Mr Milorad Opsenica,
major, dipl. inž.
Vojnotehnička akademija VJ,
Beograd

ANALIZA VREMENSKIH GUBITAKA PRI KRETANJU VOJNE MOTORIZOVANE KOLONE RASKRSNICOM

UDC: 656.11.052.001.573:623.437/.438

Rezime:

Pri kretanju vojne motorizovane kolone po putnoj mreži vremenski gubici nastali na raskrsnicama čine znatan deo ukupnog vremena kretanja. U radu je analizirano kretanje vojne motorizovane kolone raskrsnicom sa aspekta vremenskih gubitaka. Opis problema zasnovan je na determinističkom modelu, uz adekvatan stohastički pristup.

Ključne reči: vojna motorizovana kolona, raskrsnica, vremenski gubitak.

ANALYSIS OF DELAY DUE TO MILITARY MOTORIZED COLUMN CIRCULATION AT INTERSECTIONS

Summary:

During the circulation of a military motorized column on the roads the delay at intersections makes significant share of the total travel time. The paper presents the analysis of military motorized column circulation at intersections from delay aspect. The problem description is based on the determination model and the corresponding approach probability is also presented.

Key words: military motorized column. intersection. delay.

Uvod

Vojni putni saobraćaj često se organizuje u vidu kolone, što ima značajne prednosti nad pojedinačnim vojnim saobraćajem (grupisana jedinica, olakšana organizacija i kontrola kretanja, potrebno manje pratećeg ljudstva, itd.), ali u određenim situacijama se javljaju i izvesne poteškoće.

Naime, zbog ustrojstva vojne motorizovane kolone, kao kompaktne grupe vozila određene dubine i brzine kretanja, ona u saobraćaju na javnom putu izaziva određene probleme, naročito kada je pretiču ostala vozila, zatim pri kretanju na usponu, odnosno nizbrdici, kretanju auto-putem, savla-

đivanju uskih grla na putu, kao i pri prolasku raskrsnica.

U navedenim situacijama ostali učesnici u saobraćaju »trpe« kolonu, odnosno dolazi do vremenskih i materijalnih gubitaka, što umanjuje efikasnost izvršavanja namenskih zadataka vojne motorizovane kolone.

Na raskrsnici, kao neuralgičnoj tački putne mreže na kojoj se najizraženije sučeljavaju učesnici u saobraćaju, kretanje vojne motorizovane kolone mora biti detaljno regulisano. Pravilnim sagledavanjem osnovnih relacija vezanih za savlađivanje raskrsnica, nedvosmisleno će ukazati na potrebu preduzimanja adekvatnih regulacionih mera primenjenih na kretanje kolone,

kao i same tehnike organizovanja i kretanja (izbor maršrute, vremena kretanja, načina ešeloniranja kolonske formacije, itd.).

Analiza kretanja vojne motorizovane kolone u zoni raskrsnice

Na mreži javnih puteva postoje tri tipa raskrsnica:

- nesignalisana raskrsnica puteva istog značaja,
- nesignalisana raskrsnica puteva različitog značaja, i
- signalisana raskrsnica.

Na slici 1 prikazane su situacije u kojima se može naći kolona na raskrsnici, te pripadni tokovi sa ostalih prilaza raskrsnici kojima vozila iz kolone dolaze u interaktivan odnos. Radi jednostavnosti analize razmatraju se situacije na najčešćem obliku raskrsnice — pravilnoj četverokrakoј raskrsnici.

Sa samog prikaza uočava se različitost pojedinih situacija na osnovu stanja prioriteta pri kretanju na raskrsnici. Uvažavajući pravila kretanja tokova na raskrsnicama, odnosno prioritete u konkretnim situacijama (pravilo desne strane, glavni i sporedni pravac, te signali na raskrsnici), situacije sa slike 1 treba grupisati po kriterijumu po kojem prioritetni tokovi ometaju vozila iz sastava kolone. Tako se, kao najblaži slučajevi, izdvajaju one situacije pri kojima vozila iz kolone imaju prioritet pri kretanju raskrsnicom. Prema slici, to su situacije 2, 4, 5, 10 i 11, odnosno:

- skretanje kolone desno na raskrsnici puteva istog značaja;
- prolazak kolone pravo na raskrsnici puteva različitog značaja, kada kolona dolazi sa glavnog pravca;
- skretanje kolone desno na raskrsnici puteva različitog značaja, kada kolona dolazi sa glavnog pravca;

— prolazak kolone pravo na signalisanoј raskrsnici (zeleno svetlo);

— skretanje kolone desno na signalisanoј raskrsnici (zeleno svetlo).

Ovim situacijama treba pridružiti i slučaj levog skretanja kolone na signalisanim raskrsnicama, kada su određeni signali za levo skretanje, odnosno definisane površine na raskrsnici (nije prikazano na slici).

Za navedene situacije, posmatrano sa aspekta potrebe preduzimanja mera regulacije, može se reći da nije potrebno posebno angažovanje regulativnih organa (saobraćajna milicija, odnosno pripadnici jedinica SbVP). Naravno, ovaj stav je zasnovan na teoretskoј pretpostavci pravilnog pridržavanja pravila i propisa koja važe u saobraćaju, te se u delikatnijim situacijama u praksi (npr. kolona od posebnog značaja) i u navedenim situacijama primenjuju mere regulacije koje sprovode ovlašćena lica.

Sledeća, složenija situacija javlja se na raskrsnicama kada jedan od pripadnih tokova ima prioritet nad vozilima u koloni, a prema slici to su situacije 1, 6, 8 i 12, odnosno:

- prolazak kolone pravo na raskrsnici puteva istog značaja;
- skretanje kolone levo na raskrsnici puteva različitog značaja, kada kolona dolazi sa glavnog pravca;
- skretanje kolone desno na raskrsnici puteva različitog značaja, kada kolona dolazi sa sporednog pravca;
- skretanje kolone levo na signalisanoј raskrsnici (opšti semafor).

Još složenija situacija javlja se pri postojanju dva prioritetna toka nad vozilima iz kolone, a to su, prema slici, situacije 3 i 7, odnosno:

- skretanje kolone levo na raskrsnici puteva istog značaja,
- prolazak kolone pravo na raskrsnici puteva različitog značaja, kada kolona dolazi sa sporednog pravca.

Sl. 1 — Moguće situacije kolone na raskrsnici

Najsloženiji slučaj javlja se pri postojanju prioriteta svih ostalih tokova nad vozilima iz kolone, a to je slučaj 9 sa slike, odnosno pri skretanju kolone levo na raskrsnici puteva različitog značaja, kada kolona dolazi sa sporednog pravca.

Analiza vremena savlađivanja raskrsnice

Za početak je potrebno analizirati vreme za koje vozila iz kolone savlađuju raskrsnicu kada nema prioriteta tokova nad kolonom. Pod pretpostavkom da se radi o kontinuelnoj kolonskoj formaciji od N_k vozila, dubine kolone D_k , vreme savlađivanja raskrsnice je:

$$T^r = D_k / V_r(s), \text{ gde je:} \quad (1)$$

V_r — brzina savlađivanja (kretanja) raskrsnice (m/s).

Brzina kretanja vozila u zoni raskrsnice (V_r) može biti zakonski regulisana (što se, pre svega, odnosi na kretanje u pravcu) odnosno zavisi od uslova skretanja baziranim na projektno-konstruktivnim parametrima raskrsnice i karakteristikama vozila iz sastava kolone.

Pod dubinom kolone podrazumeva se njena dužina, primerena datim uslovima kretanja (odstojanja među vozilima su u funkciji brzine kretanja kolone).

Pošto je brzina savlađivanja raskrsnice manja od brzine kretanja kolone na otvorenom putu, teoretski je moguće očekivati prikupljanje ostalih vozila iza kolone za vreme njenog savlađivanja raskrsnice. Broj tih vozila iz sustižućeg toka (N_s) biće:

$$N_s = (q_s - q_k) T^r = (q_s - q_k) (D_k / V_r) \quad (2)$$

gde je:

q_s — veličina protoka sustižućeg toka (voz./s),

q_k — protok vozila iz kolone u zoni raskrsnice (voz./s).

Dakle, prikupljanje vozila iza kolone može se očekivati pri većim vrednostima protoka sustižućeg toka u odnosu na protok vozila kolone. Vrednosti protoka mogu se izraziti preko intervala sleđenja među vozilima, relacijama $q_s = 1/t_{hs}$, odnosno $q_k = 1/t_p$, gde je:

t_{hs} — interval sleđenja među vozilima sustižućeg toka (s),

t_p — interval sleđenja među vozilima iz kolone pri prolasku raskrsnicom (s).

Za preostale slučajeve, pri postojanju tokova koji su prioritetniji od tokova vozila iz kolone, teoretski posmatrano, vreme potrebno za savlađivanje raskrsnice povećava se zbog toga što vozila iz prioriteta tokova ometaju vozila iz kolone. Dakle, prolazak vozila iz kolone raskrsnicom biće moguć u tzv. »slobodnim vremenskim razmacima« (intervalima, prazninama) koji se javljaju u prioritetnim tokovima. Što je intenzitet saobraćaja u prioritetnom toku veći, manji su slobodni vremenski intervali, a time i veće ometanje prolaska vozila iz kolone, čime se povećava ukupno vreme potrebno za savlađivanje raskrsnice.

Na slici 2 prikazan je prolazak vozila iz kolone raskrsnicom u slučaju kada ih ometaju vozila prioriteta toka (prikaz je dat u formi dijagrama put-vreme).

Sa prikaza je očigledno da se od slobodnog vremenskog intervala, koji se javlja u prioritetnom toku, mora oduzeti deo vremena potrebnog da nailazeće vozilo iz prioriteta toka bezbedno prođe raskrsnicu (t_{be}), a tek preostali deo intervala može se iskoristiti za prolazak vozila iz sastava kolone.

To preostalo vreme (t_z) čine parcijalna vremena prema sledećem:

K_1 (do K_n) — vreme kašnjenja pri prolasku vozila iz niza koji čekaju na prolaz (s);

- t_R — vreme potrebno da prvo vozilo iz niza savlada raskrsnicu (prođe pravo ili skrene (s), u zoni raskrsnice (određena znakom ili na drugi način);
- t_p — interval sleđenja među vozilima iz niza ko- — za skretanje je to bezbedna brzina skretanja (ona se određuje u odnosu na uslove zanošenja, odnosno prevrtanja pri kretanju po kružnom

Sl. 2 — Prolazak vozila iz kolone raskrsnicom

ja savlađuju raskrsnicu (s).

Analitičke relacije koje opisuju kretanje vozila iz sastava kolone raskrsnicom date su u narednom prikazu.

S obzirom na to da se dopušta mogućnost kretanja pravo na raskrsnici ili skretanje, brzina kretanja definiše se prema sledećem:

— za pravolinijsko kretanje dozvoljena je (propisana) brzina kretanja

luku za date parametre sastava vozila iz kolone, tj. karakteristika površine raskrsnice).

Za dalji proračun, za pomenute brzine uvodi se oznaka V_R .

Radi određivanja vremena potrebnog za bezbedan prolazak raskrsnicom vozila iz prioritetnog toka, definiše se bezbednosno rastojanje l_{be} (tj. udaljenost vozila iz prioritetnog toka, pri kome vozač vozila iz sastava kolone odstaje od savlađivanja raskrsnice):

$$l_{be} = V_G t_r + (V_G^2 / 2a_k), \text{ (m)}, \quad (3)$$

gde je:

V_G — brzina kretanja vozila iz prioritetskog toka, (m/s),

t_r — vreme reakcije sistema vozač-vozilo, (s),

a_k — usporenje pri kočenju, (m/s²).

To bezbednosno vreme sada je:

$$t_{be} = \frac{l_{be}}{V_{Ge}} = t_r + \frac{V_G}{2a_k} \text{ (s)} \quad (4)$$

Dakle, to je vreme koje je potrebno oduzeti od slobodnog vremenskog intervala u prioritetnom toku.

Radi određivanja vremenskog intervala (intervala sleđenja) među vozilima iz kolone koja prolaze raskrsnicu, polazi se od pretpostavke da vozila slede jedno drugo na bezbednosnom odstojanju (l_{bk}) za date uslove brzine prolaska i stanja površine raskrsnice. Prema tome:

$l_{bk} = V_R t_r + (a_k t_k^2 / 2)$, (m), pa uz zamenu $t_k = V_R / a_k$ dobija se:

$$l_{bk} = V_R t_r + V_R / 2a_k, \text{ (m)} \quad (5)$$

gde su:

V_R — brzina prolaska raskrsnicom vozila iz kolone, (m/s),

t_r — vreme reakcije sistema vozač-vozilo, (s),

a_k — vrednost usporenja pri kočenju, (m/s²).

Interval sleđenja među vozilima u koloni je:

$$t_p = l_{bk} / V_R = t_r + V_R / 2a_k, \text{ (s)} \quad (6)$$

Pored toga, potrebno je odrediti i vreme za koje prvo vozilo u nizu savlađuje raskrsnicu. To vreme sastoji se od vremena ubrzavanja (t_u) do postizanja brzine V_R , te vremena kretanja vozila jednakom (t_j) brzinom V_R dok se ne savlada raskrsnica.

Prema tome, $t_R = t_u + t_j$, gde je:

$t_u = V_R / a_u$, gde je a_u — ubrzanje vozila pri polasku, te uz

$t_j = (L_R - S_u) / V_R$, (s), gde je:

L_R — dužina puta koji pređe vozilo savlađujući raskrsnicu (ako se radi o pravolinijskom kretanju tada je to širina raskrsnice, a radi li se o skretanju, to je dužina kružnog luka po kome vozila skreću dok ne napuste zonu raskrsnice), (m);

S_u — deo puta na kojem vozilo ubrzava dok ne postigne brzinu V_R , (m).

Pošto je taj deo puta definisan kao: $S_u = V_R^2 / 2a_u$ to je vreme t_j jednako:

$$t_j = [L_R - (V_R^2 / 2a_u)] / V_R = (L_R / V_R) - (V_R / 2a_u), \text{ (s)}$$

Konačno, vreme t_R je:

$$t_R = t_u + t_j = (V_R / a_u) + (L_R / V_R), \text{ (s)} \quad (7)$$

a prema prikazu sa slike 2 proizilazi:

$$t_z = K_1 + t_R + (N - 1)t_p, \text{ (s)} \quad (8)$$

gde je:

N — broj vozila iz niza koja mogu u intervalu t_z da napuste raskrsnicu.

Transformacijom obrasca (8) dobija se:

$$N = 1 + \{ [t_z - K_1 - (V_R / a_u) - (L_R / V_R)] / [t_r + (V_R / 2a_k)] \} \quad (9)$$

Prethodni obrazac primenjiv je za slučajeve savlađivanja signalisane raskrsnice (gde vreme t_z predstavlja trajanje zelenog svetla na semaforu) i to pri prolasku raskrsnice pravo, odnosno pri desnom skretanju.

Naime, pri levom skretanju na signalisanoj raskrsnici (opšti semafor — nije posebno regulisano levo skretanje), kao i pri savlađivanju nesignalisane raskrsnice, potrebno je u prethodnom obrascu vreme t_z zameniti pripadajućim slobodnim vremenskim razmakom (umanjenim za bezbednos-

no vreme) u prioritetnom toku. Dakle, za nesignalisane raskrsnice vrši se sledeća zamena: $t_z = t_{hG} - t_{be}$, gde je:

t_{hG} — interval sleđenja među vozilima prioritetnog toka,

t_{be} — bezbednosno vreme pri nailasku vozila prioritetnog toka.

Interval t_{hG} se definiše kao:

$t_{hG} = 1/q_G = 1/(V_G g_G)$, gde je:

q_G — vrednost protoka u prioritetnom toku, (voz./s),

V_G — brzina kretanja vozila u prioritetnom toku, (m/s),

g_G — gustina vozila u prioritetnom toku, (voz./m).

Uz vrednost bezbednosnog vremena prema obrascu (4) dobija se vreme t_z prema sledećem:

$$t_z = [1/(V_G g_G)] - (V_G/2a_k) - t_r, \text{ (s)} \quad (10)$$

Zamenom t_z u obrascu (10) dobija se mogući broj vozila iz niza koji može savladati raskrsnicu u datom intervalu prema sledećem:

$$N = 1 + \{ [1/(V_G g_G)] - (V_G/2a_k) - t_r - K_1 - (V_R/a_u) - (L_R/V_R) \} / [t_r + (V_R/2a_k)], \text{ vozila/intervalu.} \quad (11)$$

Obrazac je primenjiv za sve slučajeve savlađivanja nesignalisane raskrsnice (bez obzira na to koliko tokova na njoj ima prioritet u odnosu na vozila iz kolone), kao i za levo skretanje kolone na signalisanoj raskrsnici. Naime, kada je na datoj raskrsnici prioritetno više tokova u odnosu na vozila u koloni, ta raskrsnica se savlađuje kao da je prioritetan samo jedan tok, ali sa kraćim slobodnim vremenskim razmacima. Prema tome, najteži slučaj je već pomenuto skretanje kolone levo na raskrsnici puteva različitog značaja, kada kolona dolazi sa sporednog pravca, jer su tada prioritetna sva tri ostala toka a time je teoretski najmanji slobodni vremenski razmak namenjen za skretanje vozila iz kolone (naravno, pretpostavlja se da pri upoređivanju težine slučajeva u svim va-

rijantama pripadajući tokovi imaju konkretne protoke).

Kako su za datu situaciju na raskrsnici vrednosti moguće (odnosno definisane) brzine prolaska raskrsnice (V_R), ubrzanja u zoni raskrsnice (a_u), puta koje vozilo iz kolone pređe pri prolasku raskrsnice (L_R), vremena reagovanja sistema vozač-vozilo (t_r), te maksimalnog usporenja pri kočenju (a_k) — određene, odnosno konstantne, očito je da će mogući broj vozila (N), koja mogu u datom intervalu savladati raskrsnicu zavisiti od veličine protoka prioritetnog toka (odnosno od veličine zbira protoka ako je u pitanju više prioritetnih tokova) za nesignalisane raskrsnice, odnosno od dužine trajanja zelenog svetla u okviru ciklusa za signalisane raskrsnice.

Zato je u obrascima (9) i (11) potrebno objediniti pomenute veličine i zameniti ih opštim konstantama. Uvedu li se sledeća pojednostavljenja

$$1) R = -[K_1 + (V_R/a_u) + (L_R/V_R) + t_r] \text{ i}$$

$$2) B = t_r + (V_R/2a_k)$$

obrasci (9) i (11) postaju pogodniji za korišćenje i poprimaju izgled:

$$N = 1 + [(t_z + R)/B], \text{ vozila/interval zelenog signala} \quad (12)$$

odnosno

$$N = 1 + \{ [1/(V_G g_G)] - (V_G/2a_k) + R \} / B, \text{ vozila/interval} \quad (13)$$

Pri korišćenju prethodnih obrazaca primećuje se da za određene granične vrednosti slobodnog vremenskog razmaka (odnosno dužine trajanja zelenog), nijedno vozilo iz niza neće moći da savlada raskrsnicu, pa je potrebno analitički odrediti te granične vrednosti. One se dobijaju izjednačavanjem sa nulom obrazaca za N , a značajne su pri donošenju odluka o primeni mera regulacije na određenim raskrsnicama, odnosno pri organizaciji i planiranju kretanja kolone.

Tako se, u slučaju signalisane raskrsnice, za $N=0$, dobija praktično mi-

nimalna vrednost zelenog svetla, pri kojoj je moguće savlađivanje raskrsnice, i ono je:

$$t_z > K_1 + (V_R/a_u) + (L_R/V_R) - t_r - (V_R/2a_k), \text{ (s).}$$

Za nesignalisanu raskrsnicu pogodno je taj granični interval izraziti preko veličine protoka u prioritetnom toku, koji mora biti:

$$q_G < 1/[K_1 + (V_R/a_u) + (L_R/V_R) - t_r - (V_R/2a_k) + (V_G/2a_k)], \text{ voz./s}$$

Radi proračuna vremena koje je potrebno svim vozilima u koloni za savlađivanje raskrsnice, polazi se od sledećih uslova: za vreme slobodnog vremenskog razmaka (odnosno faze zelenog signala), raskrsnicu savlada N vozila, što čini deo vozila od ukupnog broja vozila u koloni. Označi li se sa N_k ukupan broj vozila u koloni, tada je vreme potrebno za savlađivanje nesignalisane raskrsnice (T_R^N):

$$T_R^N = (N_k/N)th_G \text{ (s),} \quad (14)$$

gde je:

th_G — interval sleđenja vozila u prioritetnom toku (s),

N — broj vozila iz niza koji savlada raskrsnicu u intervalu th_G .

Za signalisane raskrsnice u ukupno vreme savlađivanja (T_R^S) mora se uračunati i vreme čekanja vozila iz niza dok su pred crvenim signalom, pa je:

$$T_R^S = (N_k/N)(t_z + t_c) = C(N_k/N) \text{ (s),} \quad (15)$$

gde je:

C — dužina trajanja ciklusa na datoj raskrsnici (s).

Definiše li se odnos trajanja zelenog i crvenog signala kao $\beta = t_z/t_c$, tada je prethodni obrazac:

$$T_R^S = (N_k/N)[1 + (1/\beta)] \text{ (s)} \quad (16)$$

Pri tome, treba istaći da za levo skretanje kolone na signalisanoj raskrsnici, uz proračunat broj vozila (N),

koja mogu da savladaju raskrsnicu za vreme zelenog signala (a rečeno je da taj broj zavisi i od veličine protoka u prioritetnom toku, odnosno od veličine slobodnih vremenskih razmaka u njemu) treba uzeti u obzir i vreme čekanja vozila na crvenom signalu.

Ukupno vreme savlađivanja raskrsnice u tom slučaju biće:

$$T_R^S = (N_k/N)th_s[1 + (t_c/C)] \text{ (s)} \quad (17)$$

gde je:

th_s — interval sleđenja među vozilima prioritetnog toka, tj. toka iz suprotnog smera,

t_c — trajanje crvenog svetla,

C — trajanje ciklusa za datu raskrsnicu.

Pri analizi vremenskih, odnosno materijalnih gubitaka ostalih učesnika pri savlađivanju raskrsnice prvenstveno se misli na vozila iz toka iza kolone koja su prinuđena da čekaju dok sva vozila iz sastava kolone ne savladaju raskrsnicu. Međutim, gubici se javljaju i kod vozila ostalih tokova na raskrsnici (npr. u tokovima vozila na sporednim pravcima raskrsnice puteva različitog značaja).

Broj »nakupljenih« vozila iza kolone koja savlađuje raskrsnicu određuje se prema sledećim uslovima:

protok vozila iz kolone (q_k), pri savlađivanju raskrsnice, definisan je kao:

$$q_k = N_k/T_R, \text{ voz./s, gde je:}$$

N_k — ukupan broj vozila u koloni,

T_R — vreme savlađivanja raskrsnice (za celu kolonu).

Prema tome, broj nakupljenih vozila iza kolone (N_s), za vreme savlađivanja raskrsnice, biće:

$$N_s = (q_s - q_k)T_R = q_s T_R - N_k, \quad (18)$$

gde je q_s , veličina protoka sustižućeg toka, voz./s.

Iz prethodnog obrasca proizilazi da će se nakupljanje javljati pri vrednostima protoka q_s većim od ostvarenog protoka kolone (q_k) na raskrsnici.

U slučaju savlađivanja nesignalisane raskrsnice taj broj nakupljenih vozila, prema obrascu (13), obrascu (18), te već navedenim zamenama (R i B) biće:

$$N_s^N = N_k \{ [(th_G q_s B) / [1 + (1/V_G q_G) - (V_G/2a_k) + R]] - 1 \},$$

vozila.

Za signalisanu raskrsnicu, analogno pripadnim obrascima:

$$N_s^S = N_k \{ [(q_s CB) / (t_z + R + B)] - 1 \},$$

vozila.

Analogno prethodnom, za slučaj levog skretanja kolone na signalisanoj raskrsnici:

$$N_s^{SL} = N_k \{ \{ [B q_s th_G (C + t_c)] / [C(1 + (1/V_G g_G) - (V_G/2a_k) + R)] \} - 1 \} \text{ vozila.}$$

Prethodni obrasci pogodni su za simuliranje procesa nakupljanja vozila iza kolone pri različitim uslovima kretanja raskrsnicom i različitim tipovima raskrsnica.

Uz ostale pretpostavljene parametre, vrednost vremena savlađivanja raskrsnice, odnosno broj nakupljenih vozila iza kolone, zavisno od veličine prioriternih tokova na raskrsnici, ima sledeći principijelni dijagramski izgled (slika 3).

Sl. 3 — Zavisnost vremena T_R od intenziteta prioriternog toka

Na dijagramu je naznačeno područje vremena prolaska raskrsnicom koje je poraslo do te mere da je po-

trebno da saobraćaj na raskrsnici reguliše ovlašćeno lice (saobraćajni milicioner ili pripadnik jedinica SbVP).

S obzirom na to da to vreme nastupa pri nekoj graničnoj vrednosti protoka u prioriternom toku, za ostale date uslove raskrsnice i dinamike kretanja vozila u njenoj zoni to može biti jedan od dominantnih kriterijuma pri odlučivanju kada i gde na putnoj mreži treba postaviti organe za regulisanje saobraćaja. Ali, treba imati u vidu da u tu graničnu vrednost protoka ulaze svi tokovi na raskrsnici koji su za datu situaciju prioriterni u odnosu na vozila iz sastava kolone.

Stohastičnost procesa kretanja kolone raskrsnicom

Prethodna analitička razmatranja mogućnosti prolaska vojne motorizovane kolone raskrsnicom zasnivala su se na determinističkom pristupu radi sagledavanja odnosa među relevantnim parametrima datog procesa. Međutim, u stvarnosti, pristizanje vozila iz sastava ostalih tokova na raskrsnicu ima karakter slučajnog procesa, pa je potrebno isti problem razmotriti i sa aspekta stohastičnosti pojave vozila iz tih tokova na raskrsnici. Polazi se od pretpostavke da se ostala vozila, osim vozila iz sastava kolone na raskrsnici, pojavljuju u proizvoljnim slučajnim trenucima, te da je njihovo kretanje međusobno nezavisno. Takvo pristizanje vozila (slobodan saobraćajni tok) može se opisivati Poasonovom raspodelom, odnosno verovatnoća pristizanja određenog broja vozila na raskrsnicu za vreme datog vremenskog intervala pokorava se Poasonovoj raspodeli.

Verovatnoća da se na raskrsnici (tj. u konfliktu sa vozilima iz kolone) pojavi n vozila iz prioriternog toka u vremenu t je:

$$P(X=n) = e^{-q_G t} (q_G t)^n / n!, \quad (19)$$

gde je:

q_G — veličina izmerene srednje vrednosti protoka prioritetnog toka, voz./s;

t — veličina vremenskog intervala u kojem se posmatra pristizanje, s.

Uoči li se kritični granični interval vremena (t_{GR}), pri kojem jedno vozilo iz kolone (prvo u nizu) može da savlada raskrsnicu, tada se na osnovu poznavanja veličine srednjeg časovnog (odnosno sekundnog) protoka u prioritetnom toku mogu izračunati pripadne verovatnoće da će za to vreme na raskrsnicu pristići n vozila iz tog toka.

Već je pomenuto da je taj granični interval (t_{GR}) jednak zbiru vremena za koje jedno vozilo (t_R) savlađuje raskrsnicu i bezbednosnog vremena (t_{be}). Dakle, verovatnoća da u tom intervalu pristigne n vozila iz prioritetnog toka je:

$$P(n=0) = e^{-q_G t_{GR}},$$

$$P(n=1) = (q_G t_{GR}) e^{-q_G t_{GR}},$$

$$P(n=2) = (1/2) (q_G t_{GR})^2 e^{-q_G t_{GR}}, \text{ itd.}$$

Verovatnoća da pristigne jedno ili više vozila je:

$$P(n>1) = 1 - (e^{-q_G t_{GR}}) \quad (20)$$

Ova verovatnoća može se nazvati verovatnoćom ometanja savlađivanja raskrsnice.

Kako je već istaknuto, pri savlađivanju raskrsnice može se desiti da više tokova bude prioritetno u odnosu na vozila iz sastava kolone. Koristeći činjenicu o nezavisnosti tokova koji se sučeljavaju na raskrsnici, tražena verovatnoća ometanja vozila iz kolone pri prolasku raskrsnicom zavisice od ukupne veličine protoka prioritetnih tokova, odnosno tražena verovatnoća se dobija kao proizvod parcijalnih verovatnoća za svaki prioritetni tok.

Prema tome, uz pretpostavku da su na četverokrakoj raskrsnici sva tri

preostala toka prioritetna u odnosu na kolonu, verovatnoća da na raskrsnicu u datom intervalu pristigne jedno ili više vozila je:

$$P(n>1) = 1 - [e^{-(q_{G1} + q_{G2} + q_{G3}) t_{GR}}] \quad (21)$$

U prethodnom obrascu oznake q_{G1} , q_{G2} i q_{G3} predstavljaju veličine izmerenih srednjih vrednosti protoka u prioritetnim tokovima.

Za određivanje veličine vremena t_{GR} (tj. vremena za koje vozilo iz kolone može da savlada raskrsnicu) polazi se od određenih analitičkih relacija (slika 4).

Prethodno je istaknuto da je vreme potrebno za savlađivanje raskrsnice (t_R):

$$t_R = (L_R/V_R) + (V_G/2a_k) + t_r \text{ (s).}$$

Put koji vozilo pređe savlađujući raskrsnicu različit je i zavisi od smera kretanja kolone na raskrsnici. Tako će, pri kretanju vozila pravo kroz raskrsnicu, to biti širina raskrsnice (B_r), a pri skretanju dužina kružnog luka po kojem skreću vozila. Ta dužina luka zavisi, nadalje, od geometrijskih parametara raskrsnice, kao i od smera skretanja (desno ili levo). Tako, prema slici 4, vremena potrebna za savlađivanje raskrsnice su:

$$t_R^P = (B_R/V_R^P) + (V_G/2a_k) + t_r \text{ (s),}$$

$$t_R^D = (R_D \pi / 2V_R^D) + (V_G/2a_k) + t_r \text{ (s),}$$

$$t_R^L = (R_L \pi / 2V_R^L) + (V_G/2a_k) + t_r \text{ (s).}$$

U prethodnim izrazima indeksi P , D i L označavaju pripadajuće poluprečnike skretanja, odnosno brzine kretanja (pravo, desno i levo).

Za ovako dobijena vremena, primenom obrasca za verovatnoću pojave n vozila iz prioritetnog toka, lako se dobiju odgovarajuće vrednosti verovatnoća.

Dopusti li se da to vreme raste do vrednosti vremena T_R (tj. vremena potrebnog da cela kolonska formacija savlada raskrsnicu), zanimljivo je proračunati verovatnoće pojave n vozila iz prioritetnog toka za takav slučaj. Ti-

me se, u stvari, saznaje u kojoj meri prioritetni tokovi ometaju prolazak kolone raskrsnicom.

Verovatnoća da se za vreme T_R na raskrsnici pojavi n vozila iz prioritetnih tokova biće:

$$P(n > M_{sr}) = 1 - \sum P(n=i)$$

pri čemu je $i=0, 1, 2, \dots$ do M_{sr} (24)

Pokazuje se da verovatnoća prema prethodnom obrascu raste do određene vrednosti zavisno od porasta vremena T_R , tj. pri istoj veličini protoka

Sl. 4 — Moguća kretanja vozila na raskrsnici

$$P(n) = e^{-q_G T_R} (q_G T_R)^n / n! \quad (22)$$

Definiše li se proizvod $q_G T_R = M_{sr}$, tj. prosečan broj vozila iz prioritetnog toka koji se može očekivati u intervalu T_R , obrazac poprima izgled:

$$P(n) = e^{-M_{sr}} M_{sr}^n / n! \quad (23)$$

S obzirom na to da je vreme koje je potrebno da cela kolonska formacija savlada raskrsnicu upravo i dobijeno na osnovu prosečno utvrđenog broja vozila koja dolaze iz prioritetnog toka (prema broju intervala sleđenja th_G), interesantno je odrediti verovatnoću da taj broj prispelih vozila iz prioritetnog toka bude veći od tog prosečnog broja vozila u intervalu T_R .

Prema tome:

u prioritetnom toku ako se povećava vreme potrebno za prolazak kolone raskrsnicom (a ono zavisi od broja vozila u koloni, odnosno od brzine savlađivanja raskrsnice), povećava se i verovatnoća da će prolazak vozila iz kolone biti ometan. Kada taj porast tražene verovatnoće dostigne određenu vrednost, na njoj se ustaljuje, nezavisno od daljeg povećanja vremena potrebnog za savlađivanje raskrsnice.

Variranje različitih vrednosti protoka prioritetnog toka, odnosno vremena koje je potrebno da vozila iz kolone savladaju raskrsnicu, daje očekivani prosečan broj vozila iz prioritetnog toka (M_{sr}), pa odgovarajuća simulacija verovatnoća da taj broj bude premašen u zadatom intervalu za M_{sr}

>3 pokazuje tendenciju grupisanja oko vrednosti 0,4 (dijagram na slici 5).

Dakle, za više od 3 prosečno očekivana vozila iz prioritetskog toka po intervalu T_R (tj. u vremenu prolaska

Sl. 5 — Zavisnost verovatnoće $P(n > M_{sr})$ od datog broja vozila M_{sr}

kolone dobijenom determinističkim proračunom — obrasci 12 i 13), verovatnoća da pristigne više vozila od tog prosečnog broja teži ka 0,4, odnosno u 40% posmatranih slučajeva može se očekivati da će biti potrebno duže vreme prolaska kolone raskrsnicom, nego što to kazuje deterministički proračun za date uslove broja vozila u koloni, odnosno veličine protoka prioritetskog toka. To je vrlo važno, zbog potrebe preduzimanja adekvatnih regulacionih mera, kao i same organizacije kolone (ešeloniranje). Naime, uočava se da je za manje dubine kolonskih formacija manji i očekivani prosečni broj vozila iz prioritetskog toka, a ako je manji od 3 manja je i verovatnoća da će ta formacija biti dodatno ometana u odnosu na već uračunato ometanje.

Ali, potrebno je istaći da je prethodna analiza, zasnovana na verovatnoći pristizanja vozila koja se pokorava Poasonovoj raspodeli, primenjiva za prioritetne tokove protoka do oko 200 vozila/čas, dok za veće intenzitete ne daje dobre rezultate.

Zaključak

Pri realizaciji transportnih zadataka kao jedan od relevantnih kriterijuma efikasnosti nameće se ukupno vreme kretanja vojne motorizovane kolone, jer je ono najuže povezano sa dinamikom ostalih namenskih zadataka, kao i sa materijalnim troškovima.

U dosadašnjoj svakodnevnoj praksi pri vojnim prevoženjima prilično se uprošćeno proračunava vreme kretanja, kao odnos ukupne dužine planirane maršrute i neke procenjene vrednosti srednje marševske brzine. Očito je da će u slučaju loše procene srednje marševske brzine (pri čemu se ne razmatraju posebno karakteristike putnih čvorova i saobraćaja na njima) doći do značajnog odstupanja u pravilnoj proceni vremena kretanja. Imajući u vidu da vreme provedeno u savlađivanju raskrsnica u urbanim sredinama, u ukupnom vremenu kretanja čini čak i do 30%, posebno je važno poznavati proces prolaska kolone raskrsnicom sa aspekta vremenskih gubitaka.

Poznavajući karakteristike kolone, te saobraćajnu sliku na delu putne mreže izabranom za potencijalnu maršrutu, organ koji planira kretanje kolone može, na osnovu kriterijuma vremena kretanja, uticati na:

- izbor maršrute,
- primenu regulacionih mera na pojedinim raskrsnicama,
- struktuiranje (ešeloniranje) kolonske formacije.

Osim toga, pri proračunu vremenskih gubitaka u zonama raskrsnica, na osnovu determinističkog pristupa, pokazano je da dobijene vrednosti treba uvećati za 40% (i to pri relativno malom saobraćajnom opterećenju mreže) da bi se realno procenilo potrebno vreme kretanja.

Literatura:

- [1] Oспенica, M.: Metodika regulisanja i kontrole putnog vojnog saobraćaja u ratu, magistarski rad, CVTŠ KoV Zagreb, 1990.
- [2] Kuzović, Lj.: Teorija saobraćajnog toka, IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1987.

- [3] Jovanović, G.: Analiza izgubljenog vremena kod zastoja vozila u saobraćajnom toku, Tehnika-Saobraćaj, br. 9, Beograd, 1977.