

ZRANITELNOST DOPRAVNÍ SÍTĚ, IDENTIFIKACE SLABÝCH MÍST NA DOPRAVNÍ SÍTI

Miroslav Slivoně¹

1. ÚVOD

Zkoumání zranitelnosti dopravní sítě se zaměřuje na následky selhání místa na dopravní síti bez ohledu na pravděpodobnost tohoto selhání. Neuvažování pravděpodobnosti selhání má svou logiku – existují totiž hrozby, které lze předvídat jen velice těžko (válečný konflikt, sabotáž, teroristický útok). V některých případech může být pravděpodobnost selhání určitého místa velice nízká a vliv tohoto selhání na výkonnost dopravní sítě jako celku zanedbatelný (uvažovaná dopravní síť tedy nemá z hlediska spolehlivosti závady), ale nepříznivý dopad pouze na určitou část dopravní sítě může být značný. Selhání jednoho nebo několika málo míst na dopravní síti může za nepříznivých okolností zapříčinit úplné odříznutí některého dopravního uzlu nebo oblasti od okolí.

2. KONCEPT ZRANITELNOSTI DOPRAVNÍ SÍTĚ

Koncept zranitelnosti je možné aplikovat na spojení mezi dvojicí míst na dopravní síti, na dostupnost z určitého místa do jiných částí dopravní sítě nebo do sítě jako celku.

Existuje řada různých přístupů k definování zranitelnosti, jedna z možných definic je následující: Uzel je zranitelný, pokud selhání (resp. degradace většího rozsahu) relativně malého počtu úseků podstatně omezí dosažitelnost tohoto uzlu.

Pod pojmem dosažitelnost rozumíme možnost dosažení dané lokace (resp. služby, aktivity) s vynaložením přijatelných nákladů (tzn. peněz, ujeté vzdálenosti, času, úsilí apod.). Rozeznáváme dosažitelnost relativní a integrální. Relativní dosažitelnost popisuje stupeň spojení mezi dvojicí daných míst (např. dosažitelnost havarijního střediska z daného místa). Relativní dosažitelnost A_{ij} mezi dvěma body i a j je tedy dána jako $A_{ij} = C_{ij}$, kde C_{ij} je separace (vzdálenost, čas, náklady) mezi dvěma body. Integrální dosažitelnost popisuje propojení mezi daným bodem a všemi ostatními body (službami, aktivitami) v rámci regionu nebo celé sítě. Vypočítá se jako suma relativních dosažitelností místa i přes všechny body j : $AI_i = \sum_j A_{ij}$.

¹ Ing. Miroslav Slivoně, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra technologie a řízení v dopravě, Studentská 95, 53210 Pardubice, Tel.: +420 466 036 198, E-mail: miroslav.slivone@upce.cz

3. HEURISTICKÁ METODA URČENÍ ZRANITELNÝCH ÚSEKŮ V DOPRAVNÍ SÍTI

Autorem metody je M. A. P. Taylor (1979), který ji nazývá metodou podmíněné pravděpodobnosti; metoda vychází z algoritmu navrženého R. B. Dialeem (1971).

Předpokládejme, že pravděpodobnost použití cesty $R(i, j)$ z uzlu i do uzlu j , je přímo úměrná pravděpodobnosti užití všech úseků e v cestě $R(i, j)$. Potom platí:

$$P\{R(i, j)\} = K \cdot \prod_{e \in R(i, j)} g(e) = K \cdot G(R(i, j)), \quad (1)$$

kde K je konstanta, $g(e)$ je pravděpodobnostní funkce užití úseku, $G(R)$ je pravděpodobnostní funkce užití cesty. Pro $g(e)$ přirozeně platí, že $0 \leq g(e) \leq 1$.

Vhodnou funkcí pro $g(e)$ je:

$$\begin{aligned} g(e) &= \exp(-\alpha z(e)) && \text{pokud } e \text{ leží na akceptovatelné cestě} \\ g(e) &= 0 && \text{v ostatních případech} \end{aligned} \quad (2)$$

kde $z(e) \geq 0$ je rozdíl mezi cestovními náklady vyvolanými použitím úseku e spojujícího uzly r a s a náklady vyvolanými použitím minimální cesty mezi r a j . Pokud tedy $z(e) = 0$, pak úsek e leží na minimální cestě. Parametr α odráží citlivost cestujícího na cestovní náklady. Pokud bude hodnota α blízká nule, budou se cestující pohybovat po celém spektru existujících cest, zatímco vyšší hodnoty α budou znamenat větší citlivost na cestovní náklady a cestující se budou spíše soustředit na nejkratší cestu.

Kritérium pro akceptovatelnou cestu bude následující: Akceptovatelná cesta bude taková cesta, ve které pro každý následující uzel platí, že jeho vzdálenost od cíle je menší než vzdálenost předcházejícího uzlu od cíle.

Pokud $V(r, j)$ bude vzdálenost uzlu r od cíle cesty j (tj. minimální cestovní náklady z r do j), pak úsek e bude na akceptovatelné cestě, pokud $V(r, j) > V(s, j)$. Rozdíl nákladů $z(e)$ je roven

$$z(e) = V(s, j) + c(e) - V(r, j), \quad (3)$$

kde $c(e)$ jsou cestovní náklady přesunu po úseku e . Pokud se úsek e nachází na minimální cestě mezi i a j , pak $z(e) = 0$, protože platí, že $V(r, j) = V(s, j) + c(e)$.

Vztah (1) vyjadřuje způsob výpočtu pravděpodobnosti použití cesty $R(i, j)$ mezi uzly i a j . Pravděpodobnost, že úsek e bude použitý pro cestu mezi uzlem i a uzlem j , se vypočítá jako suma pravděpodobností použití všech cest mezi i a j , které obsahují úsek e , tj.

$$P\{e, (i, j)\} = \sum_{R(i, j): e \in R(i, j)} P\{R(i, j)\} \quad (4)$$

Praktické využití tohoto způsobu výpočtu pravděpodobnosti použití úseku e je obtížné, protože je potřeba identifikovat všechny akceptovatelné cesty mezi uzly i a j . Nicméně podmíněná pravděpodobnost využití úseku e na cestě mezi i a j za podmínky,

že cesta bude procházet uzlem r $P\{e, (i, j) | r\}$, může být spočítána pomocí efektivního rekurzivního algoritmu, aniž by bylo potřeba určit všechny akceptovatelné cesty.

Tato podmíněná pravděpodobnost bude rekurzivně vypočtena pomocí váhové funkce úseku $w(e)$:

$$\begin{aligned} w(e) &= g(e) && \text{pokud } s = j \text{ (cílový uzel)} && (5) \\ w(e) &= g(e) \cdot \sum_{l \in \beta(s)} w(l) && \text{pro ostatní } s \end{aligned}$$

kde suma $\sum_{l \in \beta(s)} w(l)$ je součet váhových funkcí všech úseků l , které mohou být použity k opuštění uzlu s .

Pro výpočet $P\{e, (i, j) | r\}$ platí:

$$P\{e, (i, j) | r\} = \frac{w(e)}{\sum_{l \in \beta(r)} w(l)} \quad (6)$$

Hodnoty funkce $w(e)$ mohou být spočítány rekurzivně při posunování polohy uzlu s od uzlu j podle topologického pořadí (tj. zvyšující se hodnoty $V(s, j)$).

Vypočtené pravděpodobnosti $P\{e, (i, j) | r\}$ pro jednotlivé úseky e mohou být využity jako indikátory klíčového významu úseků z hlediska zranitelnosti dopravní sítě. Platí, že čím vyšší je hodnota pravděpodobnosti $P\{e, (i, j) | r\}$, tím více nepříznivé budou následky v případě poruchy tohoto úseku. Ve všeobecnosti se dá říct, že porucha jakéhokoli úseku s $P\{e, (i, j) | r\} > 0,5$ negativně ovlivní výkonnost dopravní sítě, ale celkový efekt nemusí být nijak velký. Skutečně kritická, zranitelná místa na dopravní síti mají hodnotu $P\{e, (i, j) | r\}$ ještě vyšší.

4. ZÁVĚR

Účelem analýzy zranitelnosti dopravní sítě je jednak odhalit slabá místa, ve kterých je síť zranitelná a jejichž selhání bude mít značné negativní následky, a jednak navrhnout nápravná opatření (typu vybudování nového úseku) vedoucí ke zvýšení robustnosti sítě.

Princip uvedené metody analýzy zranitelnosti dopravní sítě je jednoduchý, z hlediska výpočetní náročnosti je metoda efektivní i v rozsáhlých sítích. Metoda vyhodnocuje zranitelnost z pohledu dosažitelnosti dvou míst i a j (tedy z hlediska relativní dosažitelnosti). Zranitelnost z pohledu integrální dosažitelnosti je možné analyzovat opakováním algoritmu pro všechny zkoumané uzly j .

Slabinou metody je nutnost formulace kritéria pro akceptovatelnou cestu, což není jednoduché. Formulace uvedená výše v textu je použitelná pro řídké dopravní sítě na úrovni regionu nebo státu; pro husté dopravní sítě typické pro městské aglomerace se nehodí.

5. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] M. G. H. Bell, Y. Iida: The Network Reliability of Transport, Proceedings of the 1st International Symposium on Transport Network Reliability, Oxford, 2003
- [2] G. M. D'Este, M. A. P. Taylor: Network Vulnerability: An Approach to Reliability Analysis at the Level of National Strategic Transport Networks, In: [1]

6. ANOTACE

Příspěvek se zabývá problematikou zranitelnosti dopravní sítě a identifikace slabých míst na dopravní síti. V textu je popsána metoda analýzy sítě z hlediska zranitelnosti jejích úseků.

7. ABSTRACT

The text deals with problems of vulnerability of the transport network and identification of weaknesses of the network. There is described a method of analysis of transport network from the point of view of vulnerability of its links in the text.

Příspěvek vznikl za podpory Institucionálního výzkumu „Teorie dopravních systémů“ (MSM 0021627505) Univerzity Pardubice.