potřebná pro odjezd vlaku od nástupiště

t_i^{Pa} plánovaný čas příjezdu vlaku i k nástupišti

t_i^{Pd} plánovaný čas odjezdu vlaku i

t_i^a skutečný čas příjezdu vlaku i k vjezdovému návěstidlu

t^{ahd} maximální doba, za kterou by měla být kolej uvolněna (doba výhledu)

t^{Cn} normální doba na přestup cestujících

t^{Cs} zkrácená doba čas na přestup cestujících

t_{ij}^w maximální doba čekání vlaku i na zpožděný přijíždějící vlak j

t^{start} počátek plánovacího období

t^{stop} konec plánovacího období

Parametry odvozené od vstupních parametrů

t_i^{occ} celková doba obsazení nástupištní koleje vlakem i ($t_i^{occ} = t^{arr} + t_i^{soj} + t^{dep}$)

t_k předpokládaný čas uvolnění koleje k (obsazené v čase t^{start}); jestliže je kolej k volná v čase t^{start} , pak $t_k = t^{start}$

p_{ik} koeficient vhodnosti koleje k pro přidělení vlaku i

Množiny objektů

K množina všech nástupištních kolejí

$K(i)$ množina přípustných nástupištních kolejí pro vlak i

- $K(t^{start})$ množina nástupištních kolejí, které jsou obsazeny na počátku plánovacího období
- $K(t^{start}, i)$ množina nástupištních kolejí, které jsou obsazeny na počátku plánovacího období a mohou být přiděleny vlaku i : $K(t^{start}, i) = \{k \mid k \in K(i), t_k > t^{start}\}$
- U množina všech příjíždějících vlaků, pro které je plánován odjezd od vjezdového návěstidla v průběhu plánovacího období: $U = \{i \mid t^{start} \leq t_i^a \leq t^{stop}\}$
- S množina všech vlaků, které přijely před počátkem plánovacího období:
 $S = \{i \mid t_i^a < t^{start}\}$; standardně se předpokládá, že tyto vlaky přijely na čas
- V množina všech příjíždějících vlaků, které přijedou k vjezdovému návěstidlu před uvolněním poslední z kolejí, které jsou obsazeny na počátku plánovacího období:
 $V = \left\{ i \mid i \in U, t_i^a \leq \max_{k \in K(t^{start})} \{t_k\} \right\}$
- X množina výchozích přípojných vlaků
- $X(j)$ množina výchozích přípojných vlaků (stojících na kolejích, pro něž existují párové koleje), které podle železničního předpisu mají čekat na vlak j a pro které navíc platí podmínka: $t_j^a + t^{arr} \leq t_i^{Pd} + t_{ij}^w$
- $X^0(j)$ množina výchozích přípojných vlaků (stojících na kolejích, pro něž neexistují párové koleje), které podle železničního předpisu mají čekat na vlak j a pro které navíc platí podmínka: $t_j^a + t^{arr} \leq t_i^{Pd} + t_{ij}^w$
- Y množina tranzitních vlaků, které nejsou přípojné, $Y \subset U$
- Z množina tranzitních přípojných vlaků, $Z \subset U$
- $Z(j)$ množina tranzitních přípojných vlaků (s plánovanými nástupištními kolejemi, pro něž existují párové koleje), které podle železničního předpisu mají čekat na vlak j a pro které navíc platí podmínka: $t_j^a + t^{arr} \leq t_i^{Pd} + t_{ij}^w$
- $Z^0(j)$ množina tranzitních přípojných vlaků (s plánovanými nástupištními kolejemi, pro něž neexistují párové koleje), které podle železničního předpisu mají čekat na vlak j a pro které navíc platí podmínka: $t_j^a + t^{arr} \leq t_i^{Pd} + t_{ij}^w$

Rozhodovací a pomocné proměnné modelu

- pro $i \in U, k \in K(i)$: $x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{jestliže je kolej } k \text{ přiřazena vlaku } i \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$
- pro $i, j \in U, i \neq j$: $y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{jestliže vlak } i \text{ odjíždí od vjezdového návěstidla} \\ & \text{k nástupišti před vlakem } j \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$
- pro $i, j \in U, i \neq j$: $z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{je-li vlakům } i \text{ a } j \text{ přiřazena stejná nástupištní kolej} \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$
- u_i čas odjezdu vlaku i od vjezdového návěstidla k nástupišti, $i \in U$
- v_i skutečný čas odjezdu vlaku i (z nástupištní koleje), $i \in X \cup Y \cup Z$

Zmíněné proměnné neuvažují s těmi výchozími vlaky, které nejsou zároveň vlaky přípojnými. Proměnné v_i jsou tedy spojeny pouze s přípojnými a tranzitními vlaky.

Je-li příjíždějící vlak i vlakem tranzitním a není přípojným, pak lze jeho čas odjezdu odvodit z následující rovnice:

$$v_i = u_i + t^{arr} + t_i^{soj} \quad \text{pro } i \in Y \quad (1)$$

Je-li příjíždějící vlak i vlakem tranzitním a zároveň přípojným, může se jeho doba odjezdu prodloužit čekáním na zpožděné příjíždějící vlaky, proto rovnice (1) přejde v nerovnost:

$$v_i \geq u_i + t^{arr} + t_i^{soj} \quad \text{pro } i \in Z \quad (2)$$

Čeká-li přípojný vlak i na vlak j příjíždějící před koncem čekací doby vlaku i ($t_j^a + t^{arr} \leq t_i^{Pd} + t_{ij}^w$), pak se mohou vyskytnout dvě situace:

- vlak j přijede ke stejnému nástupišti, u něhož stojí vlak i ($x_{js(i)} = 1$) – za této podmínky je uplatněna zkrácená doba na přestupy cestujících, protože vlaky se nacházejí v bezprostřední blízkosti,
- vlak j přijede k jinému nástupišti, než stojí vlak i , protože mu není přidělena párová kolej ke koleji, na které stojí vlak i ($x_{js(i)} = 0$), nebo párová kolej neexistuje ($i \in X^0(j) \cup Z^0(j)$) – pak je aplikována normální doba na přestupy cestujících.

Skutečný čas odjezdu *výchozího* přípojného vlaku i je tedy nejpozdější ze tří časových okamžiků, které představují čas plánovaného odjezdu vlaku a dále časy navýšené o doby (normální nebo zkrácené) potřebné pro přestupy cestujících:

$$v_i = \max \left\{ \begin{array}{l} t_i^{Pd} \\ u_j + t^{arr} + t^{Cs}, x_{js(i)} = 1 \\ u_j + t^{arr} + t^{Cn}, x_{js(i)} = 0 \text{ nebo } i \in X^0(j) \end{array} \right\} \quad (3)$$

Skutečný čas odjezdu *tranzitního* přípojného vlaku i závisí od doby jeho příjezdu, která může být navýšená o doby (normální nebo zkrácené) potřebné pro přestupy cestujících.

Kromě vztahu (2) tedy platí:

$$v_i = \max \left\{ \begin{array}{l} u_j + t^{arr} + t^{Cs}, x_{js(i)} = 1 \\ u_j + t^{arr} + t^{Cn}, x_{js(i)} = 0 \text{ nebo } i \in Z^0(j) \end{array} \right\} \quad (4)$$

Důležitou roli v účelové funkci hraje parametr p_{ik} (koeficient vhodnosti), který odráží uplatňování jistých rozhodovacích pravidel staničním dispečerem vzhledem k přidělování nástupištních kolejí zpožděným příjíždějícím vlakům. Dispečer zohledňuje následující čtyři kritéria:

- A: Volnost kolej v okamžiku příjezdu vlaku.
- B: Volnost koleje vzhledem k době pobytu vlaku.
- C: Obsazení párové koleje přípojným vlakem.
- D: Další technické a technologické přednosti koleje.

Zmíněná kritéria jsou vyhodnocována pro každou kolej k , která může být přidělena vlaku i ($k \in K(i)$). Poté je vhodnost koleje k vypočítána jako vážená suma hodnot jednotlivých kritérií a začleněna do účelové funkce. Označují-li a_{ik} , b_{ik} , c_{ik} , a d_{ik} hodnoty kritérií A , B , C , D a w_A , w_B , w_C , w_D představují váhy těchto kritérií, potom lze míru vhodnosti (p_{ik}) přiřazení koleje k vlaku i vyjádřit jako:

$$p_{ik} = w_A a_{ik} + w_B b_{ik} + w_C c_{ik} + w_D d_{ik} \quad (5)$$

Váhy vyjadřují důležitost jednotlivých kritérií a jsou nastaveny podle kvalifikovaného odhadu experta. Expert obvykle není schopen určit tyto váhy přímo, avšak dokáže provést jejich vzájemné porovnání. To znamená, že pro každou dvojici kritérií z nich určí to důležitější, a zároveň vyjádří kolikrát je důležitější. Příslušné váhy potom mohou být spočítány na základě relativních důležitostí kritérií, pomocí matematických metod. Z těchto metod se nejčastěji používá tzv. *Saatyho metoda* ([4], [11]).

Formulaci kritérií, jakož i jejich podrobný popis jsme uvedli v předchozích pracích [3], [4] a [5]. Kritéria jsou navržena tak, že nejlepší z kolejí kandidujících na přidělení je ta, která disponuje maximální váženou sumou hodnot příslušných kritérií (3). Všechny hodnoty kritérií jsou z intervalu $\langle 0,1 \rangle$, kde hodnota 1 představuje nejlepší výsledek.

Výpočet kritérií A a B čerpá ze statického plánu obsazení kolejí, který je vytvářen pro všechny větší osobní železniční stanice. Pro každou z nástupištních kolejí jsou tedy dostupné informace o jejich obsazení vlaky.

Kritérium A, odrážející míru volnosti koleje, by mohlo intuitivně rozlišovat pouze mezi dvěma hodnotami (stavy), které odrážejí skutečnost, zda je kolej volná či obsazená. Tento přístup by však neumožňoval rozlišovat mezi kolejemi, které zůstanou dále obsazeny ještě po dlouhou dobu a kolejemi, které budou v krátkém čase uvolněny. Z tohoto důvodu je vhodné vyhodnocovat toto kritérium s přihlédnutím k době výhledu t^{ahd} . Je-li kolej k volná v okamžiku předpokládaného příjezdu vlaku i , pak je hodnota kritéria A (a_{ik}) nastavena na hodnotu 1. V případě, že je kolej k obsazena vlakem j , potom je vyčíslen poměr mezi časem zbývajícím do odjezdu vlaku a dobou výhledu. Výsledný poměr je pak odečten od hodnoty 1. Je-li doba zbývajícím do uvolnění koleje (po odjezdu vlaku j) krátká v porovnání s dobou výhledu t^{ahd} , potom se a_{ik} blíží hodnotě 1, jinak je blízko nebo rovno hodnotě 0. Při vyhodnocení kritéria podle vztahu (6) předpokládáme, že vlak i se u vjezdového návěstidla nezdrží, tedy jeho předpokládaný příjezd na kolej k je roven součtu doby příjezdu k vjezdovému návěstidlu t_i^a a doby jízdy vlaku od vjezdového návěstidla k nástupišti t^{arr} .

$$a_{ik} = \max \left\{ 0, 1 - \frac{t_j^{Pd} + t^{dep} - (t_i^a + t^{arr})}{t_i^{ahd}} \right\} \quad (6)$$

pro $j \in U \cup S$, $t_j^{Pa} - t^{arr} \leq t_i^a + t^{arr} \leq t_j^{Pd} + t^{dep}$, $k = r(j)$.

Hodnota **kritéria B** je počítána jednak vzhledem k době volnosti koleje do příjezdu dalšího vlaku j a jednak k celkové době obsazení koleje k vlakem i . V této souvislosti mohou nastat dvě následující situace:

a) Kolej k je volná v čase příjezdu vlaku i , pak se koeficient b_{ik} vypočítá dle vztahu:

$$b_{ik} = \min \left\{ 1, \frac{t_j^a - (t_i^a + t^{arr})}{t_i^{occ}} \right\}, \quad (7)$$

kde j představuje následující vlak, $k = r(j)$.

b) Kolej k je obsazena předchozím vlakem l , pak se b_{ik} počítá následovně:

$$b_{ik} = \min \left\{ 1, \frac{t_j^a - (t_l^{Pd} + t^{dep})}{t_i^{occ}} \right\} \quad (8)$$

kde j je následující a l předchozí vlak, $k = r(j) = r(l)$.

Další **kritérium** (označované jako **C**) se věnuje specifické situaci, kdy má jeden nebo více přípojných vlaků čekat na zpožděný příjíždějící vlak. Je samozřejmě vhodné přistavit zpožděný vlak i ke stejnému nástupišti, u něhož stojí jeden z přípojných vlaků j , aby se minimalizoval čas potřebný k uskutečnění přestupů cestujících. Koeficient c_{ik} může nabývat dvou hodnot:

$$c_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{pro } t_i^a + t^{arr} \in \langle t_j^{Pd} - t^{Cn}, t_j^{Pd} + t_{ji}^w \rangle, i \in U, j \in X(i) \cup Z(i), k = s(j) \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (9)$$

Poslední **kritérium D** odráží další technické a technologické přednosti vyplývající z přiřazení koleje k vlaku i . Hodnota kritéria pro kolej pravidelně přidělovanou vlaku i je 1 ($d_{ik} = 1$ pro $k = r(i)$). Na druhé straně kritériální hodnota každé z kolejí nevhodné pro přiřazení vlaku i je 0 ($d_{ik} = 0$ pro $k \notin K(i)$). Ohodnocení ostatních kolejí nabývají hodnot z intervalu $(0,1)$, přičemž jsou určovány na základě expertních znalostí staničního provozu. Příslušná hodnota kritéria může odrážet například:

- vzdálenost uvažované koleje k od nástupištní koleje pravidelně přidělované vlaku i (tato vzdálenost ovlivňuje doby přestupů cestujících),
- vlakovou cestu kolejovým zhlavím, která může negativně ovlivňovat pohyby ostatních vlaků, jejichž cesty potřebují využívat stejnou část zhlaví.

Výsledný model optimálního operativního plánování (resp. řízení) provozu v osobní železniční stanici je multikriteriálním modelem smíšeného celočíselného lineárního programování. Formulace modelu je následující:

Minimalizujte

$$\sum_{i \in X \cup Y \cup Z} (v_i - t_i^{Pd}) - \sum_{i \in U} \sum_{k \in K(i)} p_{ik} x_{ik} + \sum_{i \in U} (u_i - t_i^a) \quad (10)$$

za podmínek:

$$u_i \geq t_i^a \quad \forall i \in U \quad (11)$$

$$u_i \geq t_k x_{ik} \quad \forall i \in V, \forall k \in K(t^{start}, i) \quad (12)$$

$$u_j \geq u_i + t_i^{occ} z_{ij} - M y_{ji} \quad \forall i, j \in U, i \neq j \quad (13)$$

$$u_j \geq v_i + t_i^{dep} - M y_{ji} - M(1 - z_{ij}) \quad \forall i \in Z, j \in U, i \neq j \quad (14)$$

$$y_{ij} + y_{ji} = 1 \quad \forall i, j \in U, i \neq j \quad (15)$$

$$y_{ij} = 1 \quad \forall i, j \in U, i \neq j, q(i) = q(j), t_i^a < t_j^a \quad (16)$$

$$\sum_{k \in K(i)} x_{ik} = 1 \quad \forall i \in U \quad (17)$$

$$z_{ij} \geq x_{ik} + x_{jk} - 1 \quad \forall i, j \in U, i < j, \forall k \in K(i) \cap K(j) \quad (18)$$

$$z_{ij} = z_{ji} \quad \forall i, j \in U, i < j \quad (19)$$

$$v_i \geq u_i + t_i^{arr} + t_i^{soj} \quad \forall i \in Y \cup Z \quad (20)$$

$$v_i \geq t_i^{Pd} \quad \forall i \in X \quad (21)$$

$$M x_{js(i)} + v_i \geq u_j + t_j^{arr} + t_j^{Cn} \quad \forall j \in U, \forall i \in X(j) \cup Z(j) \quad (22)$$

$$M(1 - x_{js(j)}) + v_i \geq u_j + t_j^{arr} + t_j^{Cs} \quad \forall j \in U, \forall i \in X(j) \cup Z(j) \quad (23)$$

$$v_i \geq u_j + t_j^{arr} + t_j^{Cn} \quad \forall j \in U, \forall i \in X^0(j) \cup Z^0(j) \quad (24)$$

$$u_i \geq 0 \quad \forall i \in U \quad (25)$$

$$v_i \geq 0 \quad \forall i \in X \cup Y \cup Z \quad (26)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in U, \forall k \in K(i) \quad (27)$$

$$y_{ij}, z_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in U, i \neq j \quad (28)$$

Účelová funkce (10) je sumou tří kritérií. První kritérium představuje zpoždění vlaků (tranzitních a přípojných) na odjezdu ze stanice. Druhé kritérium vyjadřuje míru vhodnosti přiřazení nástupištních kolejí příjezdějícím vlakům. Míra vhodnosti má být maximální, a proto je příslušná suma opatřena mínusovým znaménkem (je totiž součástí minimalizované účelové funkce). Poslední kritérium odráží celkové zpoždění všech příjezdějících vlaků u vjezdového návěstidla.

Omezující podmínky (11) a (12) stanovují dolní ohraničení časů odjezdů vlaků od vjezdového návěstidla. Podmínka (11) uplatněná na vlak i vyjadřuje skutečnost, že čas

odjezdu vlaku od vjezdového návěstidla nemůže být menší než jeho čas příjezdu k návěstidlu. Podmínka (12) říká, že je-li vlaku i přiřazena kolej k , pak musí být respektováno její (inicializační) obsazení na počátku plánovacího období – tj. vlak i může odjet k nástupištní koleji k až po té, když je uvolněna.

Podmínka (13) představuje omezení vzhledem k přípustným časovým intervalům mezi jízdami vlaků. Pro každou dvojici vlaků i a j tato podmínka vyjadřuje, že pokud odjíždí vlak i před vlakem j (tj. $y_{ij} = 1$ a $y_{ji} = 0$) a jestliže je vlaku i a j přiřazena stejná nástupištní kolej ($z_{ij} = 1$), pak vlak j může odjet až vlak i tuto kolej uvolní. Má-li vlak i odjíždět až po vlaku j ($y_{ij} = 0$ a $y_{ji} = 1$), pak se tato podmínka stává bezpředmětnou, protože pravá strana nerovnosti má vždy zápornou hodnotu (M je vhodně zvolené velké kladné číslo). Jestliže vlaky odjíždějí od vjezdového návěstidla v pořadí i, j (tj. $y_{ij} = 1$ a $y_{ji} = 0$) na stejnou kolej ($z_{ij} = 1$) a vlak i je přípojný, může se jeho doba odjezdu prodloužit čekáním na zpožděné příjíždějící vlaky. Tato skutečnost je vyjádřena v podmínce (14).

Podmínky (15) a (16) definují přípustné hodnoty proměnných y_{ij} . Podmínka (15) říká, že buď y_{ij} nebo y_{ji} musí nabývat hodnotu 1. Podmínka (16) stanovuje, že y_{ij} musí být rovno 1, jestliže vlak i přijíždí ke vjezdovému návěstidlu před vlakem j a zároveň oba vlaky přijíždějí do stanice po stejné vjezdové koleji.

Podmínka (17) zabezpečuje, že každému vlaku je přiřazena právě jedna nástupištní kolej.

Následující omezující podmínky (18) a (19) definují hodnoty proměnných z_{ij} , které činí 1, jestliže je vlakům i a j přiřazena stejná kolej, v opačném případě nabývají tyto proměnné hodnotu 0. Nabývají-li x_{ik} a x_{jk} hodnot 0, pak podmínka (18) stanovuje, že z_{ij} musí být větší nebo rovna 1. Avšak z definičního oboru této nula-jedničkové proměnné lze vyvodit, že v tomto případě bude hodnota z_{ij} rovna 1. Pro všechny ostatní kombinace hodnot proměnných x_{ik} a x_{jk} tato podmínka umožňuje, aby z_{ij} nabylo hodnoty 0 nebo 1. Jelikož však proces optimalizace provádí minimalizaci zpoždění, snaží se minimalizovat odchylky od plánovaných časů odjezdů vlaků. Časy odjezdů u_i a u_j jsou spojeny s proměnnou z_{ij} v podmínce (13). S cílem minimalizovat u_j , interval mezi jízdy vlaků (tj. pravá strana nerovnosti v podmínce (13)) by měl nabývat nejmenší možnou hodnotu. Je zřejmé, že nižší hodnota může být dosažena, jestliže jsou vlakům i a j přiděleny odlišné nástupištní koleje, než kdyby jim byla přiřazena stejná kolej. Proto z možností $z_{ij} = 0$ a $z_{ij} = 1$ je optimalizačním mechanismem vybrána hodnota 0.

Podmínky (20) – (24) definují skutečné časy odjezdů vlaků. Podmínka (20) je kopií vztahu (2) pro tranzitní přípojné vlaky. Pro tranzitní vlaky, které nejsou přípojné, bude tato podmínka splněna jako rovnost, což zajistí optimalizační algoritmus minimalizující odchylky skutečných a plánovaných časů odjezdů $v_i - t_i^{Pd}$. Podmínky (21) – (24) představují lineární formy maximalizačních funkcí (3) a (4). Skutečný čas odjezdu přípojného vlaku i buď odpovídá plánovanému času odjezdu (podmínka (21)) anebo je skutečný čas příjezdu vlaku j navýšen o dobu potřebnou na přestupy. Která z dob potřebných na přestup (normální nebo zkrácená) bude aplikována, záleží na koleji, ke které vlak j přijede. Přijede-li vlak j ke stejnému nástupišti, u něhož stojí vlak i ($x_{js(i)} = 1$), pak lze využít zkrácený čas na přestupy. Tento případ je vyjádřen podmínkou (23), protože její levá strana nabude hodnoty v_i .

Současně se stane podmínka (22) bezpředmětnou z důvodu vysoké hodnoty na levé straně nerovnosti, která je určitě větší než hodnota její pravé strany. Naproti tomu, přijede-li vlak j k jinému nástupišti ($x_{js(i)} = 0$), pak je podmínka (22) uplatněna a bezpředmětným se stává omezení z podmínky (23). Neexistuje-li sousední (párová) kolej ke koleji obsazené vlakem i , musí vlak j přijet k jinému nástupišti a cestující potřebují normální dobu na přestupy. Tato situace je zahrnuta v podmínce (24).

Zbylé obligatorní podmínky (25)–(28) specifikují definiční obory příslušných proměnných modelu.

4. PŘÍPADOVÁ STUDIE A EXPERIMENTY

Představený model byl implementován pro realie (infrastrukturu kolejíště, platný jízdní řád a plán obsazení kolejí) osobní železniční stanice Praha hl.n. z období 2004/2005. Praha hl.n. představuje poměrně rozsáhlou stanici, která v období grafikonu 2004/2005 disponovala 7 nástupišti, 17 nástupištními kolejemi a 4 vjezdovými/odjezdovými kolejemi. Ve zmíněném období stanice obsluhovala 376 pravidelných osobních vlaků denně. Model byl verifikován za použití provozních dat z ranní dopravní špičky (od 5:00 hod. do 10:00 hod.). Podle předpisu Českých drah představovala normální doba potřebná na přestupy cestujících (t^{Cn}) 8 minut a zkrácená doba (t^{Cs}) 4 minuty. Předpis rovněž předepisoval čekací doby přípojných vlaků. Další technologické časy (konstanty/normativy) byly definovány následovně: maximální doba, za kterou má být uvolněna kolej (doba výhledu) $t^{ahd} = 15$ minut, doba jízdy vlaku od vjezdového návěstidla k nástupišti (t^{arr}), jakož i doba potřebná k uskutečnění odjezdu vlaku od nástupišti (t^{dep}) činila 2 minuty pro každý vlak. V souladu s výsledky prací [3] a [4] byly váhy w_A , w_B , w_C , w_D jednotlivých kritérií (vzhledem k přidělování nástupištních kolejí) postupně nastaveny na hodnoty 0,4431, 0,4431, 0,0853, a 0,0284.

V realizovaných experimentech bylo zvoleno plánovací období v délce 2 hodin. Postupným dopředným posunováním tohoto časového horizontu v rámci ranní špičky bylo prověřeno 7 navazujících plánovacích období. Pro každé z těchto období je definována množina přijíždějících a množina tranzitních a přípojných vlaků (tabulka 1), přičemž pro takto definované vstupy je nutné uskutečnit operativní plánování provozu stanice. Počty vlaků přijíždějících v daném plánovacím období odpovídají počtu spojitých proměnných u_i (odjezd vlaku i od vjezdového návěstidla k nástupišti). Počty tranzitních a přípojných vlaků určují počet spojitých proměnných v_i (skutečný čas odjezdu vlaku i). Počet přijíždějících vlaků a počet nástupištních kolejí určuje počet nula-jedničkových (bivalentních) proměnných, který je zásadním faktorem ovlivňujícím výpočetní složitost problému řešeného smíšeným celočíselným programováním.

Tab. 1 - Charakteristika plánovacích období

Plánovací období	Počet			
	přijíždějících vlaků	tranzitních a přípojných vlaků	bivalentních proměnných	omezujících podmínek
5:00–7:00	35	7	2975	13168
5:30–7:30	37	9	3293	14780
6:00–8:00	38	13	3458	15588
6:30–8:30	39	12	3627	16384
7:00–9:00	42	14	4158	19073
7:30–9:30	40	18	3800	17379
8:00–10:00	35	20	2975	13321

Zdroj: Autoři

Tab. 2 - Vybrané výsledky experimentů podle scénáře 1 pro plánovací období 6:30–8:30

Zpoždění vlaku R424 [min]	Počet odlišných přiřazení nástupištních kolejí	Zpoždění přípojného vlaku R852 [min]
0	2	0
5	2	0
10	2	0
15	3	0
20	5	1
25	5	6
30	3	0
35	3	0
40	3	0
45	3	0
50	3	0
55	3	0
60	3	0

Zdroj: Autoři

Pro případ každého plánovacího období byly zkoumány dva scénáře, které se odlišovaly počtem zpožděných vlaků. Ve scénáři 1 byl zpožděn pouze jeden vlak, přičemž byla vyšetřována zpoždění v rozsahu 0 až 60 minut s krokem 5 minut. Zpožděným vlakem byl vždy dálkový vlak. Ve scénáři 2 byly uvažovány vždy dva vybrané zpožděné vlaky, přičemž délka zpoždění každého z nich činila 25 minut. Tyto vlaky přijížděly do stanice v přibližně stejném čase z různých směrů, což mohlo potenciálně způsobovat vážnější problémy týkající se jednak přidělování nástupištních kolejí a jednak přípojných vlaků. V každém z experimentů bylo vyšetřováno přidělování nástupištních kolejí, zpoždění přijíždějících vlaků u vjezdového návěstidla a zpoždění vlaků na odjezdu ze stanice. Provedené experimenty potvrdily předpoklad, že kapacita kolejové infrastruktury zkoumané stanice je dostatečná, jelikož žádný vlak nemusel stát u vjezdového návěstidla (čímž by se navyšovalo jeho zpoždění).

V tabulce 2 jsou demonstrovány výsledky experimentů prováděných podle scénáře 1 pro plánovací období 6:30–8:30. Pro tento případ byl jako zpožděný vybrán vlak R424 končící ve stanici Praha hl.n. (s pravidelným příjezdem v 6:57). Tabulka 2 uvádí všechna prošetřovaná zpoždění zmíněného vlaku, a pro každé z nich další dva vybrané provozní ukazatele. Prvním ukazatelem je počet vlaků, kterým byla přiřazena odlišná nástupištní kolej (z důvodu zpoždění vlaku R424) než je uvedena v příslušném plánu. Druhý ukazatel vyjadřuje délku zpoždění přípojného vlaku R852 na odjezdu ze stanice (pravidelný odjezd vlaku R852 je 7:20).

Tab. 3 - Vybrané výsledky experimentů podle scénáře 2 pro všechna plánovací období

Plánovací období	Vlak 1, typ, pravidelný příjezd	Vlak 2, typ, pravidelný příjezd	Počet odlišných přiřazení nástupištních kolejí	Celková doba zpoždění vlaků na odjezdu [min]
5:00–7:00	422, konč., 5:24	1651, konč., 5:22	3	0
5:30–7:30	374, konč., 5:37	9903, konč., 5:40	3	0
6:00–8:00	252, konč., 6:33	9907, konč., 6:40	4	0
6:30–8:30	424, konč., 6:57	631, tranz., 6:57	3	35
7:00–9:00	200, konč., 7:25	9971, konč., 7:25	3	0
7:30–9:30	610, tranz., 7:33	19905, konč., 7:33	3	25
8:00–10:00	752, tranz., 8:57	876, tranz., 8:59	2	69

Zdroj: Autoři

Analýza výsledků experimentů podle scénáře 1 ukazuje, že několika vlakům byly přiděleny jiné nástupištní koleje, než určuje plán obsazení kolejí (a to dokonce i v případě, že všechny vlaky jely na čas). Příčinou je skutečnost, že kritérium B převáží kritérium D při výpočtu koeficientu vhodnosti (p_{ik}) přidělení koleje k vlaku i (tj. $w_B > w_D$). Existuje-li tedy kolej k , která je do příjezdu následujícího vlaku volná delší dobu než kolej plánovaná, pak model upřednostní pro přidělení kolej k před kolejí, jež byla původně danému vlaku jedoucímu na čas určena. Uvedený případ však nepředstavuje vážnější problém, jelikož tato nevynucená odlišná přiřazení (vzhledem k plánu) představují pouze 5% všech přiřazení. Je-li navíc využití modelu uvažováno jako podpora rozhodovacího procesu dispečera, může tento příslušné navržené řešení podle svých zkušeností korigovat.

Tabulka 3 obsahuje vybrané výsledky experimentů realizovaných podle scénáře 2 pro všechna zkoumaná plánovací období. Pro každé z plánovacích období jsou uvedeny dva vybrané zpožděné vlaky včetně jejich typu (tranzitní nebo končící) a pravidelného příjezdu. Rovněž jsou prezentovány počty přiřazení nástupištních kolejí, které se liší od údajů v plánu

obsazení kolejí. Posledním prezentovaným typem výsledku je celková doba zpoždění tranzitních a přípojných vlaků na odjezdu ze stanice.

Matematický model byl implementován v rámci obecného softwarového optimalizačního nástroje *Xpress-MP*. Experimenty byly prováděny na osobním počítači vybaveném procesorem Intel Core 2 6700 (2,66 GHz) a disponujícím 3 GB paměti RAM. Doba řešení jednoho problému (tj. optimálního operativního plánování pro jedno plánovací období) byla nejvýše 0,41 sekundy pro scénář 1 a 0,58 sekundy pro scénář 2.

5. ZÁVĚR A PERSPEKTIVY DALŠÍHO VÝVOJE

Byl představen návrh a ověření modelu matematického programování zaměřeného na optimální řešení problémů spojených s operativním plánováním provozu v komplexních osobních železničních stanicích. Vstupy do modelu obsahují narušení platného jízdního řádu, tj. některé z přijíždějících vlaků jsou zpožděny. Výstupy z modelu určují přidělování nástupištních kolejí přijíždějícím vlakům, dále časy odjezdů přijíždějících vlaků od vjezdového návěstidla směrem k nástupišti, a konečně upravené časy odjezdů (vzhledem k platnému jízdnímu řádu) tranzitních a přípojných vlaků ze stanice. Řešení (provozních problémů) navržená modelem sledují dva základní cíle: minimalizovat odchylky od platného jízdního řádu a minimalizovat obtíže vznikající cestujícím v důsledku výskytů zpoždění. Zmíněný model lze klasifikovat jako model multikriteriálního smíšeného matematického programování.

Přínosy prezentovaného přístupu uplatňujícího příslušný matematický model jsou následující:

- byla namodelována implicitní pravidla používaná dispečery pro rozhodování ohledně přidělování nástupištních kolejí vlakům,
- byly zohledněny praktické provozní omezující podmínky spojené s přípojnými vlaky – jedná se zejména o ohraničení čekacích dob přípojných vlaků a o uplatňování odlišných dob potřebných na přestupy cestujících v závislosti od vzdálenosti mezi příslušnými nástupišti.

Váhy jednotlivých kritérií uplatněných v účelové funkci jsou stejné, tj. zpoždění vlaků u vjezdového návěstidla, zpoždění vlaků na odjezdu ze stanice a vhodnost přidělení nástupištní koleje mají stejnou důležitost. Váhy nejsou nicméně modelovány explicitně, ani nejsou jednotlivé členy účelové funkce normalizovány. Tento přístup je korektní, neboť hodnoty jednotlivých členů jsou stejného řádu (v desítkách příslušných jednotek), a proto žádný z členů nepřevažuje ty ostatní.

Model může být v budoucnu vylepšován v souvislosti se zahrnutými přípojnými vlaky. Současný přístup nerozlišuje mezi kategoriemi vlaků. Dálkové přípojné vlaky mají stejnou důležitost (prioritu) jako vlaky regionální. Důsledkem toho lze uplatňovat zkrácené doby pro přestupy pro libovolný čekající přípojný vlak bez ohledu na jeho kategorii. Pro odstranění tohoto nedostatku by bylo možné rozdělit druhý člen účelové funkce (zaměřený na zpoždění přípojných vlaků) na dvě vážené části. Část vyjadřující zpoždění dálkových přípojných vlaků by byla spojena s vyšší důležitostí (váhou) než část zahrnující zpoždění vlaků regionálních.

Model založený na matematickém programování byl implementován v prostředí softwarového nástroje *Xpress-MP*. Modelovací jazyk (Mosel), který je k dispozici v uvedeném nástroji, je plně funkčním programovacím jazykem podporujícím dynamickou alokaci paměti pro proměnné, podmíněné generování omezujících podmínek a analýzu řešení v textovém i grafickém tvaru. Jeho prostřednictvím je poměrně snadné modelovat i komplikované omezující podmínky, jako je například podmínka (21). Další výhodou tohoto profesionálního optimalizačního softwaru je, že využívá velmi efektivní algoritmy pro provádění rychlých a přesných výpočtů řešících zadané problémy. To je důvod, proč doby výpočtů výše uvedených experimentů byly tak příznivé. Na druhé straně je třeba zmínit, že použité profesionální programové vybavení není levnou záležitostí. Proto je perspektivně plánováno testování relevantních open-source softwarových produktů, aby se zjistilo, zda dosahují porovnatelnou efektivitu a schopnosti nástroje *Xpress-MP*.

Prezentované přístupy jsou velmi nadějně pro jejich aplikaci v simulačních modelech staničního provozu, které nacházejí uplatnění na úrovni strategického a taktického plánování. Představený matematický model má navíc potenciál využití jako podpora rozhodování při operativním řízení reálného provozu rozsáhlých osobních železničních stanic.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ADAMKO, N., KLIMA, V. Optimisation of railway terminal design and operations using Villon generic simulation model. *Transport : Journal of Vilnius Gediminas Technical University and Lithuanian Academy of Sciences*, 2008, 23(4), s. 335–340.
- [2] ADAMKO, N., MÁRTON, P. Villon – a tool for simulation of operation of transportation terminals. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, 2008, 10(2), s. 10–14.
- [3] BAŽANT, M. Platform track assignment for delayed train using mathematical methods related to multiple criteria evaluation. *Proc. of the 16th international symposium ŽEL 2008*, Žilina : University of Žilina, 2008, s. 325–332.
- [4] BAŽANT, Michael. *Řešení vybraných provozních problémů osobní železniční stanice v rámci simulačního modelu*. Pardubice, 2009. 95 s. Univerzita Pardubice.
- [5] BAŽANT, Michael, KAVIČKA, Antonín. Artificial neural network as a support of platform track assignment within simulation models reflecting passenger railway stations. *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2009, vol. 223, no. 5, s. 505-515.
- [6] BILLIONNET, A. Using integer programming to solve the train-platforming problem. *Transportation Science*, 2003, 37 (2), s. 213-222.
- [7] CAPRARA, A., MONACI, M., TOTH, P., GUIDA, P.L. A Lagrangian heuristic algorithm for a real-world train timetabling problem. *Discrete Applied Mathematics*, 2006, 154(5), s. 738–753.
- [8] CAREY, M. and CARVILLE, S. Scheduling and platforming trains at busy complex stations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2003, 37 (3), s. 195-224.
- [9] CHAKROBORTY, P., VIKRAM, D. Optimum assignment of trains to platforms under partial schedule compliance. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2008, 42(2), s. 169–184.
- [10] CORMAN, F., D'ARIANO, A., PRANZO, M., HANSEN, I.A. Effectiveness of dynamic reordering and rerouting of trains in a complicated and densely occupied

- station area. *3rd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, Zürich, 2009.
- [11] FIALA, P., JABLONSKÝ, F., MAŇAS M. *Vícekritériální rozhodování*. Praha : Vysoká škola ekonomická v Praze, 1994. 316 str. ISBN 80-7079-748-7.
- [12] MÁRTON, P. Simulation support of railway station infrastructure design. *Proc. of the 6th conference of European students of traffic and transportation sciences "Transport modal split as economic indicator"*, June 2008, Žilina : University of Žilina, s. 68–74.
- [13] TÖRNQUIST, J., PERSSON, J.A. *N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances. Transportation Research Part B: Methodological*, 2007, 41(3), s. 342–362.
- [14] ZWANEVELD, P.J., KROON, L.G., Van HOESEL, S.P.M. Routing trains through a railway station based on a node packing model. *European Journal of Operational Research*, 2001, 128(1), s. 14–33.

Tento příspěvek vznikl za podpory výzkumného záměru MSM 0021627505 Teorie dopravních systémů.

Recenzenti: prof. Ing. Jaroslav Janáček, CSc.
Žilinská univerzita, FRI, Katedra dopravných sítí
doc. Ing. Pavel Drdla, Ph.D.
Univerzita Pardubice, DFJP, Katedra technologie a řízení dopravy