

NÁVRH VÝPOČTU PROPUSTNÉ VÝKONNOSTI TRAŽOVÉHO ÚSEKU V KRIZOVÝCH SITUACÍCH

Ladislav NOVÁK

Vojenská fakulta VŠDS Žilina

Úvod

Propustná výkonnost tražových úseků při změně stávajících podmínek (nehodové události, poruchy, přírodní živelné katastrofy) bývá rozhodujícím způsobem narušena. Do dnešní doby chybí dostatečně přesná a rychlá metoda, která by poskytla dostatek informací při rozhodování o použití tražových úseků v těchto situacích. Možné řešení je navrženo v tomto příspěvku.

1. SOUČASNÝ STAV A TEORETICKÁ VÝCHODISKA VÝPOČTŮ PROPUSTNÉ VÝKONNOSTI TRAŽOVÝCH ÚSEKŮ (PVTU)

1.1 PVTU v deterministických podmínkách provozu

Z rozborů konstruovaných i realizovaných GVD je zřejmé, že výpočetní čas T_v (24 h) se rozpadá na součet nezbytných provozních časů T_{obs} , a nevyužitých časů mezer T_{mez} .

Časy mezer mohou představovat záložní časy ve vykonstruovaném GVD nebo nevyužité časy v realizovaných GVD.

Platí tedy

$$T_V = T_{obs} + T_{mcz} .$$

Pro počet vlaků N se stanoví průměrný čas obsazení $t_{p,obs}$ a průměrný čas mezery $t_{p,mez}$ jako

$$t_{p,obs} = \frac{T_{obs}}{N} , \quad t_{p,mez} = \frac{T_{mcz}}{N} .$$

Pro výpočetní čas $T_V = 1440$ min je potom možno zpětně odvodit počet vlaků, neboli hodnotu propustné výkonnosti N_d

$$N_d = \frac{1440}{(t_{p,obs} + t_{p,mez})} .$$

Při klasických výpočtech propustné výkonnosti se za čas obsazení považuje nezbytně potřebný časový odstup, ve kterém může následovat jedna jízda vlaku za druhou. Na jednosměrně pojižděné trati se jedná o následné mezidobí l . Na obousměrně pojižděné traťové koleji se jedná o periodu T_{per} .

1.2 PVTU s ohledem na stochastičnost podmínek provozu

Je naprosto zřejmé, a praktický provoz to jednoznačně potvrzuje, že provoz ovlivňuje řada vnějších vlivů, jejichž působení však není trvalé, ale náhodné a dočasné, bez možnosti jejich přesného matematického vyjádření.

Při vlastním provozu dochází k odchylkám od pravidelných, plánovaných hodnot. Většina odchylek představuje zpoždění a jen minimum odchylek může být záporných, vznikajících např. krácením jízdních dob. Za této situace můžeme tedy připustit, že jednotlivé časy obsazení budou náhodné proměnné. [6] uvádí, že s ohledem na to, že četnost odchylek s jejich velikostí klesá, je možné považovat časy obsazení za náhodnou proměnnou s Γ rozdělením, jehož hustota pravděpodobnosti je vyjádřena vztahem

$$f_a(t) = \frac{b^a t^{a-1}}{\Gamma(a)} e^{-bt}$$

resp. pro parametr a jako přirozené číslo za náhodnou proměnnou s Erlangovým rozdělením, u něhož je hustota pravděpodobnosti vyjádřena vztahem

$$f_a(t) = \frac{b^a t^{a-1}}{(a-1)!} e^{-bt} ,$$

kde a, b jsou parametry této náhodné proměnné.

Zároveň uvádí [14] a [15], že vzhledem k tomu, že malé časové zálohy (mezery) se vyskytují také mnohem častěji, než velké, je možno použít pro tuto náhodnou proměnnou exponenciálního rozdělení s distribuční funkcí

$$f(t) = 1 - e^{-bt}$$

kde b je parametr exponenciálního rozdělení.

Prakticky je však nemožné vyhodnotit, kde se nalézá hranice mezi náhodným časem obsazení a náhodným časem mezery. Přikláním se proto k myšlence **zavést náhodnou proměnnou $t_{p,i}$, jako průměrnou hodnotu časového odstupu mezi vlaky**, pro kterou platí

$$t_{p,i} = t_{p,obs} + t_{p,mez}$$

a kterou je možno snadno statisticky vyhodnotit.

Kriticky je možné přistoupit i k použití exponenciálního rozdělení. Počet malých odchylek by mohl podle něho teoreticky stoupat až k nekonečnu s poklesem jejich velikosti. To je na první pohled nemožné. Výsledky provedených statistických zkoumání toto tvrzení potvrzují.

1.3 Železniční provoz jako systém hromadné obsluhy a možnosti simulace provozu

Autoři [4], [6], [16], [1] i další uvádějí, že provoz v traťovém úseku je možno chápat jako systém hromadné obsluhy.

Časové odstupy t_i mezi jednotlivými vstupy vlaků do tohoto úseku v podstatě představují časové intervaly mezi vstupy požadavků do obecného systému hromadné obsluhy. Dobou obsluhy potom logicky bude doba, kterou obsazuje tuto kolej (úsek) konkrétní vlak - t_{obs} .

V dostupných výpočtech se železniční provoz klasifikuje jako systém hromadné obsluhy M/M/n, který představuje Poissonovský proces vstupu a exponenciální rozdělení doby obsluhy. Tento systém umožňuje při určitém zjednodušení nejširší matematický přístup k řešení a poskytuje nejvíce výstupních pravděpodobnostních charakteristik o chování a efektivnosti systému.

Možnosti simulace.

Linka obsluhy - traťová kolej vytváří jednolinkový systém a může být ve stavu obsazeném nebo neobsazeném. Podle toho je nutno vlak zastavit, nebo se mu umožní jízda okamžitě bez čekání. Pokud není k dispozici žádný vlak, vzniká prostoj koleje.

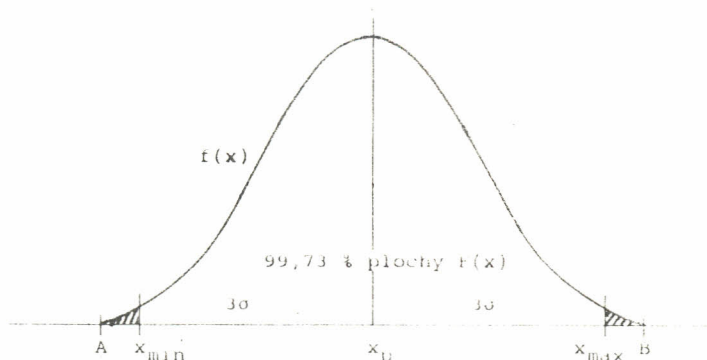
Získávání nezbytně potřebné náhodné proměnné se provádí transformací pseudonáhodných čísel, poskytovaných generátorem většiny typů počítačů, známými metodami na požadovaný typ náhodné proměnné získané jako výsledek statistických šetření.

1.4 Doba odstupů mezi vlaky a doba jízdy jako spojité náhodné proměnné

[12] uvádí některé vlastnosti spojité náhodné proměnné, která je definována určitým rozdělením, charakterizovaným tzv. frekvenční funkcí $f(x)$ (zvanou též hustota pravděpodobnosti), nebo distribuční funkcí $F(x)$.

Náhodná proměnná x se potom vyskytuje v určitých mezích A až B podle Obr. 1., kde

- A je dolní mez
- B - horní mez
- σ - směrodatná odchylka.



Obr. 1 Pravidlo 3σ spojité náhodné proměnné

Funkcí $f(x)$ bývá v grafickém vyjádření určitá křivka (nejčastěji zvonovitá), zatímco $F(x)$ představuje plochu omezenou touto křivkou nad vodorovnou osou až k pořadnici, příslušné zvolenému bodu x .

Funkce $f(x)$ obvykle upravujeme tak, aby celá plocha pod křivkou uvnitř mezi A a B byla rovna jedné.

Autor dále uvádí, že dolní i horní mez mohou být i $\pm \infty$, ale v tomto případě je není možno přesně matematicky vyjádřit. Zároveň však uvádí, že pravděpodobnost výskytu hodnoty x v blízkosti mezí A a B je zanedbatelná a proto je možné určit i reálné minimální a maximální hranice hodnoty x charakterizující s dostatečnou přesností původní rozdělení. Tyto hranice se nazývají x_{min} a x_{max} .

K popisu tohoto předpokladu použil autor směrodatné odchylky σ a odvodil, že v určité vzdálenosti od střední hodnoty, dané \pm násobky směrodatné odchylky se nachází určitá část plochy, vyjadřující zároveň i pravděpodobnost výskytu hodnoty x v těchto hranicích.

Tato závislost pro normální rozdělení je zachycena v Tab. č. 1.

| Proměnná v hranicích | Část plochy v % |
|----------------------|-----------------|
| $x_p \pm \sigma$ | 68,26 |
| $x_p \pm 1,96\sigma$ | 95 |
| $x_p \pm 2\sigma$ | 95,44 |
| $x_p \pm 2,58\sigma$ | 99 |
| $x_p \pm 3\sigma$ | 99,73 |
| $x_p \pm 3,29\sigma$ | 99,9 |

Tabulka 1 Velikost plochy ve vzdálenosti $\pm 3\sigma$ od střední hodnoty x_p normálního rozdělení.

Praktické využití této vlastnosti je zřejmé. Pro reálně odhadnutelné minimální, střední a maximální hodnoty náhodné proměnné normálně rozložené je možné většinou pro $\pm 3\sigma$ vypočítat hodnotu σ a tím získat i tvar příslušné distribuční funkce $F(x)$.

Spolu s [10] jsem ověřil počítačovým experimentem tuto vlastnost i pro náhodnou proměnnou s Erlangovým rozdělením. Vzhledem k nesouměrnosti tohoto rozdělení bylo použito vztahu

$$x_{\max} - x_{\min} = 6\sigma ,$$

odkud směrodatná odchylka

$$\sigma = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{6}$$

a rozptyl s^2 jako

$$s^2 = \sigma^2 .$$

Pro střední hodnotu x_p byly zjišťovány parametry a a b náhodné proměnné s Erlangovým rozdělením a generovány nové statistické soubory takto rozložené náhodné proměnné. Z generovaných hodnot byly statisticky vyhodnoceny příslušné hodnoty x_p , s^2 a σ . Porovnáním těchto hodnot s původními byla potvrzena platnost pravidla o $\pm 3\sigma$ i pro náhodnou proměnnou s Erlangovým rozdělením s koeficientem korelace 0,97.

Minimální dobu jízdy v posuzovaném traťovém úseku, je tedy možno považovat za dolní hranici příslušné náhodné proměnné x_{\min} , neboli již konkrétně

$t_{j,\min}$.

Je zřejmé, že pro každý konkrétní traťový úsek lze vyhodnotit nebo případně odhadnout i hodnoty střední doby jízdy $t_{j,\text{obs}}$ a reálné maximální doby jízdy $t_{j,\max}$.

Tuto metodu je však nutno použít pro každý úsek zvlášť a předpokládá vždy nové statistické vyhodnocení uvedených náhodných proměnných.

Nabízí se zde však i jiné řešení.

Jedinou hodnotou, kterou lze dostatečně přesně vypočítat předem, je pouze minimální doba jízdy a to pro konkrétní hnací vozidlo, příslušný traťový úsek a vlakovou soupravu.

Možné řešení:

Jestliže bude možné nalézt obecnou zákonitost v průběhu doby jízdy jako náhodné proměnné, bude možné na základě $t_{j,min}$ vypočítat i hodnoty ostatní, včetně parametrů a a b Erlangova rozdělení pro případnou simulaci provozu.

1.7 Problematika rychlosti ve výpočtech PVTU

Většina autorů pracuje v teorii řešení výpočtů propustných výkoností přímo s dobou jízdy nebo obsazení posuzovaného traťového úseku t_{obs} . **Vzhledem k tomu, že délka traťového úseku je však neměnná, transformují se všechny výpočty doby jízdy na problém rychlosti**, resp. jejího průběhu v závislosti na konkrétních podmínkách.

Zůstává tedy otevřena otázka, jaké rychlosti použít, respektive jak dostatečně přesně vypočítat potřebnou dobu jízdy.

Teorie mechaniky vlakové dopravy nabízí uspokojivé řešení právě pro minimální dobu jízdy. S využitím pohybové rovnice vlaku ve tvaru

$$F_o - o_{vh} - o_{vd} - o_t = 10^3 (m_h + m_d)(1 + ro) \frac{dV}{dt},$$

| | | | |
|-----|----------|---|---|
| kde | F_o | - | je tažná síla na obvodu hnacích kol v [N] |
| | o_{vh} | - | vozidlový odpor hnacího vozidla v [N] |
| | o_{vd} | - | vozidlový odpor vlakové soupravy v [N] |
| | o_t | - | traťový odpor v [N] |
| | m_h | - | hmotnost hnacího vozidla v [t] |
| | m_d | - | hmotnost dopravovaných vozidel v [t] |
| | ro | - | součinitel rotujících hmot [-], |

je možno pro průběh maximální tažné síly vyhodnotit i maximální dosažitelnou rychlost, kdy jsou v rovnováze tažná síla a odpory. Tato rychlost nesmí překročit rychlost stanovenou. Jejím porovnáním s rychlostí, kterou vlak do úseku vjíždí je možno řešit dobu obsazení jako dílčí výpočty pro pohyb rovnoměrně zrychlený, zpomalený nebo jízdu ustálenou rychlostí.

2. TEORETICKÉ PŘEDPOKLADY A JEJICH NAVRŽENÁ ŘEŠENÍ

Na úvod je vhodné uvést konstatování [2] o tom, že "... modely s Γ rozdělením náhodné proměnné jsou vhodné pro situace u kterých je minimální hodnota intervalu přísně určena, např. intervalem následné jízdy při maximální dovolené rychlosti, a přírážka není ostře ohraničena, přičemž vystačíme s Erlangovým rozdělením, které pracuje s parametrem a , jako přirozeným číslem".

Tomuto konstatování zjevně odpovídá železniční provoz.

Zajímavý je však pojem maximální dovolené rychlosti v porovnání s klasickými výpočty, které pracují s "průměrnou" rychlostí, nebo se klasifikaci rychlosti vyhýbají. Maximální rychlosti bude přirozeně odpovídat minimální doba jízdy $t_{j,min}$, příslušná minimální doba obsazení úseku $t_{obs,min}$ a při zohlednění přípustného provozního zatížení η , i odstup mezi jízdami dvou vlaků $t_{j,min}$. Všeobecně známý je však pouze vztah mezi středními, průměrnými, hodnotami těchto veličin:

První otázkou je tedy možnost aplikace pravidla o 6σ i mezi minimem a maximem Erlangova rozdělení?

Možnost aplikace tohoto pravidla uváděl při svých přednáškách v roce 1981 Vorlíček a použití pravidla tří sigma uvádí i [11] při použití i pro náhodné veličiny, které nejsou normálně rozložené.

Důkaz o tomto konstatování ve formě počítačového experimentu je popsán v části 1.3.

Otevřený problém: Již samotná aplikace pravidla " 6σ " na jiné typy rozdělení, než je normální, je matematicky zajímavá. Přesnost aplikace na Erlangovo rozdělení je možno vyjádřit koeficientem korelace 0,97.

Je tedy potřebné odpovědět na druhou otázku, zda je možné nalézt typické polohy středních hodnot dob jízdy a dob odstupů mezi vlaky v traťovém úseku v závislosti na hodnotách minimálních a maximálních?

K řešení této otázky jsem přijal následující hypotézu. Železniční provoz považuji za dostatečně typickou, stále se opakující činnost. Předpokládám tedy, že i průběhy náhodných proměnných popisujících dobu jízdy a odstupů mezi vlaky budou mít některé obecné zákonitosti. Za tuto považuji polohu jejich středních hodnot a to v závislosti na minimální době jízdy.

3. OVĚŘENÍ TEORETICKÝCH PŘEDPOKLADŮ

3.1 Statistické zkoumání doby jízdy v traťových úsecích

K ověření všech vyslovených předpokladů jsem realizoval rozsáhlá statistická zkoumání na 20 různých traťových úsecích. Doby jízdy úsekem jsem odčítal z realizovaných GVD. Jednalo se 10 500 údajů za 20 dní provozu.

Výsledky vyhodnocení statistických souborů z jednotlivých traťových úseků je uvedeno včetně výsledků χ^2 testu dobré shody v Tab. č.2.

| Traťový úsek | $t_{j,p}$ [min] | s^2 | σ | Rozdělení | | | |
|---------------------------|-----------------|-------|----------|----------------|------------|----------------|------------|
| | | | | Exponenciální | | Erlangovo | |
| | | | | χ^2_{emp} | χ^2_t | χ^2_{emp} | χ^2_t |
| Trenč.Teplá-Dubnica | 6,72 | 2,51 | 1,58 | 167,799 | 12,59 | 2,9346 | 11,07 |
| Dubnica-Trenč.Teplá | 7,61 | 4,37 | 2,09 | 126,882 | 15,51 | 3,0423 | 14,07 |
| Žilina zr.st.-Dol. Hričov | 11,15 | 8,01 | 2,83 | 174,985 | 12,59 | 6,2845 | 11,07 |
| Dol. Hričov-Žilina zr.st | 11,33 | 7,94 | 2,82 | 173,404 | 12,59 | 4,3986 | 11,07 |
| Turany-Kralovany | 12,77 | 10,67 | 3,27 | 161,440 | 14,07 | 4,0624 | 12,59 |
| Kralovany-Turany | 14,46 | 13,77 | 3,71 | 159,276 | 15,51 | 4,0209 | 14,07 |
| Ladce-Dubnica | 15,58 | 14,23 | 3,77 | 188,277 | 15,51 | 6,6429 | 14,07 |
| Dubnica-Ladce | 16,15 | 12,17 | 3,49 | 209,072 | 15,51 | 6,6804 | 14,07 |
| Krásno nad K.-Čadca | 16,15 | 13,94 | 3,73 | 185,922 | 15,51 | 2,5870 | 14,07 |
| Čadca-Krásno nad | 16,18 | 11,54 | 3,40 | 234,728 | 15,51 | 4,3220 | 14,07 |
| Vrútky-Varín | 16,59 | 15,31 | 3,91 | 204,165 | 15,51 | 12,349 | 14,07 |
| Varín-Vrútky | 17,49 | 15,62 | 3,95 | 201,880 | 15,51 | 7,0458 | 14,07 |
| Púchov-Pov.Bystrica | 18,55 | 13,80 | 3,71 | 240,641 | 15,51 | 6,9021 | 14,07 |
| Pov.Bystrica-Púchov | 18,62 | 15,18 | 3,90 | 225,724 | 15,51 | 7,5096 | 14,07 |
| Lúky p.Mak.-H.Lideč | 19,93 | 24,17 | 4,92 | 205,412 | 15,51 | 11,858 | 14,07 |
| H.Lideč-Lúky p.Mak | 22,92 | 58,71 | 7,66 | 98,234 | 15,51 | 3,0808 | 14,07 |
| Pov.Bystrica-Bytča | 20,08 | 27,45 | 5,24 | 194,985 | 14,07 | 18,928 | 12,59 |
| Bytča-Pov.Bystrica | 21,10 | 44,04 | 6,64 | 140,420 | 14,07 | 14,603 | 12,59 |

Tabulka 2 Výsledky vyhodnocení statistických souborů doby jízdy v traťových úsecích

Z výsledků aproximace je opět zřejmá nepříjemnost hypotézy o exponenciálním rozdělení, vzhledem k extrémně nepříznivým hodnotám χ^2 testu dobré shody. Výhodná je aproximace Erlangovým rozdělením, kde 16 hodnot velmi dobře vyhovuje. Je tedy možné konstatovat, že teoretický model náhodné proměnné s Erlangovým rozdělením dobře vystihuje testovanou veličinu - dobu jízdy v traťovém úseku. (Hodnoty v rámečku vyhovují.)

3.2 Poznámka k vyhodnocování statistických souborů

[23] uvádí a dokazuje na straně 135, že pro zkoumání vstupního proudu požadavků je rozdělení pravděpodobnosti závislé na délce předem zvoleného pozorovacího intervalu. Bude-li interval krátký, zjistíme velkou četnost případů, kdy za tento interval nevstoupí žádný požadavek. Prodlužuje - li se pozorovací interval, těžiště četností se posunuje směrem k větším hodnotám.

To znamená, že pro krátký interval pozorování se jedná o prudce klesající funkci a při velmi dlouhém pozorovacím intervalu se blíží rozdělení četnosti normálnímu rozdělení.

I proto se domnívám, že pravdivější popis proudu požadavků poskytuje zkoumání času odstupů - intervalů mezi požadavky.

3.3 Hypotéza o poloze střední doby jízdy traťovým úsekem

Střední doba jízdy rozděluje vzdálenost mezi minimální a maximální hodnotou doby jízdy na dvě části $\sigma_1\sigma$ a $\sigma_2\sigma$ podle Obr. 2.

Koeficienty σ_1 a σ_2 jsem nazval koeficienty polohy střední doby jízdy traťovým úsekem.

Je tedy možno psát následující vztahy

$$t_{j,\max} - t_{j,\min} = 6\sigma$$

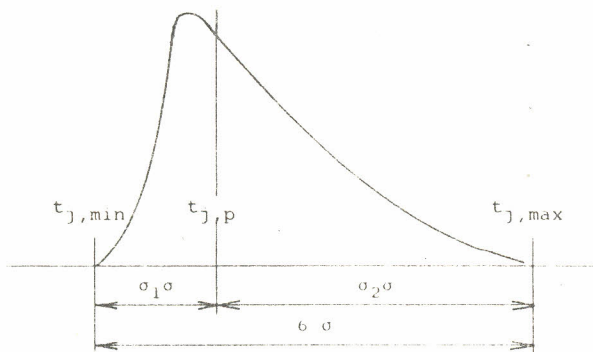
$$\sigma_1\sigma + \sigma_2\sigma = 6\sigma$$

$$t_{p,j} - t_{j,\min} = \sigma_1\sigma$$

odkud vyjádříme koeficient σ_1 jako

$$\sigma_1 = \frac{t_{p,j} - t_{j,\min}}{\sigma} \quad (1)$$

Vzhledem k tomu, že ze statistických souborů je možné snadno vypočítat $t_{j,p}$ a odčítat $t_{j,\min}$, vypočítával jsem hodnoty σ_1 podle vztahu (1). Použité a vypočítané hodnoty jsou přehledně uvedeny v Tab. č. 3.



Obr.2 Poloha střední hodnoty doby jízdy traťovým úsekem

| Traťový úsek | doby jízdy | | σ | σ_1 |
|------------------------------|-------------------|-----------------|----------|------------|
| | $t_{j,min}$ [min] | $t_{j,p}$ [min] | | |
| Trenč. Teplá - Dubnica | 4 | 6,72 | 1,58 | 1,72 |
| Dubnica - Trenč. Teplá | 4 | 7,61 | 2,09 | 1,73 |
| Žilina zr.st. - Dolný Hričov | 6 | 11,15 | 2,83 | 1,82 |
| Dolný Hričov - Žilina zr.st. | 6 | 11,33 | 2,82 | 1,89 |
| Turany - Kralovany | 7 | 12,77 | 3,27 | 1,76 |
| Kralovany - Turany | 8 | 14,46 | 3,71 | 1,74 |
| Ladce - Dubnica | 9 | 15,58 | 3,77 | 1,75 |
| Dubnica - Ladce | 9 | 16,15 | 3,49 | 2,05 |
| Krásno n. K. - Čadca | 9 | 16,15 | 3,73 | 1,92 |
| Čadca - Krásno n. K. | 9 | 16,18 | 3,40 | 2,11 |
| Vrútky - Varín | 9 | 16,59 | 3,91 | 1,69 |
| Varín - Vrútky | 10 | 17,49 | 3,95 | 1,90 |
| Púchov - Pov. Bystrica | 11 | 18,55 | 3,71 | 2,04 |
| Pov. Bystrica - Púchov | 11 | 18,62 | 3,91 | 1,95 |
| Lúky pod Mak. - Horní Lideč | 10 | 19,93 | 4,92 | 2,02 |
| Pov. Bystrica - Bytča | 11 | 20,08 | 5,24 | 1,73 |
| Bytča - Pov. Bystrica | 11 | 21,10 | 6,64 | 1,52 |
| Horní Lideč - Lúky pod Mak. | 11 | 23,92 | 7,66 | 1,69 |

Tabulka 3 Přehled vypočtených hodnot koeficientu polohy σ_1 doby jízdy

Ladislav Novák:

3.4 Korelační závislosti

Porovnáním hodnot střední doby jízdy $t_{j,p}$ a vypočtených hodnot směrodatné odchylky σ z Tab. č.3 je možno předpokládat vzájemnou závislost těchto veličin.

Korelační závislost vychází nejpříznivěji pro lineární regresní funkci

$$\sigma = 0,25 t_{j,p} \quad (2)$$

pro kterou je po redukci na počátek v bodě [0,0] koeficient korelace $r = 0,929$.

Základní představu o závislosti koeficientu polohy střední doby jízdy σ_1 na této době dává opět Tab. č.3.

Proložení lineární regresní funkcí je opět přímka ve tvaru

$$y = 1,805 + 0,0019x$$

s koeficientem korelace $r = 0,054$.

Vzhledem k tomu, že koeficient lineární funkce 0,0019 je zanedbatelný a koeficient korelace 0,054 dokládá i zanedbatelný stupeň korelace, je možné považovat koeficient polohy σ_1 za konstantní s průměrnou hodnotou

$$\sigma_1 = 1,84 \quad (3)$$

3.5 Odvození vztahů pro výpočty střední doby jízdy

Vycházím ze vztahu pro koeficient polohy střední doby jízdy (1)

$$\sigma_1 = \frac{t_{j,p} - t_{j,\min}}{6}$$

odkud bude střední doba jízdy

$$t_{j,p} = \sigma_1 \sigma + t_{j,\min}$$

a po dosazení koeficientu polohy (3) a vztahu (2)

$$t_{j,p} = 1,84 \cdot 0,25 \cdot t_{j,p} + t_{j,\min}$$

Po úpravě bude mít vztah závislosti minimální a střední doby jízdy tvar

$$t_{j,p} = 1,85 t_{j,\min} \quad (4)$$

Zde je nutno podotknout, že vztah má obecnou platnost v rozsahu vyšetřovaných veličin, tzn. pro $t_{j,p}$ [11-24 min] a pro $t_{j,\min}$ [4-11 min], které by mohly být dále zpřesňovány provedením dalších statistických šetření, ovšem stejně jako u předcházejících, značně časově náročných. Jednotlivé potřebné veličiny jsem pro známé $t_{j,\min}$ odvodil následujícím způsobem.

Směrodatnou odchylku σ dosazením vztahu (4) do vztahu (2)

$$\sigma = 0,25 \cdot 1,85 \cdot t_{j,\min} = 0,46 t_{j,\min} \quad (5)$$

Pro případnou simulaci je možné odvodit i příslušné parametry a a b

$$\text{Parametr } b \quad b = \frac{t_{j,p}}{\sigma^2} = \frac{1,85 t_{j,\min}}{\sigma^2}$$

$$\text{Parametr } a \quad a = b \cdot t_{j,p} = 1,85 b t_{j,\min} \quad (6)$$

Názornou představu o průběhu závislosti jednotlivých odvozených veličin dává jejich výpočet pro různé $t_{j,\min}$ podle Tab. č. 5.

| $t_{j,\min}$ [min] | $t_{j,p}$ [min] | odchylka σ | rozptyl s_2 | parametry | |
|--------------------|-----------------|-------------------|---------------|-----------|-------------------|
| | | | | a | b ^{1/} |
| 1 | 1,85 | 0,46 | 0,21 | 16,30 | 8,65 |
| 2 | 3,70 | 0,92 | 0,85 | 16,11 | 4,32 |
| 3 | 5,55 | 1,39 | 1,92 | 16,04 | 2,88 |
| 4 | 7,40 | 1,85 | 3,41 | 16,05 | 2,16 |
| 5 | 9,25 | 2,31 | 5,33 | 16,05 | 1,73 |
| 6 | 11,10 | 2,77 | 7,68 | 16,04 | 1,44 |
| 7 | 12,95 | 3,23 | 10,46 | 16,03 | 1,24 |
| 8 | 14,80 | 3,70 | 13,66 | 16,04 | 1,08 |
| 9 | 16,65 | 4,16 | 17,29 | 16,03 | 0,96 |
| 10 | 18,50 | 4,62 | 21,34 | 16,04 | 0,86 |
| 11 | 20,35 | 5,08 | 25,82 | 16,04 | 0,79 |
| 12 | 22,20 | 5,54 | 30,73 | 16,04 | 0,72 |
| 13 | 24,05 | 6,00 | 36,00 | 16,07 | 0,67 |
| 14 | 25,90 | 6,47 | 41,83 | 16,04 | 0,62 |
| 15 | 27,75 | 6,93 | 48,01 | 16,04 | 0,58 |

^{1/} Parametr b přepočten na celočíselný parametr $a = 16$.

Tabulka 5 Hodnoty $t_{j,p}$, σ , s_2 , b , a , pro různé $t_{j,\min}$; $\sigma_1 = 1,84$

Na základě výsledků je možno konstatovat, že parametr a , zaokrouhlený na celočíselnou hodnotu $a = 16$ je nezávislý na dobách jízdy a vztah pro výpočet parametru b je proto možno upravit do tvaru

$$b = \frac{16}{1,85 t_{j,\min}} = \frac{8,65}{t_{j,\min}} \quad (7)$$

4. POUŽITÍ ODVOZENÝCH VZTAHŮ PRO VÝPOČET PROPUSTNÉ VÝKONNOSTI

Pro příslušný traťový úsek se na základě pohybové rovnice vlaku vypočítá **minimální doba jízdy úsekem** $t_{j,min}$, s ohledem na stanovenou rychlost.

Podle vztahu (4) se vypočítá střední doba jízdy $t_{j,p}$.

Podle vztahů (6) a (7) se vypočtou **parametry a a b** na základě nichž probíhá transformace počítačem generovaných pseudonáhodných čísel na náhodnou proměnnou s Erlangovým rozdělením.

Ke generovaným středním dobám jízdy se **připočítají i příslušné provozní intervaly $\sum \tau$, čímž se získá potřebná střední hodnota doby obsazení pro vlastní simulaci provozu.**

$$t_{obs,p} = t_{j,min} + \sum \tau$$

Pro simulaci provozu jsou nezbytné i vstupy jednotlivých vlaků. K jejich získávání je možno využít opět střední doby obsazení upravené zpětně podle vztahu pro přípustné provozní zatížení.

$$t_{i,p} = \frac{t_{j,p}}{\eta}$$

(Vzhledem k tomu, že přípustné provozní zatížení je volitelné, získáváme možnost variantního výpočtu).

Přepočtem na 24 hod je možné z výsledků simulace získat příslušnou propustnou výkonnost zvoleného traťového úseku, dokreslenou příslušnými výstupy simulace (fronta, čekání, prostoje a pod.)

5. ZKUŠEBNÍ VÝPOČTY PVTU

K ověření navržené metody výpočtu a posuzování propustné výkonnosti traťového úseku jsem provedl zkušební výpočty propustné výkonnosti 2 traťových úseků.

| Traťový úsek | Trať.zabezp.zařízení | počet kolejí |
|------------------------|----------------------|--------------|
| Žilina - Vrútky | 3znakový autoblok | 2 |
| Púchov - Žilina zr.st. | poloautoblok | 2 |

Výpočty byly provedeny s využitím zpracovaného výpočetního programu.

Propustná výkonnost byla vyhodnocována variantně pro různé

- hmotnosti vozové soupravy,
- stupně provozního zatížení a

- řady hnacích vozidel

odpovídající typickým podmínkám provozu vybraných úseků.

Hmotnost vozové soupravy jsem zvolil 1200 tun.

Přípustné provozní zatížení jsem volil variantně 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 charakterizující vyváženost systému hromadné obsluhy, přičemž hodnoty nižší by představovaly nevytížené systémy a hodnoty vyšší systémy přetížené.

Použil jsem následující hnací vozidla podle druhu trakce.

| Trakce dieselelektrická | Trakce elektrická |
|-------------------------|-------------------|
| 735 - T 466.1 | 121 - E 469.1 |
| 753 - T 478.3 | 183 - E 669.3 |
| 754 - T 478.4 | |
| 781 - T 679.1 | |

Výsledkykušebních výpočtů v uvedených traťových úsecích jsou uvedeny v následujících přehledných tabulkách.

Na základě provedených zkušebních výpočtů je možno konstatovat následující závěry:

- navržená metoda výpočtu propustné výkonnosti traťového úseku a zpracovaný výpočetní program jsou funkční ve všech kombinacích zabezpečovacích zařízení, počtu kolejí, hnacích vozidel a parametrů vozové soupravy,
- vzhledem k tomu, že většinu vstupních dat o dopravních, traťových úsecích, vozové soupravě a hnacích vozidlech je možno modifikovat podle reálné situace, lze výpočty dále zpřesňovat; to je důležité zvláště ve zvláštních podmínkách provozu při narušení stávajících podmínek,
- výsledky jsou dobře porovnatelné se současně vykazovanými hodnotami praktické propustnosti posuzovaných traťových úseků; i když porovnatelnost je komplikována situací, že v reálném provozu se většinou jedná o provoz různých druhů vlaků s různými stanovenými rychlostmi,
- významně rozdílné jsou jen údaje o délce fronty M1 vyhodnocované klasicky podle vztahů hromadné obsluhy a získané ze simulace provozu; především při vyšších hodnotách zvoleného přípustného provozního zatížení (0,7 a výše) hromadná obsluha zjevně podceňuje propustnou výkonnost traťového úseku a to délkou fronty, kterou simulace nepotvrzuje,

- porovnáním empirických a generovaných hodnot dob jízdy lze konstatovat použitelnost Erlangova rozdělení pro aproximaci této náhodné veličiny; při dostatečně dlouhé době simulace jsou rozdíly zanedbatelné.
- nutno podotknout, že platnost navržené metody je potřebné statisticky i výpočetně ověřit na dalších traťových úsecích s jiným typem provozu a zatížení (jednokolejné trati).

6. OTEVŘENÉ PROBLÉMY

- statistické vyhodnocení doby jízdy t_j na jednokolejných tratích, podle jednotlivých typů vlaků a druhů zabezpečovacích zařízení s odvozením příslušných koeficientů,
- přepracování počítačového programu na možnost volby smíšeného provozu na základe získaných koeficientů a nově odvozených vztahů,
- ověření funkčnosti přepracovaného programu a získaných výsledků na konkrétních traťových úsecích,
- simulační aplikace v kaskádě traťových úseků.

Tabulka I., Tabulka II.

TRAFŮVÝ ÚSEK č.: 1120 Žilina - Vrútky
 UDÁVANÁ PRAKTICKÁ PROPUSTNOST: 138 vlakov/24h
 STANOVENÁ RYCHLOST VLAKU : 65 kmh⁻¹

| Hmotnost vozové soupravy m (t) | Hnací vozidlo Výkon (kW) | Zvolené provozní zatižení eta | H R O M A D N Ā O B S L U H A | | | | S I M U L A C E P R O V O Z U | | | |
|--|-----------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------|
| | | | N (vl) | obsazení | odstup | fronta | N (vl) | obsazení | odstup | fronta |
| | | | | t _{p.obsa} (min) | t _{p.-1} (min) | M1 (vl) | | t _{p.obsa} (min) | t _{p.-1} (min) | M1 (vl) |
| | 753 | 0.5 | 75 | 9,48 | 18,97 | 0,5 | 75 | 9,28 | 19,10 | 0,23 |
| | T 478.3 | 0.6 | 91 | 9,48 | 15,81 | 0,9 | 90 | 9,43 | 15,93 | 0,43 |
| | | 0.7 | 106 | 9,48 | 13,55 | 1,63 | 107 | 9,32 | 13,43 | 0,59 |
| | 1324 | 0.8 | 121 | 9,48 | 11,86 | 3,20 | 121 | 9,36 | 11,90 | 0,94 |
| S 1200 | 2x 735 | 0.5 | 92 | 7,79 | 15,58 | 0,5 | 90 | 7,61 | 15,87 | 0,22 |
| | T 466.1 | 0.6 | 110 | 7,79 | 12,98 | 0,9 | 113 | 7,56 | 12,74 | 0,41 |
| | | 0.7 | 129 | 7,79 | 11,13 | 1,63 | 130 | 7,55 | 11,02 | 0,56 |
| | 1852 | 0.8 | 147 | 7,79 | 9,74 | 3,2 | 149 | 7,66 | 9,64 | 0,99 |
| | 121 | 0.5 | 105 | 6,82 | 13,63 | 0,5 | 106 | 6,61 | 13,54 | 0,25 |
| | E 469.1 | 0.6 | 126 | 6,82 | 11,36 | 0,9 | 129 | 6,59 | 11,09 | 0,38 |
| | | 0.7 | 147 | 6,82 | 9,74 | 1,63 | 145 | 6,63 | 9,91 | 0,53 |
| | 2340 | 0.8 | 168 | 6,82 | 8,52 | 3,2 | 167 | 6,53 | 8,62 | 0,86 |

TRAFŮVÝ ÚSEK č.: 1142 Púchov - Žilina zr.st.
 UDÁVANÁ PRAKTICKÁ PROPUSTNOST: 98 vlakov/24h
 STANOVENÁ RYCHLOST VLAKU : 65 kmh⁻¹

| Hmotnost vozové soupravy m (t) | Hnací vozidlo Výkon (kW) | Zvolené provozní zatižení eta | H R O M A D N Ā O B S L U H A | | | | S I M U L A C E P R O V O Z U | | | |
|--|-----------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------|
| | | | N (vl) | obsazení | odstup | fronta | N (vl) | obsazení | odstup | fronta |
| | | | | t _{p.obsa} (min) | t _{p.-1} (min) | M1 (vl) | | t _{p.obsa} (min) | t _{p.-1} (min) | M1 (vl) |
| | 753 | 0.5 | 47 | 15,06 | 30,12 | 0,5 | 46 | 15,01 | 31,12 | 0,21 |
| | T 478.3 | 0.6 | 57 | 15,06 | 25,10 | 0,9 | 56 | 15,22 | 25,62 | 0,38 |
| | | 0.7 | 66 | 15,06 | 21,52 | 1,63 | 66 | 15,08 | 21,74 | 0,54 |
| | 1324 | 0.8 | 76 | 15,06 | 18,83 | 3,2 | 76 | 15,21 | 18,94 | 0,98 |
| S 1200 | 2x 735 | 0.5 | 56 | 12,64 | 25,27 | 0,5 | 55 | 12,63 | 25,79 | 0,23 |
| | T 466.1 | 0.6 | 68 | 12,64 | 21,06 | 0,9 | 68 | 12,45 | 21,07 | 0,38 |
| | | 0.7 | 79 | 12,64 | 18,05 | 1,63 | 79 | 12,67 | 18,05 | 0,71 |
| | 1852 | 0.8 | 91 | 12,64 | 15,80 | 3,2 | 91 | 12,73 | 15,66 | 1,06 |
| | 121 | 0.5 | 63 | 11,38 | 22,76 | 0,5 | 61 | 11,32 | 23,52 | 0,22 |
| | E 469.1 | 0.6 | 75 | 11,38 | 18,97 | 0,9 | 76 | 11,51 | 18,93 | 0,42 |
| | | 0.7 | 88 | 11,38 | 16,26 | 1,63 | 86 | 11,32 | 16,67 | 0,55 |
| | 2340 | 0.8 | 101 | 11,38 | 14,22 | 3,2 | 101 | 11,24 | 14,20 | 1,03 |

Literatura

- [1] Brandalík, F. - Kluvánek, P.: Operační analýza v železniční dopravě. ALFA, Bratislava 1986.
- [2] Černý, J. - Kluvánek, P.: Základy matematické teorie dopravy. SAV, Bratislava 1991.
- [3] ČSD M - 40 Zásady pro obnovu rozrušené železniční sítě. NADAS, Praha 1986.
- [4] ČSD V - 7 Trakční výpočty. NADAS, Praha 1962.
- [5] Daněk, J. - Vonka, J.: Dopravní provoz železnic. ALFA, Bratislava 1984.
- [6] Hertler, G. - Vonka, J.: Kritické poznámky ke stavu výpočtů propustné výkonnosti železničních tratí na ČSD a DR.
In: Práce a studie VŠDS - svazek 7, ALFA, Bratislava 1989.
- [7] Herzáň, F. - Habarda, D. - Mrkvička, J.: Mechanika dopravy kolejových vozidel. NADAS, Praha 1984.
- [8] Kluvánek, P. - Brandalík, F.: Operační analýza I - Teorie hromadné obsluhy. ALFA, Bratislava 1981.
- [9] Linda, B. - Fronc, B.: Operační analýza 5. ALFA, Bratislava 1986.
- [10] Milata, I.: Teorie hromadné obsluhy. VF VŠDS, Žilina 1991.
- [11] Pelant, J. - Horák, J. - Kulhavý, P. - Klimentová, J.: Základy matematické statistiky. FMNO, Praha 1967.
- [12] Vorlíček, M.: Vybrané kapitoly matematické statistiky. FMNO, Praha 1968.
- [13] Vorlíček, M. - Holický, M. - Špačková, M.: Pravděpodobnost a matematická statistika pro inženýry. FMNO, Praha 1982.
- [14] KŽD F PEDaS VŠDS.: Studie - Provozní výkonnost š. o. ČSD - přílohová část. VŠDS, Žilina 1991
- [15] Linda, B. - Fronc, B.: Operační analýza 5. ALFA, Bratislava 1986.
- [16] Milata, I.: Teorie hromadné obsluhy. VF VŠDS, Žilina 1991.

Lektoroval: *Doc. Ing. Jaroslav Vonka, CSc.*

Předloženo v únoru 1995.

Resumé

NÁVRH VÝPOČTU PROPUSTNÉ VÝKONNOSTI TRAŤOVÉHO ÚSEKU V KRIZOVÝCH SITUACÍCH

Ladislav NOVÁK

Článek řeší novým způsobem výpočet propustné výkonnosti traťového úseku.

Na základě rozsáhlých statistických šetření autor dokazuje, že dobu jízdy t_j v traťovém úseku je možno považovat za náhodnou proměnnou s Erlangovým rozdělením.

Aplikuje pravidlo o 6σ mezi minimální a maximální hodnotou náhodné proměnné normálně rozložené na rozdělení Erlangovo. Zároveň zavádí pojem "koeficient polohy střední hodnoty" tohoto rozdělení, který určuje v závislosti na minimální době jízdy i velikost

a polohu střední hodnoty doby jízdy. Statisticky dokazuje, že tento koeficient má konstantní hodnotu.

Na základě tohoto důkazu odvozuje potom i vztahy pro výpočet parametrů a , b Erlangova rozdělení, které využívá při simulaci provozu.

Hodnota minimální doby jízdy je zjišťována pro maximální výkon zvoleného hnacího vozidla na základě pohybové rovnice vlaku. Funkčnost a praktickou použitelnost dokumentuje zpracovaný rozsáhlý počítačový program umožňující výpočty propustné výkonnosti dokreslovat charakteristikami hromadné obsluhy respektive simulací provozu.

Summary

PROPOSITION OF CALCULATION LINE - SECTION- CAPACITY IN THE RISKMANAGEMENTS

Ladislav NOVÁK

The paper solves in a new way the calculation of the carrying capacity of a line.

On the basis of extensive statistical analyses, the author proves that the running time t_j on the line section can be considered as a random variable with the Erlang classification.

The rule of 6σ between the minimum and maximum values of the random variable normally distributed on the Erlang classification is being applied. At the same time, the author introduces the concept "the coefficient of mean value position" of this classification which is determined by the dependence on the minimum running time, also the magnitude and position of the mean value of the running time. He proves statistically that this coefficient is of a constant value.

On the basis of this proof, he then derives also the relations for the calculation of parameters a , b of the Erlang classification which is used for the operation simulation.

The value of the minimum running time is ascertained for the maximum performance of the chosen motive power unit on the basis of the equation of motion of the train.

The functionality and practical application are proved by the elaborated extensive computer programme enabling to complement the calculations of the carrying capacity by the characteristics of mass attendance or by operation simulation.

Zusammenfassung

VORSCHLAG DER BERCHNUNG DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT EINER TEILSTRECKE IN DER KRISISSITUATIONEN

Ladislav NOVÁK

Im vorliegenden Aufsatz wird die Ermittlung der Durchlaßfähigkeit eines Streckenabschnitts gelöst.

Ladislav Novák:

Aufgrund der umfangreichen statistischen Untersuchungen beweist der Autor, daß die Fahrzeit auf einem Streckenabschnitt als eine Veränderliche mit Erlang - Verteilung betrachtet werden kann.

Er bringt zur Geltung die σ - Regel zwischen dem Minimal - und Maximalwert der Zufallsveränderliche, die normal auf Erlang - Verteilung gelagert ist. Zugleich führt er den Begriff "Koeffizient der Lage eines Mittelwertes" dieser Verteilung ein, der in Abhängigkeit von der minimalen Fahrzeit auch die Größe und Lage eines Mittelwertes der Fahrzeit bestimmt. Aufgrund der Statistik beweist er, daß dieser Koeffizient einen konstanten Wert hat.

Aufgrund dieses Beweises leitet er auch die Beziehungen für die Ermittlung von Parametern a , b der Erlang - Verteilung, die er für einen simulierten Betrieb benutzt.

Den Wert der minimalen Fahrzeit ermittelt man zur Ausnutzung für die maximale Leistung des aufgrund der Bewegungsgleichung des Zuges gewählten Triebfahrzeugs.

Das umfangreiche und mit Hilfe eines Computers bearbeitete Programm dokumentiert die Funktionierung und praktische Anwendung und es ermöglicht auch, die Ermittlungen der Durchlaßfähigkeit durch die Charakteristiken einer Massenbedienung, beziehungsweise eines simulierten Betriebs zu verdeutlichen.