

EISMO SRAUTŲ OPTIMIZAVIMAS TAIKANT MAKROSKOPINĮ MODELIAVIMĄ

J. Ilgakojtė, Ž. Bazaras

Kauno technologijos universitetas

1. Įvadas

Automobilių eismo srautai Lietuvos miestuose nuolat didėja dėl bendro transporto priemonių skaičiaus augimo ir nuolatinio jų poreikio. Lietuvos automobilių kelių direkcijos duomenimis, lengvųjų automobilių skaičius Lietuvoje nuo 1991 m. padidėjo 57%. Didžiausias Lietuvoje įregistruotų transporto priemonių skaičius yra Vilniuje (20,9%) ir Kaune (13,7%). Kylant ekonomikos lygiui ir keičiantis gyventojų socialinei padėčiai didėja mobilumo poreikis, taigi didėja miesto transporto srautai, susidaro kamščiai, nes gatvių tinklo laidumas praktiškai nesikeičia. Rezultatas – varginantys autotransporto kamščiai, ilgėjantis kelionės laikas, didėjančios išlaidos kurui bei miesto oro užterštumas.

Kauno miesto centras patenka į pavojingo užterštumo dulkėmis ir azoto dioksidu zoną, o pagrindinis teršėjas šiomis medžiagomis – automobilių transportas [1]. Į miesto centrą judantys automobilių srautai visada yra didžiausi, dėl to čia dažni autotransporto kamščiai, vis labiau teršiamas oras. Todėl būtina prognozuoti ir vertinti eismo srautus, jų tankį pagrindinėmis gatvėmis ar jų segmentais, kad kuo greičiau būtų galima eliminuoti jau susidariusius automobilių kamščius bei minimizuoti kenksmingas jų pasekmes. Miesto centras turi griežtai ribotą gatvių tinklą, ir net minimalus jų geometrinių parametrų keitimas dažnai yra neįmanomas. Straipsnyje sprendžiamas uždavinys – kaip tolygiai paskirstyti transporto srautus miesto gatvėmis.

2. Eismo srautų modelio sudarymas

Miesto gatvių tinklas – tai griežtai apibrėžta, ne-kintanti (arba tik nežymiai kintanti) gatvių sistema, joje telpa ribotas transporto priemonių skaičius. Transporto priemonių judėjimas yra reglamentuotas kelių eismo taisyklėmis.

Sprendžiant eismo srautų optimizavimo uždavinį miesto transporto tinkle geometriniai parametrai yra viena pagrindinių charakteristikų.

Tarkime, jog transporto tinklas – orientuotasis, svorinis grafas. Kiekvienos jo briaunos svorį (laidumo galią) sudaro gatvės segmento (nuo sankryžos iki sankryžos) transporto priemonių talpos, vienos krypties juostų skaičiaus funkcija [2].

Automobilių eismas gali būti nagrinėjamas taikant mikroskopinį arba makroskopinį modeliavimą. Mikroskopinis modeliavimas, susijęs su kiekvienu automobiliu, jo individualiomis savybėmis, leidžia prognozuoti galimą vairuotojo elgesį. Makroskopinis modeliavimas nagrinėja eismo srautus, išreiškiant tarpusavyje susijusias eismo srauto charakteristikas – tankį ir vidutinį srauto greitį. Šis modeliavimo metodas taikomas, nagrinėjant eismo srautus visame tinkle, įtraukiant prognozavimo komponentę. Makroskopinio modeliavimo rezultatai leidžia analizuoti ir numatyti galimus automobilių eismo kamščius gatvėse, įvertinant tankio didėjimo charakteristiką, galima prognozuoti automobilių teršalų emisijos įtaką aplinkai [3].

2.1. Matematinis gatvės segmento modelis

Matematinis modelis sudaromas gatvės segmentui, ir analizuojama tankio priklausomybė nuo greičio bei įeinančio srauto. Remiantis fundamentine greičio nuo tankio priklausomybe daroma prielaida, jog greitis susijęs su žinoma tankio funkcija $\rho(f(\rho))$, tuomet automobilių sulaikymas aprašomas netiesine lygtimi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho f(\rho)) = 0, \quad (1)$$

čia ρ – eismo tankis (automobilių skaičius kilometre).

Patekęs į srautą kiekvienas automobilis pradžioje juda skirtingu greičiu. Todėl srauto tankis greitai kinta ir vairuotojams per trumpą laiką tenka prisitaikyti prie bendro vidutinio greičio.

Nagrinėjamame gatvės segmente visada atsiranda „šuoelis“ eismo srautų charakteristikose dėl šviesoforo signalo, avarijos ar kito eismo įvykio, kai automobilių greitis sumažėja. Tai vadinamoji „šoko banga“, kuri

yra tankio funkcijos netiesiškumo priežastis. Vėliau šis netiesiškumas artėja prie tiesinio. Eismą apibrėžiančių kintamų parametrų reikšmės tuoj pat žymiai pasikeičia. Gaunama lygtis, aprašanti šį pasikeitimą:

$$\frac{dx_s}{dt} = \frac{\rho_2 f(\rho_2) - \rho_1 f(\rho_1)}{\rho_2 - \rho_1} \quad (2)$$

Toliau daroma prielaida, kad eismas susideda iš dviejų tolydžių eismo tankio funkcijų ρ_1 ir ρ_2 , atskirtų „šoko banga“. Laikantis pradinųjų sąlygų ir atlikus matematinius pertvarkymus, lygtis ištiesinama. Galutinė lygtis, kuria aprašomas tolydus eismo srautas, yra:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + c \frac{\partial \rho_1}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

čia $c = \left(\frac{dq}{d\rho} \right) (\rho_0)$ ir $|\epsilon \rho_1| \ll \rho_0$, $\epsilon \rho_1(x, t) -$

„sutrikdytas“ eismo tankis (arba poslinkis nuo pastovaus tankio ρ_0) [4, 5].

Tankio funkcija paprastai yra statistinė funkcija, išreiškianti automobilių skaičių ilgio vienetu (kilometre), o analizuojant skaičiavimuose ji yra tikimybinė.

Automobilių eismo tankio balanso lygtis:

$$\rho_{s,t+1} = \rho_{s,t} - k_s \cdot (q_{s,t} - q_{s-1,t}) \quad (4)$$

t – diskretusis laikas; s – transporto srauto matavimo koordinatė; q – automobilių srautas (automobilių skaičius per minutę); ρ – tankis, kuris laiko momentu $t+1$ arba padidėja, arba sumažėja automobilių skaičiumi per laiko vienetą, o

$$k_s = \frac{\Delta t}{Ln},$$

čia Δt – laiko intervalas (modeliavimo procese pasirinkome 10 s, realiuose skaičiavimuose – tai kintantis dydis, kuris priklauso nuo išiliejančio srauto matavimo rezultatų); L – išiliejančio srauto gatvės ilgis; n – išiliejančio srauto gatvės segmento juostų skaičius. Eismo srautas yra automobilių eismo tankio ir greičio vidurkio sandauga. Sudarant modelį šią sandaugą būtina pakeisti automobilių eismo srauto lygtimi, kuri nusako automobilių eismo srautą $t+1$ laiko momentu. Automobiliai, patenkantys į analizuojamą sritį, turi įtakos atsitiktiniams srauto pokyčiams.

2.2. Tinklo modelio sudarymas

Sudarant tinklo modelį laikoma, kad transporto tinklas yra orientuotasis aciklinis grafas $G(X, A, c)$ kur X – viršūnių (tinklo mazgų) aibė $\{x_k\}_{k=1}^n$; A – briaunų aibė $\{a_j = (x_{s(j)}, x_{t(j)})\}_{j=1}^m$ ir nustatytų briaunų

laidumo galių aibė $\{c_{ij}\}_{i,j=1}^m$. Tuo tikslu sudaromos miesto transporto tinklo gretimumo, mazgų koordinatinių bei svorių matricos. Iš grafų teorijos žinoma, kad nagrinėjamas srautas negali viršyti nustatytos laidumo galios. Tai reikštų automobilių kamštį atitinkamame gatvės segmente. Normalioms eismo sąlygoms palaikyti srauto tvermės dėsnio sąlyga:

$$q_{ij} \leq c_{ij}. \quad (6)$$

Priklausomai nuo suformuluoto tikslo optimizuojant automobilių eismą miesto transporto tinkle pasirinkamas algoritmas. Sprendžiant miesto gatvių apkrovimo sumažinimo uždavinį, taikomas trumpiausio kelio algoritmas (Dijkstros, Fordo, trumpiausio kelio medyje, indeksų nustatymo ir koregavimo algoritmai). Bendroju atveju tokie uždaviniai suvedami į tiesinio programavimo uždavinį, kurio tikslas – minimizuoti maršruto „kainą“:

$$\min_a \sum_{(i,j) \in X} c_{ij} a_{ij}, \quad (7)$$

čia a_{ij} trumpiausią kelių skaičius maršrutu

$$\mu_{ij} \in \{x_k\}_{k=1}^n.$$

Naudojant maksimalaus srauto radimo algoritmą, nustatomas maršrutas didžiausią laidumo galią turinčiomis gatvėmis:

$$\Phi_{piln} = \sum_{k=1} \Phi_k = \sum_{k=1} \min\{c_i\}_{a_i \in \mu_k},$$

$$\Phi_{\max} = \Phi_{piln} + \Delta\Phi, \quad (8)$$

čia Φ_{\max} , Φ_{piln} , $\Delta\Phi$ – maksimalus, pilnutinis srautas ir atitinkama srauto korekcija; μ – maršrutas [6].

3. Rezultatai

Sudarytam modeliui patikrinti buvo generuojamas automobilių srautas. „Tuščioje“ sistemoje automobiliai generuojami pradiniame tinklo atskaitos taške, dažniausiai periferiniame tinklo taške, įvertinant to gatvės segmento apibrėžtą talpą. Automobilių srauto h eksponentinis pasiskirstymas nustatomas pagal tokią išraišką:

$$h = (H - h_{\min}) [1 - \ln(1 - R)] + H - h_{\min}, \quad (9)$$

čia H – vidutinis srautas, kuris priklauso nuo gatvės segmento talpos; h_{\min} – nustatytas minimalus automobilių srautas; R – atsitiktinis skaičius, gaunamas iš atsitiktinių skaičių generatoriaus intervalu 0÷1 [7].

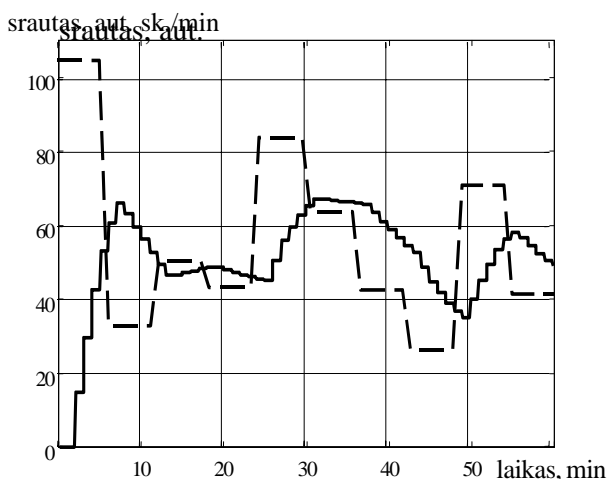
Svarbus modelio funkcionavimo kriterijus yra kritinio tankio reikšmės bei greičio, kuris priklauso nuo tankio, susidariusio gatvės segmente, priklausomybė. Kritinis tankis – tai kiekvieno gatvės segmento ribinė talpa, kurią viršijus jame susidaro transporto kamščiai. Naudojama fundamentalioji eismo diagrama – sudėtinė funkcija, susidedanti iš eksponentinės ir tiesinių dalių. Kritiniai taškai, t. y. perėjimo iš vienos funkcijos dalies į kitą taškai priklauso nuo nagrinėjamo gatvės segmento talpumo (fiksotos transporto tinklo grafo atitinkamos briaunos svorio reikšmės).

Laikantis aptartų sąlygų ir taikant anksčiau minėtas lygtis, sudarytas automobilių eismo srautų ir kitų charakteristikų analizės modelis naudojant *MatLab* programinę įrangą ir įrankį *Simulink* [8]. Modelis gaunamas, lygtis suskaidant į minimalius lygčių elementus (blokus): didėjimo, laiko uždelimo, sumos, sandaugos, minimumo ir maksimumo elementai bei specialiai sukurti paprogramiai.

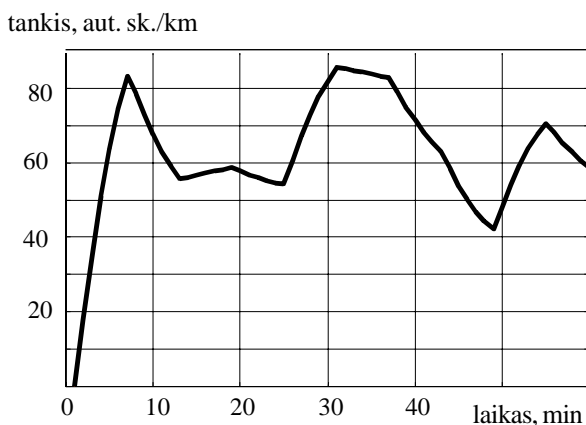
Įeinantis eismo srautas buvo generuojamas pagal formulę (9) ir patikrintas. Jis adekvatus realiam, kurio tankis neviršija kritinio. Srauto greitis, laikantis minėtų sąlygų, imamas visam srautui neįvertinant galimo greičių skirtumo, kuris pagal makroskopinio modeliavimo principus būtų labai trumpas laiko tarpas ir skirtųsi nežymiai. Kaip matyti iš šiamo straipsnyje pateiktų modeliavimo rezultatų, buvo pasirinktas 60 km/h maksimalus leistinas greitis mieste ir numatytos galimų greičių ribos. Buvo tikrintas įeinančio srauto galimų greičių spektras, kai kritinis tankis nesudaro. Nustatyta, jog įeinančio greičio didinimas nereguliuoja eismo srautų ir tankio, nes išeinančio automobilių srauto sklaida yra apribota gatvės segmento talpos, pasirinktų galimų išeinančio srauto maksimalių parametrų ir priverstinių stabdymų dėl „šoko“ bangų susidarymo, t. y. šviesoforo signalo pasikeitimo, pėsčiųjų perėjos ar kito veiksnio, turinčio įtakos eismui. Automobilių eismo įeinantys ir išeinantys srautai pateikti 1 pav.

Į gatvės segmentą įeinantis eismo srautas nėra tolydus dėl „šoko bangų“, tačiau jų reikšmės patenka į „neperpildyto“ srauto ribas, dėl to išeinančio srauto charakteristika atkartoja įeinantį, tik jo kreivė yra be staigių kilimų ir kritimų. Toks srautas atitinka normalaus automobilių eismo miesto gatvės segmente režimą ir jam nereikia jokių koreguojančių veiksnių.

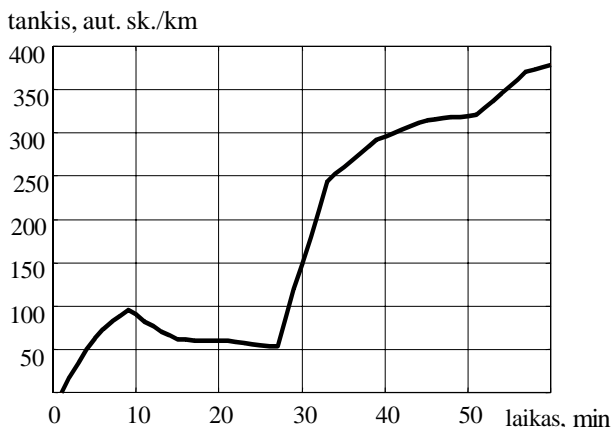
Tankis – svarbi eismo charakteristika – pateiktas 2 pav. Jis neišeina iš nustatyto normalaus tankio ribų. Turint tokias charakteristikas, kol kreivė nepradedą nevaldomai kilti aukštyr nuo kritinio tankio ribos (nagri-



1 pav. Srautų kitimas (brūkšninė linija – įeinantis, generuojamas srautas, išišinė linija – išeinantis srautas)
Fig 1. Changes of flow (dashed line – entering, generated flow, solid line – outgoing flow)



2 pav. Eismo srauto tankis gatvės segmente, kai tankis neviršija kritinio
Fig 2. Density of traffic in the street segment if the critical density is not exceeded



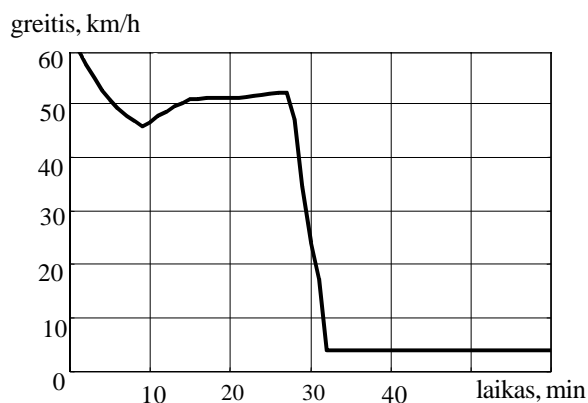
3 pav. Eismo srauto tankio charakteristika, kai tankis viršija kritinį
Fig 3. Characteristic of density if the critical density is exceeded

nėjamame segmente ši riba yra 193 aut. sk/km) (3 pav.), eismo sąlygos yra normalios. Tankiui pasiekus kritinį (28-ą modeliavimo minutę), gatvės segmente pradeda susidaryti automobilių kamščiai, srautas minimizuoja, greitis staigiai krinta (4 pav.) ir automobilių srautas juda minimaliu greičiu, kol visai sustoja. Esant tokiai situacijai reikia papildomų priemonių eismo situacijai normalizuoti.

Gautas eismo srautas ir greitis pasirinkto pradinio transporto tinklo gatvės segmento mazge yra kito segmento įėjimo duomenys. Tai rekursinis procesas tinkle ar jo dalyje. Taip gali būti prognozuojama eismo situacija bet kuriame transporto tinklo mazge. Situaciją tinkle galima analizuoti lygiagrečiai ir nuosekliai. Nuosekliai nagrinėjama konkretaus srauto dalis visuose tinklo mazguose. Lygiagrečiai – eismo situacija stebima visuose tinklo mazguose vienu metu. Modeliavimo procese svarbi nuosekli eismo srauto analizė, tuo tarpu realiu laiku gauti duomenys pateikiami lygiagrečiai.

Sudarytas modelis gerai veikia ir taikant turimus statistinius duomenis. Statistinio automobilių eismo modelio taikymo galimybės yra labai didelės. Viena iš jų – transporto srautų tyrinėjimas, analizavimas registruojant statistinius duomenis ir prognozuojant eismo situaciją, apie kurią operatyviai būtų informuojami vairuotojai. Iš gautų automobilių transporto srautų charakteristikų kreivių galima spręsti apie automobilių eismo kamščių didumą, jų išsisklaidymų laiką tinkle.

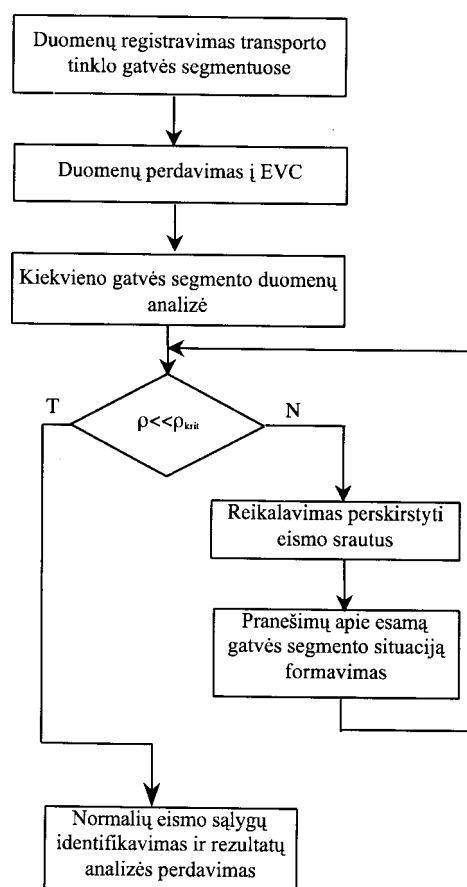
Eismo srautams registruoti ir valdyti reikia instaliuoto koordinuoto šviesoforų valdymo su integruotu eismo kontrolės duomenų (intensyvumas, greitis ir kt.) rinkimu ir perdavimu į eismo valdymo centrą (EVC). Vienas iš pagrindinių automobilių eismo srautų modelio mieste pritaikymo tikslų yra kelių eismo sistemos kontrolės gerinimas. Eismo kontrolės sistemos leidžia pa-



4 pav. Eismo srauto greičio kitimas, kai viršytas kritinis tankis
Fig 4. Changes of velocity if the critical density is exceeded

laikyti transporto tinklo stabilumą ir greitai reaguoja į eismo tankio pokyčius (5 pav.). Keliuose įdiegti eismo valdymo ir kontrolės sistemos elementai leistų eismo tankiui artėjant prie kritinio perskirstyti srautus (nukreipti į laisvesnę gatvės juostą ar kitą gatvę ir pan.).

Tiksliai sudaryta pagal makroskopinį modelį veikianti eismo kontrolės ir valdymo sistema padėtų išvengti automobilių eismo kamščių, mažinti eismo teršalų emisijos neigiamą poveikį didžiausiuose Lietuvos miestuose.



5 pav. Eismo kontrolės sistemos schema
Fig 5. Scheme of traffic management system

4. Išvados

1. Didėjant automobilių skaičiui ir didėjant mobilumo poreikiui Lietuvos miestų gatvėse susidaro automobilių kamščiai, dėl kurių didėja oro užterštumas azoto dioksidu ir dulkėmis, ilgėja kelionės trukmė, didėja išlaidos kurui ir kt. Sprendžiant šias problemas būtinas miesto transporto srautų optimizavimas.

2. Pasiūlytas transporto srautų optimizavimo modelis, naudojant sukurtą kompiuterinę programą leidžia efektyviai analizuoti eismo situaciją ir ją prog-

nozuoti. Gatvės segmente padidėjus automobilių tankiui iki 190 aut. sk./km, tankio kreivė pradeda staiga kilti, o tai rodo, kad susidarė kamštis (3 pav.).

3. Sukurta kompiuterinė programa leistų efektyviai ir nebrangiai ją panaudoti eismo valdymo sistemoje, optimizuojant ir pertvarkant eismo srautus reliatyviai nedideliuose miestuose.

Literatūra

1. J. Kameneckas. Padidinto užterštumo zonų ir Kauno miesto gyventojų jose įvertinimas // Kauno miesto ekologinis monitoringas'99, 2000, Kaunas, p. 16–27.
2. Y. Li, A. K. Ziliaskopoulos, S. T. Waller. Linear Programming Formulation for System Optimum Traffic Assignment with Arrival Time-Based and Departure Time-Based Demands // Transportation Research Record 1667, 1999, p. 52–59.
3. J. C. Williams. Traffic flow theory. 6. Macroscopic Flow Models // Update and Expansion of Transportation Research Special Report 165, 1997, p. 1–20.
4. R. Haberman. Mathematical models. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1977. 395 p.
5. J. Ilgakojtė, Ž. Bazaras. Modelling of environment dangerous situations of transport in Lithuanian cities // Maszyno dzwigowo-transportowe, 2001, N. 1, p. 33–38.
6. N. Christofides. Graph theory. An algorithmic approach. London: Academic Press Inc, 1977. 430 p.
7. E. Lieberman, A. K. Rathi. Traffic flow theory. 10. Traffic simulation // Update and Expansion of Transportation Research Special Report 165, 1997, p. 9–10.
8. A. Biran, M. Breiner. MATLAB5 for engineers. Harlow: Addison Wesley Longman, 1999. p. 672 p.

Įteikta 2001 06 05

OPTIMIZATION OF TRAFFIC FLOWS APPLYING MACROSCOPIC MODELLING

J. Ilgakojtė, Ž. Bazaras

Summary

Traffic flows rapidly grow in the cities of Lithuania within ten last years. Outcomes of such continuing situation are air

pollution, congestion, restricted mobility, increasing fuel expenses, etc. The problem is to forecast and evaluate traffic flows, eliminate congestion and minimise their effect.

Microscopic analysis runs into difficulties when applied to a street network. Macroscopic modelling allows analysis of traffic in the whole transport network.

Mathematical model was made for the street segments applying traffic flow theory and macroscopic flow models. The presented results (outgoing flow, density and velocity) show the possibility to predict and forecast congestion in a street segment and behaviour of traffic in congested and non-congested stages. Transport network is an oriented, weighted graph in which flows must satisfy condition of flow balance law in order to ensure non-congested traffic.

Traffic management system using statistical data analyses and evaluates situations and presents the results how to redistribute traffic flows.

JURGAILGAKOJYTĖ

Master of Science, doctoral student, Department of Transport Engineering, Kaunas University of Technology (KTU), Kęstučio g. 27, LT-3004 Kaunas, Lithuania. E-mail: jurgailg@takas.lt

Master of Science (information technologies) (LUA), 1998. First degree in Informatics (KTU), 1995. Publications: author of 11 scientific papers. Research interests: information technologies, transport systems and environment.

ŽILVINAS BAZARAS

Doctor, Associate Professor, Department of Transport Engineering, Kaunas University of Technology (KTU), Kęstučio g. 27, LT-3004 Kaunas, Lithuania. E-mail: zilba@mf.ktu.lt

Doctor of Science (mechanics) Kaunas Polytechnic Institute (KPI), 1984. First degree in Electrical Engineering, (KPI), 1969. Publications: author of 1 monograph, 5 books and 102 scientific papers, 8 investigations, 1 patent registered in Russia. Research interests: railway rolling-stock constructions, dynamics of transport means, traction theory, low-cycle fatigue of construction materials and elements, transport control systems.