

# PŘIDĚLOVÁNÍ NÁSTUPIŠTNÍ KOLEJE PRO PŘIJÍZDĚJÍCÍ ZPOŽDĚNÝ VLAK S VYUŽITÍM METOD VÍCEKRITERIÁLNÍHO HODNOCENÍ VARIANT PLATFORM TRACK ASSIGNMENT FOR DELAYED TRAIN USING MATHEMATICAL METHODS RELATED TO MULTIPLE-CRITERIA EVALUATION

Michael Bažant<sup>1</sup>

---

*Anotace: Příspěvek se zabývá problematikou rozhodování v rámci simulačních modelů osobních železničních stanic. Konkrétním problémem, jehož řešení je předmětem tohoto příspěvku, je určování nástupištní koleje pro přijíždějící zpožděný vlak. Pro určování kolejí v simulačních modelech osobních železničních stanic byla navržena čtyři rozhodovací kritéria, pro něž je nutné stanovit jejich váhu. Stanovení vah těchto kritérií je poměrně složitým problémem, přičemž je pro řešení tohoto problému možné využít několik metod. Tento příspěvek se zabývá stanovením vah kritérií s využitím metod vícekritériálního hodnocení variant a uvádí výsledky, kterých lze s využitím těchto metod dosáhnout.*

*Klíčová slova: Simulační model, přidělování kolejí, zpoždění vlaků osobní dopravy*

*Summary: The paper deals with decision making problems within simulation model of passenger railway stations. Concrete problem that is solved in this paper is platform track assignment within simulation model of passenger railway station that includes delayed trains on their arrivals. There were designed four criteria and next step is to determine criteria weights whereas there are several methods to do it. This paper deals with weight determination using multiple criteria decision analysis and presents results that were achieved using these methods.*

*Key words: Simulation model, track assignment, delays of passenger trains*

## 1. ÚVOD

Při simulaci provozu osobních železničních stanic se zahrnutím příjezdu zpožděných vlaků vzniká problém s určením vhodné koleje u nástupiště pro tyto vlaky. Výběr kolejí je realizovatelný v těch stanicích, kde je možnost výběru z více kolejí u nástupišť.

Přidělená kolej by měla odpovídat rozhodovacím mechanismům, které jsou standardně uplatňovány na stanicích řídicími pracovníky. Tedy rozhodnutí přijímaná v rámci simulačních modelů osobních stanic by měla co nejvíce kopírovat výsledky příslušného rutinního rozhodování dispečerů v praxi.

---

<sup>1</sup> Ing. Michael Bažant, Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra softwarových technologií, Nám. Čs. legií 565, 532 10 Pardubice, tel.: +420 466 037 224, e-mail: [Michael.Bazant@upce.cz](mailto:Michael.Bazant@upce.cz)

K tomuto účelu byla navržena čtyři kritéria, která byla odvozena ze znalosti práce řídicích pracovníků. Jedná se o tato kritéria:

- A: volnost koleje v okamžiku příjezdu vlaku,
- B: doba volnosti koleje vzhledem k době pobytu příjíždějícího vlaku ve stanici,
- C: obsazení sousední koleje u stejného nástupiště přípojným vlakem,
- D: další technické a technologické přednosti koleje pro příjíždějící vlak.

Z definice úlohy je zřejmé, že se jedná o úlohu vícekritériálního hodnocení variant [1], neboť množina rozhodovacích variant (množina přípustných kolejí), označovaná jako  $K = \{k_j \mid j = 1, \dots, m\}$ , má konečný počet prvků. Jsou-li určena kritéria ( $A, B, C, D$ ) a metody výpočtu hodnot těchto kritérií pro jednotlivé rozhodovací varianty, lze úlohu vícekritériálního hodnocení variant charakterizovat tzv. kritériální maticí. Prvek kritériální matice  $y_{ij}$  vyjadřuje hodnotu kritéria  $i$  (kde  $i = 1, \dots, 4$  odráží kritéria  $A, \dots, D$ ) pro příslušnou variantu/kolej  $k_j \in K$ . Zmíněnou matici lze zapsat ve tvaru:

$$\begin{matrix}
 & k_1 & k_2 & \dots & k_m \\
 A & \left( \begin{matrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2m} \\ y_{31} & y_{32} & \dots & y_{3m} \\ y_{41} & y_{42} & \dots & y_{4m} \end{matrix} \right) \\
 B \\
 C \\
 D
 \end{matrix} \tag{1}$$

Při vyhodnocování hodnot jednotlivých kritérií je uplatňována maximalizační zásada, což znamená, že všechna kritéria jsou určena tak, že varianta je hodnocena tím lépe, čím jsou hodnoty kritérií větší.

Výpočet hodnot kritérií  $A$  a  $B$  vychází z Plánu obsazení kolejí ve stanici, který se sestavuje pro každou větší osobní stanici. Pro každou dopravní kolej ve stanici jsou k dispozici údaje o jejím obsazení vlaky s krokem jedné minuty.

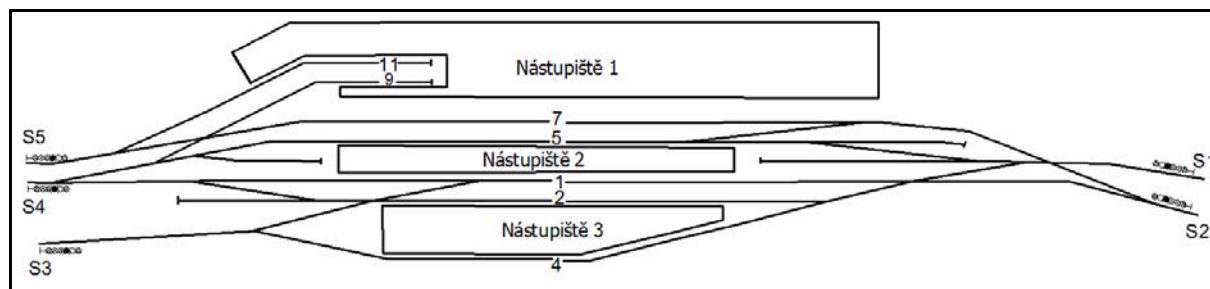
V další kapitole jsou uvedeny bližší informace o výpočtu hodnot kritérií  $A-D$ .

## 2. KRITÉRIA PRO URČENÍ NÁHRADNÍ NÁSTUPIŠTNÍ KOLEJE

Při určování kritérií, podle kterých bude probíhat přiřazení náhradní nástupištní koleje v rámci simulačního modelu, je nutné se podívat na tento proces v provozu. Pokud do stanice přijíždí zpožděný vlak, řídicí pracovník mu musí přidělit takovou kolej, jež pro něj bude nejvhodnější, přičemž je ve hře několik hledisek pro rozhodování. Stejný postup bude uplatněn při přidělování nástupištní koleje v simulačním modelu, pro zjednodušení bude v první fázi uvažováno s příjezdy zpožděných vlaků pouze z jednoho směru.

Prvním krokem při výběru nástupištní koleje je určení množin přípustných kolejí pro příjíždějící vlak, které jsou určovány vzhledem k vjezdové a odjezdové koleji do, resp. ze sledované stanice. Množiny přípustných kolejí jsou označeny jako  $K_{S_i, S_j}$ , kde  $S_i$  je označení příslušné vjezdové a  $S_j$  odjezdové koleje. Určení množin přípustných kolejí lze demonstrovat na příkladu ilustračního kolejiště (obr. 1). Pro tento příklad lze určit např. následující apriorní množiny přípustných kolejí:  $K_{S1, S1} = \{4, 2, 1, 5, 7\}$ ,  $K_{S1, S2} = \{4, 2, 1, 5, 7\}$ ,  $\dots$ ,  $K_{S5, S5} = \{7, 9$ ,

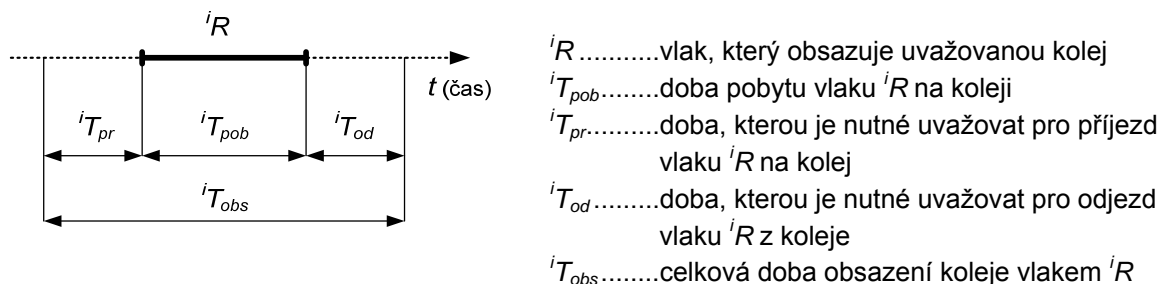
II}. Tyto množiny lze ještě dále redukovat o koleje nevhodné pro uvažovaný vlak např. z důvodu nedostatečné délky koleje apod.



Obr. 1 – Ilustrační kolejiště osobní železniční stanice

## 2.1. Volnost koleje v okamžiku příjezdu vlaku

Kritérium hodnotící volnost koleje by mělo logicky nabývat pouze dvou hodnot a to kolej je volná nebo je kolej obsazena (obrázek 2 ilustruje dobu obsazení koleje jedním vlakem). Takto postavené kritérium by ale nedokázalo činit rozdíly mezi kolejemi, které jsou v daném čase obsazené a budou obsazené na dlouhou dobu a kolejemi, které jsou v daném čase obsazené, ale v poměrně krátkém čase už by mohly být využity příjezdějším vlakem. Z tohoto důvodu je vhodné toto kritérium rozšířit o faktor času se stanoveným výhledem do budoucna.

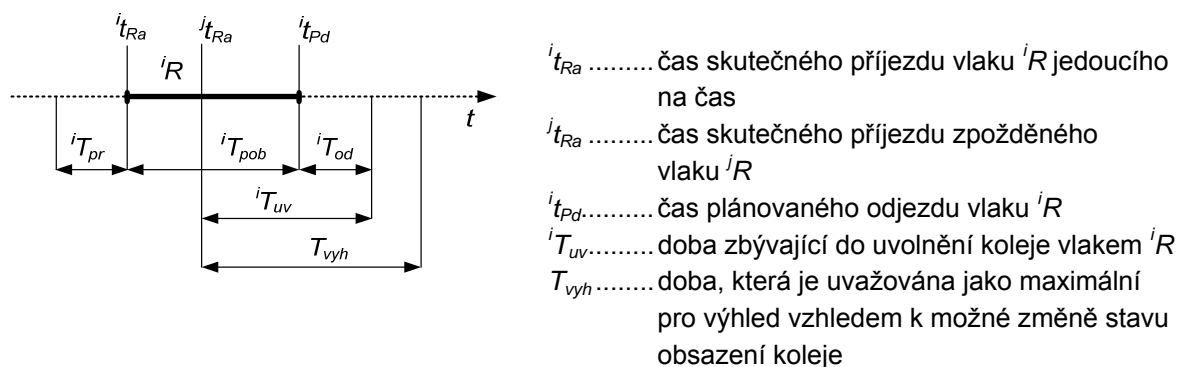


Obr. 2 – Celková doba obsazení koleje jedním vlakem

Pokud zpožděný vlak  ${}^jR$  přijíždí k uvažované koleji mimo interval  ${}^iT_{obs}$ , kolej je volná a hodnotu kritéria  $A$  volíme rovnu jedné ( $A = 1$ ).

Informaci ohledně doby výhledu do budoucna (označované jako  $T_{vyh}$ ) lze využít pro ohodnocení koleje v případě, kdy zpožděný vlak přijíždí v čase, kdy je kolej obsazena. Mohou nastat dva případy:

- Během doby výhledu dojde k uvolnění koleje (tato situace je na obr. 3). Hodnotu kritéria  $A$  vypočteme podle vztahu (2).
- Během doby výhledu nedojde k uvolnění koleje, potom podle vztahu (2) platí, že hodnota kritéria je rovna nule ( $A = 0$ ).



Obr. 3 – Příjezd zpožděného vlaku  $jR$  v době obsazení uvažované koleje vlakem  $iR$

Pro výpočet hodnoty kritéria  $A$  je uplatněn výraz:

$$A = \max\left\{0, 1 - \frac{i T_{uv}}{T_{vyh}}\right\} \quad (2)$$

Dobu zbývající do uvolnění koleje vlakem  $iR$  (v okamžiku příjezdu zpožděného vlaku  $jR$ ) lze vypočítat podle vztahu:

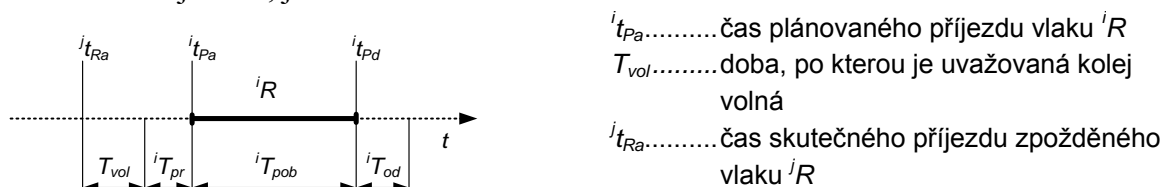
$$i T_{uv} = i t_{Pd} - j t_{Ra} + i T_{od} \quad (3)$$

## 2.2. Doba volnosti koleje vzhledem k době pobytu vlaku ve stanici

Druhým kritériem je doba volnosti koleje vzhledem k době pobytu příjíždějícího zpožděného vlaku ve stanici. Stanovení hodnoty kritéria  $B$  se vztahuje k plánovanému času pobytu vlaku  $jR$  na koleji. V první fázi stanovení hodnoty kritéria je počítáno s konstantní (plánovanou) dobou pobytu vlaku ve stanici, přičemž v další fázi výzkumu je možné s tímto kritériem dále pracovat v tom smyslu, že je možné u vybraných vlakových spojů uvažovat o kratší než plánované době pobytu vlaku ve stanici. Tato poznámka se týká zejména vlaků, které mají ve stanicích delší plánovanou dobu pobytu a zkrácením doby pobytu by nevznikaly komplikace při vykonávání obsluhy podle stanovených postupů technologických procesů.

Stejně jako u kritéria  $A$  bude i u kritéria  $B$  hodnota z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ .

Výpočet probíhá na základě vyhodnocení doby, po kterou je uvažovaná kolej volná do příjezdu dalšího vlaku. Schéma k výpočtu pro příjezd zpožděného vlaku v čase, kdy je uvažovaná kolej volná, je znázorněno na obr. 4.



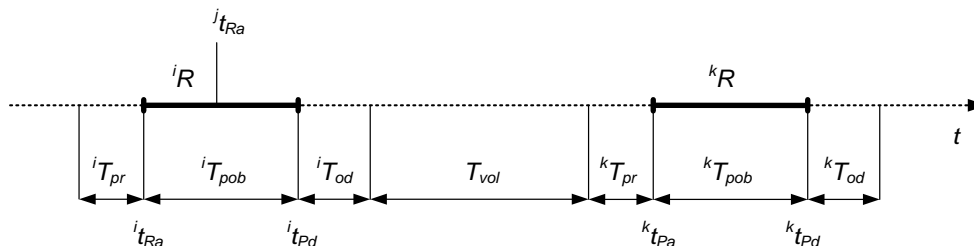
Obr. 4 – Schéma k výpočtu hodnoty kritéria  $B$  – uvažovaná kolej je v době příjezdu zpožděného vlaku volná

V tomto případě lze hodnotu kritéria  $B$  vypočítat dle následujícího vztahu:

$$B = \min\left\{1, \frac{T_{vol}}{j T_{obs}}\right\}, \quad (4)$$

kde  ${}^jT_{obs}$  je plánovaná doba obsazení dané koleje vlakem  ${}^jR$ .

Pokud vlak  ${}^jR$  přijede v době, kdy je uvažovaná kolej obsazena, je postup výpočtů podobný, s tím že časový interval (o délce  $T_{vol}$ ), po který je kolej volná, započne až po uvolnění této koleje vlakem  ${}^iR$ . Tento případ znázorňuje obr. 5.

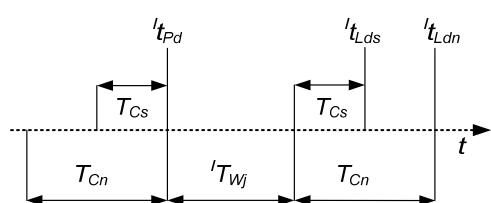


Obr. 5 – Schéma k výpočtu hodnoty kritéria  $B$  – uvažovaná kolej je v době příjezdu zpožděného vlaku obsazena

### 2.3. Obsazení koleje u stejného nástupiště přípojným vlakem

Pokud na přijíždějící zpožděný vlak  ${}^jR$  čeká přípojný vlak  ${}^lR$ , kterému by tímto čekáním mohlo vzniknout zpoždění, případně by mohlo dojít k nárůstu zpoždění, je vhodné přijíždějící zpožděný vlak umístit ke stejnému nástupišti tak, aby mohla být uplatněna zkrácená doba potřebná na přestup. Analýzou čekání přípojného vlaku na zpožděný vlak se zabývá publikace [4].

Z tohoto důvodu je zavedeno kritérium označované jako  $C$ . Toto kritérium se liší od předchozích kritérií tím, že nabývá pouze dvou hodnot. Na obr. 6 je znázorněn postup výpočtu hodnoty kritéria  $C$ .



- ${}^l t_{Pd}$ .....plánovaný odjezd vlaku  ${}^lR$
- $T_{Cn}$ .....normální doba potřebná na přestup
- $T_{Cs}$ .....zkrácená doba potřebná na přestup
- ${}^l T_{Wj}$ .....čekací doba vlaku  ${}^lR$  na zpožděný přijíždějící vlak  ${}^iR$
- ${}^l t_{Lds}$ .....nejzazší přípustný čas odjezdu vlaku  ${}^lR$  při uplatnění zkrácené doby potřebné na přestup
- ${}^l t_{Ldn}$ .....nejzazší přípustný čas odjezdu vlaku  ${}^lR$  při uplatnění normální doby potřebné na přestup

Obr. 6 – Ilustrační schéma k určení časového intervalu pro určení hodnoty kritéria  $C$

Z obrázku je patrné, že je výhodné pro příjezd zpožděného vlaku  ${}^jR$  v časovém intervalu  $\langle {}^l t_{Pd} - T_{Cn}, {}^l t_{Pd} + {}^l T_{Wj} \rangle$  tento přijíždějící vlak umístit ke stejnému nástupišti, u něhož na něj čeká přípojný odjíždějící vlak z důvodu úspory času na přestup cestujících (mezi přijíždějícím zpožděným vlakem  ${}^jR$  a vlakem přípojným  ${}^lR$ ).

Hodnotu kritéria  $C$  pro koleje sousedící s kolejí, ze které odjíždí přípojný vlak určíme takto:

$$C = 1 \text{ pro } {}^j t_{Ra} \in \langle {}^l t_{Pd} - T_{Cn}, {}^l t_{Pd} + {}^l T_{Wj} \rangle$$

$$C = 0 \text{ pro } {}^j t_{Ra} \notin \langle {}^l t_{Pd} - T_{Cn}, {}^l t_{Pd} + {}^l T_{Wj} \rangle$$

## 2.4. Další technické a technologické přednosti koleje

Poslední kritérium (označované jako  $D$ ) odráží další technické a technologické přednosti přidělení dané koleje uvažovanému zpožděnému přijíždějícímu vlaku  ${}^j R$ . Stejně jako u předchozích kritérií jsou hodnoty kritéria  $D$  z intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ . Kolej pravidelně určená přijíždějícímu vlaku může mít ohodnocení např.  $D = 1$ , koleje nevhodné pro přijíždějící vlak potom  $D = 0$ . Ostatní koleje nabývají ohodnocení z intervalu  $(0,1)$ , přičemž je možné měnit hodnotu tohoto kritéria pro různé hodnoty zpoždění vlaku  ${}^j R$ . Hodnotu kritéria  $D$  je stanovíme na základě znalostí provozu zkoumané stanice (např. s využitím konzultací s provozními zaměstnanci). Hodnota kritéria  $D$  může odrážet například následující skutečnosti:

- vzdálenost uvažované koleje pro přidělení od plánované koleje pro přijíždějící vlak (zmíněná vzdálenost má vliv na doby přestupů cestujících),
- míru obsazení příjezdového kolejového zhlaví přijíždějícím vlakem, pokud mu bude přidělena uvažovaná kolej (obsazenost zhlaví může negativně ovlivňovat jízdu dalších vlaků, které v příslušném časovém intervalu stejně zhlaví rovněž využívají).

## 3. METODY ŘEŠENÍ

V předchozí části příspěvku je uvedena definice úlohy jako takové a byly uvedeny zásady pro výpočet hodnot kritérií  $A$ – $D$  pro jednotlivé rozhodovací varianty. Po dokončení těchto kroků je k dispozici kriteriální matice (1) s konkrétními hodnotami pro různé dopravní situace.

Dalším krokem je určení vah pro jednotlivá kritéria  $A$ – $D$ , čímž dojde k vyjádření důležitosti těchto kritérií. Určení vah kritérií lze dosáhnout s využitím několika metod, mezi něž patří:

- a) matematické metody výpočtu vah kritérií,
- b) umělé neuronové sítě,
- c) fuzzy logika.

V další části příspěvku bude zaměřena pozornost na matematické metody výpočtu vah kritérií, kdy jsou nejprve připravena data pro stanovení vah kritérií a následně jsou určeny váhy kritérií. Na základě vypočtených vah poté dojde k vyhodnocení dopravních situací (výběru koleje) a teprve po vyhodnocení dopravních situací lze určit (vyhodnocení provede expert), zda došlo ke správnému výběru koleje či nikoliv. Tento postup je stejný i v případě využití fuzzy logiky (tento přístup k vyhodnocení nástupištní koleje není předmětem tohoto příspěvku).

Odlišný způsob řešení je založen na uplatnění umělých neuronových sítí, které mohou být také použity pro vyhodnocení vah kritérií. Výhoda použití umělých neuronových sítí spočívá v přípravě trénovacích vzorů i s odpovídajícími výstupy, na něž je neuronová síť učena. Po ukončení fáze učení je neuronová síť připravena k použití a správně naučená

neuronová síť dokáže vstupům, na něž nebyla učena (testovací data), přiřadit výstupy např. v podobě ohodnocení vhodnosti posuzované koleje.

#### 4. MODELOVÁNÍ PREFERENCÍ MEZI KRITÉRII

Většina metod vícekritériálního rozhodování vyžaduje informaci o relativní důležitosti jednotlivých kritérií, kterou lze vyjádřit pomocí vektoru vah kritérií:

$$v = (v_A, v_B, v_C, v_D); \quad \sum_{i=A}^D v_i = 1; \quad v_i \geq 0 \quad (5)$$

Čím je důležitost kritéria větší, tím je větší i jeho váha. Získat od uživatele přímo hodnoty vah je poměrně obtížná záležitost, avšak existují metody, které na základě jednodušších subjektivních informací od uživatele konstruují odhady vah.

Výsledné ohodnocení koleje  $k$  (její vhodnost pro přijíždějící zpožděný vlak) lze vypočítat na základě tohoto vztahu:

$$O_k = \sum_{i=A}^D y_{ik} \cdot v_i \quad k = 1, \dots, m \quad (6)$$

Po ohodnocení všech kolejí z množiny přípustných kolejí je vybrána kolej, jejíž ohodnocení  $O_k$  je maximální.

##### 4.1. Praktické způsoby získávání vah kritérií

Mezi základní matematické metody určování vah kritérií patří metody:

- metoda pořadí,
- metoda párového srovnání kritérií – Fullerova metoda,
- metoda kvantitativního párového srovnání kritérií (určení vah z geometrického průměru řádků, Saatyho metoda určování vah kritérií).

V další části příspěvku bude uveden způsob výpočtu vah kritérií s využitím uvedených metod i s dosaženými výsledky.

##### 4.1.1. Metoda pořadí

Tato metoda vyžaduje pouze ordinální informaci, tedy stanovení pořadí kritérií podle důležitosti. Uspořádaným kritériím jsou přiřazena čísla  $k, \dots, 1$ . Nejdůležitějšímu kritériu je přiřazeno číslo  $k$  (počet kritérií), druhému nejdůležitějšímu  $k - 1$ , až nejméně důležitému kritériu číslo  $1$ . Tyto hodnoty jsou pro každé kritérium vyjádřeny v proměnné  $b_i$ . Váha  $i$ -tého kritéria se pak vypočte dle vzorce:

$$v_i = \frac{b_i}{\sum_{i=A}^D b_i} \quad i = A, B, C, D \quad (7)$$

Pro případ, kdy je uvažováno se čtyřmi kritérii vychází, za předpokladu dodržení důležitosti dle uvedeného pořadí kritérií, podle vztahu (7) tyto váhy kritérií:  $v_A = 0,4$ ;  $v_B = 0,3$ ;  $v_C = 0,2$  a  $v_D = 0,1$ .



## 4.1.2. Metoda párového srovnání kritérií – Fullerova metoda

U této metody se používá pro určení vah pouze informace, které ze dvou kritérií je při párovém srovnání důležitější. Uživatel postupně srovnává každá dvě kritéria mezi sebou.

Srovnání se mohou provádět v tzv. Fullerově trojúhelníku. Kritéria se pevně očísují pořadovými čísly  $1, 2, \dots, k$ . Srovnání lze vykonat na trojúhelníkovém schématu, jehož dvojřádky tvoří dvojice pořadových čísel uspořádaných tak, že se každá dvojice kritérií vyskytne právě jednou. Dále je označeno důležitější kritérium u každé dvojice, která je porovnávána. Váha  $i$ -tého kritéria se pak vypočte podle vzorce (8). V případě, kdy mají být vyloučeny nulové váhy, zvyšuje se v případě potřeby každý počet zakroužkovaných čísel o jedničku a musí se odpovídajícím způsobem zvýšit i hodnota jmenovatele ve vzorci (8). V proměnné  $n_i$  je informace o počtu vybrání daného kritéria, v proměnné  $N$  je potom informace o celkovém počtu vybrání všech kritérií.

$$v_i = \frac{n_i}{N} \quad i = A, B, C, D \quad (8)$$

Pro porovnání kritérií  $A-D$  vypadá vyhodnocení Fullerovy metody takto:

<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>
<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<hr/>		
	<b>B</b>	<b>B</b>
	<b>C</b>	<b>D</b>
	<hr/>	
	<b>C</b>	
	<b>D</b>	

Kritérium  $A$  je vybráno dvakrát jako jednoznačně důležitější (2 body), jednou potom jako stejně důležité jako kritérium  $B$  (0,5 bodu). Za tohoto předpokladu vychází hodnoty  $n_A = 2,5$  bodu,  $n_B = 2,5$  bodu,  $n_C = 1$  bod. Aby byla vyjádřena i váha kritéria  $D$ , je navýšena hodnota všech součtů  $n_i$  o 1 bod. Tím jsou získány finální hodnoty  $n_A = 3,5$  bodu,  $n_B = 3,5$  bodu,  $n_C = 2$  body,  $n_D = 1$  bod.

Váhy kritérií potom dle vztahu (8) vychází:  $v_A = 0,35$ ;  $v_B = 0,35$ ;  $v_C = 0,2$  a  $v_D = 0,1$ .

## 4.1.3. Metody kvantitativního párového srovnání kritérií

Tato metoda staví na matici párových srovnání  $S = (s_{ij})$ , kdy  $i, j = 1, 2, \dots, k$ , přičemž se často používá stupnice 1–9 a reciproké hodnoty. Prvky matice  $s_{ij}$  jsou interpretovány jako odhady podílu vah  $i$ -tého a  $j$ -tého kritéria:

$$s_{ij} \approx \frac{v_i}{v_j} \quad i, j = A, \dots, D \quad (9)$$

Matici  $S$  se říká Saatyho matice. Prvkům matice  $S$  odpovídá tato verbální stupnice:

- 1 – rovnocenná kritéria  $i$  a  $j$ ,
- 3 – slabě preferované kritérium  $i$  před  $j$ ,
- 5 – silně preferované kritérium  $i$  před  $j$ ,
- 7 – velmi silně preferované kritérium  $i$  před  $j$ ,
- 9 – absolutně preferované kritérium  $i$  před  $j$ .



Hodnoty 2, 4, 6, 8 vyjadřují mezistupně. Prvky na diagonále  $s_{ii} = 1$ , matice  $S$  je reciproční matice – platí tedy:  $s_{ij} = 1/s_{ji}$ .

Sestavení Saatyho matice je subjektivní záležitostí a je tedy poměrně složité ji sestavit tak, aby vypočtené váhy vykazovaly dobré výsledky. Z celé řady sestavených a následně vyhodnocených matic vykazuje, pro použitá data, nejlepší výsledky právě tato matice:

$$\begin{array}{c}
 A \quad B \quad C \quad D \\
 \begin{pmatrix}
 1 & 1 & 9 & 9 \\
 1 & 1 & 9 & 9 \\
 \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & 1 & 9 \\
 \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & 1
 \end{pmatrix}
 \end{array} \quad (10)$$

Po sestavení Saatyho matice je nutné aplikovat některou z těchto metod pro výpočet vah kritérií  $A-D$ , např.:

- a) metodu geometrického průměru řádků, kdy je vypočten geometrický průměr

každého řádku  $i$  podle vztahu  $g_i = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k s_{ij}}$  a následně jsou normalizací získány

hodnoty vah kritérií. Pro matici (10) výpočet poskytuje tyto váhy kritérií:  $v_A = 0,4431$ ;  $v_B = 0,4431$ ;  $v_C = 0,0853$ ;  $v_D = 0,0284$ .

- b) Saatyho metodu. Saatyho postup pro odvození vah kritérií z matice párových porovnání spočívá ve výpočtu vlastního vektoru matice  $S$ . Pro tento výpočet existuje několik numerických metod, jedna z nich je založena na platnosti vztahu (11), kde  $S$  je reciproční matice,  $v$  je vektor příslušející největšímu vlastnímu číslu,  $c$  je konstanta a  $e^T = (1, 1, \dots, 1)$ . Vztah (11) říká, že vektor tvořený součtem prvků řádků  $r$ -té mocniny matice  $S$  dělený součtem všech prvků této matice se blíží pro dostatečně velké  $r$  vlastnímu vektoru matice  $S$  příslušející největšímu vlastnímu číslu. Zkušenosti ukazují, že dostatečnou přesnost dosáhneme již pro  $r = 16$ . Pro výpočet vektoru vah kritérií v použijeme vztah (11), jehož odvození je k dispozici např. v publikaci (5).

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{S^r \cdot e}{e^T \cdot S^r \cdot e} = c \cdot v \quad (11)$$

Po dosazení do vztahu (11) jsou výsledkem tyto váhy kritérií:  $v_A = 0,4357$ ;  $v_B = 0,4357$ ;  $v_C = 0,0991$ ;  $v_D = 0,0295$ .

## 5. POROVÁNÍ METOD NA KONKRÉTNÍCH SITUACÍCH

Pro porovnání jednotlivých metod bylo nutné vyčíslit hodnoty kritérií  $A-D$  pro poměrně velký počet situací. Při výběru osobní stanice, na niž mají být provedeny výpočty, bylo přihlédnuto k počtu kolejí ve stanici, počtu vlaků ve sledovaném období a dobré znalosti místních poměrů (znalost rozhodování v určitých provozních situacích). Z tohoto důvodu byla

vybrána pro případovou studii železniční stanice Praha hlavní nádraží s verzí infrastruktury a grafikonu vlakové dopravy 2004/2005.

Pro výpočet kritériálních matic (1) byla vybrána ranní dopravní špička (5.30–9.00 hod.), kdy v případě vzniku zpoždění vlaků dochází, v porovnání se zbytkem dne, k největším problémům s přidělením nástupištní koleje.

Pro určení nástupištní koleje byl vybrán směr od Kolína, přičemž v době ranní dopravní špičky přijíždí do železniční stanice Praha hlavní nádraží 11 dálkových spojů, pro něž byly vyhodnoceny kritériální matice (1). Hodnota uvažovaného zpoždění u každého vlaku byla stanovena na hodnotu 0–60 minut. Z tohoto omezení vychází posuzovaných 671 případů (v Tabulce 1 je uveden jeden příklad konkrétní situace), pro které byla vyhodnocena kritériální matice. Pro všechny ostatní vlaky ve sledované stanici je uvažována jejich jízda podle grafikonu vlakové dopravy, tzn. bez zpoždění.

Tab. 1 – Hodnocení uvažovaných kolejí podle jednotlivých metod

Kritérium (metoda)	$k_9$	$k_7$	$k_1$	$k_2$	$k_8$	$k_{12}$	$k_{14}$	$k_{16}$
A	1	0	1	1	0,5	1	0	0
B	0,96	0,12	0,4	0,76	0	1	0	1
C	0	0	0	0	0	0	0	0
D	0,8	0,85	0,9	1	0,95	0,15	0,1	0,75
Metoda pořadí	<b>0,7680</b>	0,1210	0,6100	0,7280	0,2950	0,7150	0,0100	0,3750
Fullerova metoda	<b>0,7660</b>	0,1270	0,5800	0,7160	0,2700	0,7150	0,0100	0,4250
Met. geom. průměru	0,8912	0,0773	0,6459	0,8083	0,2485	0,8905	0,0028	0,4644
Saatyho metoda	0,8776	0,0774	0,6365	0,7963	0,2459	0,8758	0,0030	0,4578

Kritérium (metoda)	$k_{20}$	<b><math>k_{22}</math></b>	$k_{24}$	$k_{26}$	$k_{28}$	$k_{30}$	$k_{32}$
A	1	<b>1</b>	0	1	0	0	0,8
B	0	<b>1</b>	0	0,92	0,56	0,36	1
C	0	<b>0</b>	0	0	0	0	0
D	0,7	<b>0,65</b>	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
Metoda pořadí	0,4700	0,7650	0,0600	0,7310	0,2180	0,1530	0,6600
Fullerova metoda	0,4200	0,7650	0,0600	0,7270	0,2460	0,1710	0,6700
Met. geom. průměru	0,4630	<b>0,9047</b>	0,0170	0,8664	0,2623	0,1723	0,8089
Saatyho metoda	0,4564	<b>0,8906</b>	0,0177	0,8528	0,2587	0,1701	0,7961

Po výpočtu příslušných kritériálních matic bylo expertem provedeno vyhodnocení vzniklých situací, tzn. určení kolejí, které by byly vybraným vlakům přiděleny v případě vzniku takové situace v provozu. V tabulce 1 je uveden příklad jedné z vyhodnocovaných situací i s výsledky, které poskytují jednotlivé metody vícekritériálního hodnocení. Tato konkrétní situace se vztahuje k vlaku R 222 (pravidelný čas příjezdu v 8.20 hod.) v situaci, kdy je zpožděn o 9 minut. Při výskytu této situace by byla expertem vybrána kolej 22, což je v tabulce znázorněno orámováním sloupce příslušejícího ke koleji 22. V řádcích pod kritérii A–D je uveden výsledek uvedených metod, přičemž při uplatnění metody pořadí a Fullerovy

metody by byla vybrána, z pohledu experta, nesprávně kolej 9, zatímco při uplatnění metody geometrického průměru a Saatyho metody by byla vybrána správně kolej 22.

Ohodnocení kolejí lze získat po dosazení vah kritérií pro příslušné metody a hodnot kritérií *A–D* do vztahu (6) a po výpočtu ohodnocení všech kolejí je vybrána kolej s maximálním ohodnocením (taková ohodnocení jsou v řádcích příslušejících k jednotlivým metodám zvýrazněna v tabulce tučným písmem).

Tímto způsobem bylo vyhodnoceno všech 671 dopravních situací, v tabulce 2 je uvedena úspěšnost jednotlivých metod při porovnávání s výběrem, který by učinil dopravní expert.

Tab. 2 – Porovnání úspěšnosti jednotlivých metod

<i>Metoda</i> \ <i>váhy kritérií</i>	<i>Váhy kritérií</i>				<i>úspěšnost [%]</i>
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	
Metoda pořadí	0,40	0,30	0,20	0,10	91,50
Fullnerova metoda	0,35	0,35	0,20	0,10	94,19
Geometrický průměr řádků	0,44	0,44	0,09	0,03	93,30
Saatyho metoda	0,44	0,44	0,10	0,03	99,70

## 6. ZÁVĚR

Všechny tyto metody jsou založeny na subjektivním přístupu, to znamená že se hodnoty vah a tudíž i výsledky mohou lišit dle názoru experta na tuto problematiku. Úspěšnosti uvedené v tabulce 2 se také mohou měnit závislosti na posuzovaných dopravních situacích, což prokazuje práce (6).

Možná vylepšení spočívají jednak ve zvýšení počtu expertů, tzn. ve vytvoření týmu odborníků a následné objektivizaci expertních výpovědí, další možností je potom použití jiných metod (např. neuronových sítí).

*Príspevek vznikl za podpory Institucionálního výzkumu MSM 0021627505 „Teorie dopravních systémů“ Univerzity Pardubice.*

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] FIALA, P., JABLONSKÝ, F., MAŇAS M. *Vícekritériální rozhodování*. Praha : Vysoká škola ekonomická v Praze, 1994. 316 s. ISBN 80-7079-748-7.
- [2] BAŽANT M. Metodika určování náhradní nástupištní koleje pro přijíždějící zpožděný vlak, In: *INFOTRANS 2007*. Univerzita Pardubice, Pardubice, 2007, pp. 57–62, ISBN 978-80-7194-989-3.
- [3] Čekací doby a opatření při zpoždění vlaků osobní dopravy. Praha: Odbor 16, GŘ ČD, 2004.
- [4] 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. s. 142-147. ISBN 80-8070-400-7.
- [5] RAMÍK J. *Vícekritériální rozhodování – analytický hierarchický proces (AHP)*. Karviná : Slezská univerzita v Opavě, 1999. 211s. ISBN 80-7248-047-2.

- [6] ČESNEK, M. *Metody určování nástupištní koleje pro zpožděný přijíždějící vlak v osobních železničních stanicích s využitím výpočetní techniky*. Pardubice, 2008. 81 s. Diplomová práce na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice. Vedoucí diplomové práce Michael Bažant.

Recenzent: doc. Ing. Ludmila Jánošíková, CSc.  
Žilinská univerzita, FRI, Katedra dopravných sietí