

Metoda STEM a její variantní využití v případě omezené kapacity železniční dopravní cesty

Pavel Purkartⁱ

Abstrakt: Každá dopravní cesta má omezenou kapacitu, tedy nemusí být schopná vyhovět všem požadavkům na její přidělení – významná je tato skutečnost zejména u železniční dopravní cesty. Cílem je vyhovět takovým požadavkům, které přinesou co nejvíce benefitů v případě jejich využití. Tento příspěvek nastiňuje řešení tohoto problému s využitím lineárně optimalizační metody STEM. V několika variantách ukazuje její využití a výsledky pro teoretický a reálný traťový úsek s ohledem na očekávatelné požadavky různých kategorií vlaků osobní dopravy na těchto úsecích

Klíčová slova: metoda STEM, lineární optimalizace, železniční dopravní cesta, kapacita dopravní cesty, propustnost, požadavky dopravců a objednatelů

Abstract: Each transport infrastructure has a limited capacity in which case it is clear that it may not be able to satisfy all requirements. This fact is especially important for the railway transport infrastructure. The aim is to satisfy such requirements, which will bring as many benefits in the case of their implementation. This paper deals with this issue using the linear optimization method STEM. In several variants, its use shows the results for a theoretical and a real railway line section with regard to the expected traffic requirements in passenger transport on these sections.

Keywords: step method, linear optimization, railway infrastructure route, capacity of transport infrastructure, requirements of carriers and orderers

1. Motivace, metoda STEM a její teoretické představení

Kapacita železniční dopravní cesty je jednoznačně parametrem, který ovlivňuje její využitelnost. Nejen v České republice, ale ve všech vyspělých zemích, kde se železniční doprava využívá jako páteřní v obsluze regionů, je významným problémem právě její kapacita, která často nedokáže uspokojit všechny požadavky. Je tak nastolena otázka, kterým vlakům přidělit v GVD trasu, aby to bylo s ohledem na omezující infrastrukturu co nejúčelnější. Neexistují přitom jednotné postupy a prakticky každý stát (provozovatel dráhy) k této problematice přistupuje jinak [1][2].

Touto problematikou se zabývá nicméně i ČVUT v Praze Fakulta dopravní, Ústav dopravních systémů, který se s touto komplikací setkává nejen při vědecké práci, ale též při řešení praktických studií pro různé subjekty. Pro řešení problému je aktuálně uvažována a testována metoda STEM (Step Method) [3].

Metoda STEM umožňuje řešení lineárních matematických problémů s více účelovými funkcemi. Cílem metody je najít kompromisní řešení, jehož realizace by přinesla nejvíce benefitů. Hlavní princip metody spočívá v tom, že nejdříve se spočtou ideální hodnoty účelové

ⁱ Ing. Pavel Purkart, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Ústav dopravních systémů, Konviktská 20, 110 00 Praha 1, purkapav@fd.cvut.cz

funkce pro jednotlivé případy zvlášť a poté se minimalizují vážené odchylky kompromisního řešení od ideálních hodnot účelové funkce. Prakticky se tak nejdříve vyčíslí vhodnost výběru jednotlivých projektů pro každé kritérium zvlášť, následně se stanoví váhy jednotlivých kritérií a poté se vypočte vhodnost výběru jednotlivých projektů na základě všech kritérií jako celek.

Metoda STEM má tu výhodu, že vyžaduje relativně minimální spolupráci mezi zadavatelem úlohy a jejím řešitelem oproti jiným metodám. Metoda stanoví váhy pro jednotlivá kritéria vlastním výpočtem a následně se zadavatel musí rozhodnout, zda je výsledek pro něj akceptovatelný či nikoli. Metoda se tak skládá jednak z procesu výpočetního a dále z procesu rozhodovacího. Pokud zadavatel rozhodne, že výsledek výpočtu je pro něj akceptovatelný, výpočet je konečný. Pokud tomu tak není, musí zadavatel informovat řešitele úlohy o změně vybraných kritérií nebo úpravě jejich počtu a výpočet je proveden znovu.

Metoda STEM se skládá z následujících kroků

1. Řešitel spočte optimální řešení pro jednotlivá kritéria (účelové funkce) zvlášť. Počet výpočtů tedy odpovídá počtu kritérií.
2. Řešitel vyčíslí váhy jednotlivých kritérií na základě následujícího vzorce:

$$w_i = \frac{z_{ii} - \min_{j=1, \dots, k} z_{ij}}{z_{ii}} \frac{\alpha}{\sqrt{\sum_{i=1}^n c_{ij}^2}} \quad (1)$$

kde:

z_{ij} – prvek matice hodnot optimalizačních kritérií pro optimalizaci pro jednotlivá optimalizační kritéria (z_{ij} je hodnota optimalizačního kritéria $j = 1, \dots, k$ v případě optimalizace podle kritéria $i = 1, \dots, k$, [-])

c_{ij} – prvek tzv. „cenové matice“ – prvek matice koeficientů jednotlivých optimalizačních kritérií [-]

Hodnota α se získá z následující rovnice:

$$\sum_{i=1}^k \frac{z_{ii} - \min_{j=1, \dots, k} z_{ij}}{z_{ii}} \frac{\alpha}{\sqrt{\sum_{i=1}^n c_{ij}^2}} = 1 \quad (2)$$

V praxi musíme nejdříve vypočítat hodnotu koeficientu a pak můžeme teprve vyčíslit váhy jednotlivých kritérií. Pokud je zadavatel spokojen s vybranými hodnotami optimalizačních kritérií, pak ohodnotí hodnotu $w_i = 0$. Pokud váha pro více kritérií splňuje podmínku $w_i > 0$, řešitel přidá novou proměnnou $d \geq 0$ a řeší model s novým optimalizačním kritériem:

$$\min f(x, d) = d \quad (3)$$

Pro korektní výpočet se zavede jednoduchá omezující podmínka:

$$w_{ii}(z_{ii} - \sum_{j \in J} c_{ij} X_j) \leq d \quad (4)$$

Pokud podmínka $w_i > 0$ platí pouze pro jedinou hodnotu $i = 1, \dots, k$, řešitel smí zjednodušit omezující podmínku takto:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^k w_{ii}(z_{ii} - \sum_{j \in J} c_{ij} X_j) \quad (5)$$

3. Řešitel prezentuje výsledky zadavateli. Pokud výsledek pro zadavatele není uspokojivý, ten musí upravit kritéria, případně jiná přidat nebo použitá zčásti odebrat. Pokud zadavatel není

spokojen s výsledkem, vrací se řešitel k výpočtům dle bodu 2. Pokud je zadavatel s výsledky spokojen, řešitele nalezl tzv. kompromisní řešení. Pokud dosáhne při řešení problému hodnota $d = 0$, bylo dosaženo řešení optimálního [4].

1.1. Modifikace metody STEM na daný problém

Metoda STEM byla modifikována z původního použití primárně pro hodnocení projektů, kdy poskytuje hodnocení a výsledky pro výběr projektů při omezených finančních možnostech. Nově je dáno obsazení kapacitně limitujícího úseku železniční dopravní cesty za daný časový interval, kterým mají projet takové vlaky, aby celospolečenský přínos byl maximalizován.

Zde je nutné podotknout, že metoda STEM je v tomto velmi komplexní. Došlo-li by ke změně hodnot vybraných kritérií, je nutné celou úlohu od začátku přepočítat, jelikož s pravděpodobností hraničící s jistotou dojde ke změně vah jednotlivých kritérií. Následně již bylo možné přistoupit k celkové lineární optimalizaci v prostředí programu Xpress Workbench.

Pro stanovení výběru tras vlaků, které přinesou nejvíce benefitů, byla stanovena následující kritéria, přičemž se předpokládá, že jednotlivé definované vlaky tvoří ucelené provozní linky:

- **Denní předpokládaný průměrný počet cestujících v omezujícím úseku v tisících**
Parametr vyjadřuje denní průměrný počet cestujících na lince v omezujícím úseku, tj. v úseku s nejnižší propustností. Hodnota vyjadřuje využití vlaků dané linky v tomto úseku.
- **Denní předpokládaný průměrný počet cestujících v rámci celé linky v tisících**
Parametr vyjadřuje denní průměrný počet cestujících na celé lince, resp. logicky omezeném provozním úseku linky (typicky linku R11 Plzeň – Brno by bylo možné rozložit na logické provozní celky Plzeň – České Budějovice a České Budějovice – Brno, které mohou v případě potřeby fungovat odděleně bez negativního dopadu na značnou část cestujících). Parametr poskytuje hodnocení celkového využití linky. Dle názoru doktoranda není dostačující uvažovat potenciál pouze na omezujícím úseku, ale je klíčové hodnotit i potenciál linky jako celku.
- **Využití traťové rychlosti v logicky ohraničeném úseku**
Nezřídka se vyskytují případy, kdy na trati v logicky ohraničeném úseku (obvykle v omezujícím úseku) jezdí soupravy nižší rychlostí bez schopnosti využít plné traťové parametry. Doktorand se jako základní rychlostní profil rozhodl hodnotit profil V_{130} , který by soupravy hodné současného provozu měly být schopny využívat jako základ. Pokud je souprava schopna vyvinout rychlost v omezujícím úseku železniční trati dle rychlostníků určených pro profil V_{130} , pak poměr bude činit 1 (100 %). Pokud toto dosaženo nebude, poměr se bude snižovat. Pokud např. bude na trati v omezujícím úseku umožněna rychlost dle rychlostníků pro profil V_{130} až 100 km/h a souprava bude schopna vyvinout maximální rychlost pouze 80 km/h, poměr se logicky sníží na 0,8 (80 %). Pokud na trati nebude k dispozici rychlostní profil V_{130} , bude hodnocení vztaženo k běžnému rychlostnímu profilu V (nedostatek převýšení $I = 100$ mm). Parametr je zaveden z důvodu hodnocení hospodárného využití kapacity omezujícího úseku.

- **Ohodnocení systémových přípojových vazeb na lince v logicky vymezeném úseku**

Parametr je nastaven z důvodu hodnocení návazností na další linky, cílem je určit míru síťového charakteru linky. Celkové ohodnocení parametrů je součtem následujících bodů za všechny přestupní uzly v logicky ohraničeném úseku linky. Přestupní uzly/body se ohodnotí následovně:

- *2 body* – železniční přestupní uzel se systémovými návaznostmi na linky alespoň do tří dalších směrů (tj. minimálně křižovatková železniční stanice, spíše však uzlová) v gesci železniční dopravy s možností systémových vazeb i na veřejnou linkovou dopravu či MHD;
- *1 bod* – železniční přestupní bod se systémovými návaznostmi na linky alespoň do jednoho nebo dvou dalších směrů v působnosti železniční dopravy s možností systémových vazeb i na veřejnou linkovou dopravu či MHD, případně přestupní bod s možností četných systémových vazeb pouze na veřejnou linkovou dopravu či MHD.

Je-li linka trasována přes důležitý přestupní uzel, za tento uzel obdrží 2 body. Za každý přestupní bod (tj. přestupní uzel s nižší důležitostí) obdrží 1 bod. Čím vyšší součet bodů, tím jsou návaznosti četnější a důležitější, a tudíž je provoz linky klíčový pro účelnou funkci dalších linek veřejné dopravy.

- **Porovnání cestovních dob IAD a dané linky ve třech nejzatíženějších relacích na lince**

Parametr je nastaven za účelem porovnání konkurenceschopnosti linky. V logicky ohraničeném úseku linky budou vybrány tři nejvytíženější relace a stanoven poměr cestovní doby IAD v daném úseku vůči cestovní době při využití spoje dané linky. Pro tři jednotlivé relace bude stanovena hodnota zvlášť a následně spočítán průměr tří hodnot, který vstoupí do hodnocení. Z výše uvedeného principu plyne, že překračuje-li hodnota číslo 1, veřejná doprava je v daném vějíři relací průměrně rychlejší než IAD [3].

2. Konkrétní výsledky modelu

Test metody byl proveden na příkladu železniční trati jak teoretickém, tak praktickém.

2.1. Konkrétní výsledky modelu – teoretický příklad

Po sestavení modelu byl nejprve proveden teoretický test. Pro ten byl uvažován následující příklad:

Je uvažována jednokolejná železniční trať se smíšeným provozem. V omezujícím úseku dlouhém cca 6 km nejsou prostorové oddíly. Objednatelé dopravy požadují úsekem vést jednu linku vlaků kategorie R, jednu linku vlaků kategorie Sp a dvě linky vlaků kategorie Os. U linek se předpokládají následující parametry provozu dle tabulky 1:

Tab. 1: Parametry modelových linek

linka	interval [min]	potřeba kapacity dopravní cesty v omezujícím úseku [min/spoj]
R	60	5
Sp	60	5
Os 1	30	7
Os 2	60	7

Úkolem je zjistit, které linky na úseku je nejvíce účelné provozovat, tj. linky, jejichž provoz přinese nejvíce benefitů.

Pro výpočet úlohy bylo využito programového vybavení MS Excel (pro mezivýpočty) a Xpress Workbench (pro lineární optimalizaci). Pro výpočet byl zvolen časový úsek 60 minut. V tomto případě – uvažujeme-li ucelený provoz linky Os 1 zásadně pouze v intervalu 30 minut – byla vybraná hodnotící kritéria zdvojnásobena, jelikož linka úsekem projede za hodnotící období každým směrem dvakrát, tudíž i některé skutečnosti nastanou dvakrát (zde lze jako případ zmínit například ohodnocení přestupní vazeb, kdy je zcela přirozené, že při výpočetním období 60 minut u linky s intervalem 30 minut je potenciál dosažení přestupních vazeb zpravidla dvojnásobný než kdyby byla linka v provozu v intervalu 60 minut).

Jako výpočetní období byl uvažován jeden směr, tedy každou hodinu byl uvažován provoz vlaků v jednom směru po dobu 30 minut. S ohledem na hodnoty uvedené ve směrnici UIC 406 byla tato hodnota ponížena na možnost čerpání kapacity 22,5 minuty pro jeden směr za každou započatou hodinu provozu. Tím prakticky ani neuvažujeme provoz nákladní dopravy během občanského dne, což v případě požadavku na průvoz většího množství vlaků nákladní dopravy by znamenalo další omezení kapacity pro dopravu osobní [3].

Rozsah tohoto příspěvku bohužel neposkytuje významný prostor pro zevrubný rozbor výsledků teoretického testu, nicméně ten proběhl poměrně úspěšně. Proto bylo přistoupeno dále na testování metody STEM na konkrétním praktickém příkladě.

2.2. Konkrétní výsledky modelu – praktický příklad

Pro praktický test modelu byla vybrána trať Plzeň – Žatec. Zejména v plzeňské aglomeraci je propustnost železniční infrastruktury na této trati velmi omezující, proto byla vybrána jako testovací.

Je uvažováno, že na trati zhruba ve stávajícím stavu infrastruktury dojde ke střetu následujících požadavků **objednatelů veřejné hromadné dopravy** v působnosti železniční dopravy:

- linka R Plzeň – Most v intervalu 120 minut,
- linka Sp Plzeň – Žihle v intervalu 120 minut,
- linka Os Plzeň – Žihle v intervalu 60 minut,
- linka Os Nýřany – Plzeň – Plasy v intervalu 60 minut.

Takto stanovené linkové vedení zajišťuje dosažení souhrnného intervalu rychlého segmentu vlaků v úseku Plzeň – Žihle v intervalu 60 minut a v případě osobních vlaků souhrnného intervalu osobních vlaků ve špičkovém období 30 minut.

S ohledem na skutečnost, že základní interval nejrůdněji zastoupených segmentů vlaků činí 120 minut, byla i tato hodnota zvolena jako výchozí pro stanovení délky hodnotícího období. Uvažujeme rovnoměrný provoz v obou směrech, tím pádem je pro každý směr v tomto období k dispozici kapacita dráhy se započtením všech úkonů (rušení a stavění vlakových cest apod.)

60 minut za předpokladu, že ji vyjádříme počtem minut, nikoli počtem tras, jak je v modelu uvažováno. Aby nedosáhl stupeň obsazenosti 100 %, je tato hodnota snížena na **50 minut**. V tomto případě je zároveň uvažováno, že ve špičkových obdobích je provoz nákladních vlaků na této trati minimální, tudíž pro ně nejsou vyžadovány pravidelné trasy, jinak by tato hodnota musela být snížena ještě více.

Z nákrešného jízdního řádu plyne, že nejzásadněji omezujícím úsekem je úsek **Horní Bříza – Kaznějov** [5]. Ten je pro výpočet uvažován s tím, že pro jednotlivé linky je počítáno s následujícím časem obsazení:

- linka R 8 minut,
- linka Sp 9 minut,
- linky Os 10 minut.

Poté, co byla stanovena jednotlivá hodnotící kritéria, byl pro daný případ vytvořen model v programu Xpress Workbench, který zobrazuje následující obrázek 1.

```

34  obsazeni_useku::[8, 9, 20, 20]
35
36  benefit_1::[0.9, 0.8, 0.5, 0.3]
37  benefit_2::[1.4, 0.9, 1.5, 2.5]
38  benefit_3::[1, 1, 2, 2]
39  benefit_4::[11, 7, 9, 10]
40  benefit_5::[0.8, 0.87, 0.8, 0.87]
41
42
43  Q:=50
44
45  sum(i in var) obsazeni_useku(i)*X(i)<=Q
46
47  0.538*(2.2-(sum(i in var) benefit_1(i)*X(i)))<=d
48  0.233*(5.4-(sum(i in var) benefit_2(i)*X(i)))<=d
49  0.167*(5-(sum(i in var) benefit_3(i)*X(i)))<=d
50  0.019*(30-(sum(i in var) benefit_4(i)*X(i)))<=d
51  0.044*(2.54-(sum(i in var) benefit_5(i)*X(i)))<=d
52  forall (i in var) X(i)is_binary
53  d>=0
54
55  minimize(d)
56  celkove_obsazeni:=sum (i in var)obsazeni_useku(i)*X(i)
57
58  writeln("Hodnota d je:",getobjval)
59  forall (i in var) writeln ("X(",i,")=", getsol(X(i)))
60  writeln("Konec modelu")
61
62  end-model
63

```

obsazeni_useku: obsazení úseku v minutách jednotlivými uvažovanými linkami

benefit_x: optimální koeficienty kritérií pro jednotlivé linky

Q: doba obsazení kritického úseku (výše uvedených 50 minut)

Následují jednotlivé rovnice modelu a jeho vyhodnocení (výběr suboptimálních variant a výpočet hodnoty d)

50:8 Mosel Spaces: 2

DS_studie_mod

Stop Command: DS_studie_model_T160.mos Runner: Mosel CWD ENV

```

2001-2019. All rights reserved
Compiling DS_studie_model_T160.mos to out\DS_studie_model_T160.bim with -G
Running model
Debug session efccbb535c0e11273d3cdc48c1305b26 started
Hodnota d je:0.167
X(1)=1
X(2)=1
X(3)=0
X(4)=1
Konec modelu
The model is suspended after execution

```

Obr. 1 Konkrétní ukázka modelu v prostředí programu Xpress Workbench

Výsledkem lineární optimalizace je, že na trati by měly být provozovány linky R, Os 1 a Os 2. Tato kombinace se dle metody STEM jeví jako nejúčelnější. Hodnota koeficientu d dosáhla

0,167, což znamená, že bylo nalezeno kompromisní řešení, nikoli globální optimum. Z pohledu provozu na této trati je výsledek dosažený modelem v zásadě logický.

Z pohledu přepravených počtů cestujících v celých provozních úsecích těchto linek bylo dosaženo dokonce optima globálního, jelikož se jedná kumulativně o linky s největšími předpokládanými počty cestujících. Je však patrná právě komplexnost modelu, když byla vyřazena z výběru linka Sp, která v omezujícím úseku má druhý nejvyšší předpokládaný počet cestujících ze všech čtyř. Tudíž naopak z tohoto případu je jasně patrné, že z celkového pohledu bylo dosaženo kompromisu.

3. Závěr

Výše uvedená forma výzkumu ukazuje, že metodu STEM bude možné modifikovat nejen pro problém kapacity železniční dopravní cesty, ale i pro řešení jiných problémů. Ve výše uvedených úlohách dosahuje metoda uspokojivých výsledků, nicméně je další výzvou vědeckého týmu otestovat i jiné metody a porovnat jimi dosažené výsledky.

Je však zřejmé, že hodnoticí kritéria musí být volena pečlivě a odpovědně, jinak metoda neposkytne uspokojivé výsledky. Pokud je však toto splněno, může být vhodným nástrojem k rozhodování nebo posuzování situací, jejichž optimální, příp. suboptimální řešení, není na první pohled či s využitím jednodušších metod zřejmé.

Literatura

- [1] HANSEN, Ingo Arne and Jörn PACHL. Railway timetable and traffic. Hamburg: DVV Media Group GmbH - Eurailpress, 2008. ISBN 978-3-7771-0371-6.
- [2] PACHL, Jörn. Systemtechnik des Schienenverkehrs: Bahnbetrieb planen, steuern und sichern mit Beispielen. 4., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: B.G. Teubner, 2004. ISBN 3-519-36383-6.
- [3] PURKART, Pavel. Optimální kooperace jednotlivých segmentů veřejné hromadné dopravy. Praha: ČVUT v Praze Fakulta dopravní, Ústav dopravních systémů. [Datum obhajoby 2019-12-06. Doktorandské minimum.] Vedoucí L. TÝFA.
- [4] TEICHMANN, Dušan and Michal DORDA. Comparison of Two Selected Methods In Evaluating Of Investments in Transport Infrastructure. In: Finance and Performance of Firms in Science, Education and Practice : proceedings of the 7th International Scientific Conference: April 23-24, 2015, Zlín, Czech Republic. Zlín: Tomas Bata University in Zlín, 2015. pp. 1524–1536. ISBN 978-80-7454-482-8.
- [5] Veřejně dostupné materiály (např. jízdní řády atd.) Správy železnic, státní organizace.

Tento příspěvek byl vytvořen v rámci projektu Studentské grantové soutěže ČVUT v Praze č. SGS20/138/OHK2/2T/16 Stanovení a optimální využití parametrů železniční dopravní cesty.