

doi: 10.33249/2663-2144-2019-85-12-60-66

UDC 629.341

**BACKGROUND OF COLLECTIVE MOVEMENT
SYNCHRONIZATION MOTOR TRANSPORT FLOWS
SERPENTINE SITES (IN HAIRPINS) CAR ROADS****B. Sheludchenko, S. Kukharets, V. Biletskiy, O. Pluzhnikov***e-mail: sheludchenkobogdan@ukr.net*Zhytomyr National Agroecological University
7, Staryi Blvd, Zhytomyr, 10008, Ukraine

Synchronization of the collective movement of vehicles in the composition of flows in special sections of motor vehicles is one of the most pressing problems in the context of increasing intensity of motor traffic. The aim of the study is to increase the levels of safety of transport and technological processes on sections of serpentine (studs) of the road network by synchronizing the collective movement of vehicles in traffic. According to the stated goal the following tasks are defined: to develop a topological form of auxiliary curves of the highway route on the sections of serpentines of the 1st and 2nd kind; determine the topological dimensions of the minimum permissible distance of the contour of the obverse side of the shrubbery gas-dust-protective forest belt to the axis of the carriageway on the serpentine sections.

The researches were carried out on the basis of methods of analytical geometry on a plane and taking into account the topological features of algebraic functions, which described the trajectories of the gradients of the movement of flows of "wide moving clusters" of vehicles. It was established a priori that, according to the theory of the three phases of motor traffic, proposed by B. Kerner, the desynchronization of the collective movement of vehicles in the composition of traffic flows at sections with special traffic conditions leads to a violation of the coherence of these flows. The synchronized traffic flow is transformed into a "wide moving vehicle cluster". Such desynchronization not only breaks the stability of the modes of transport and technological process, but also causes a decrease in the levels of traffic safety and intensification of the emission of aerosols of gas-dust emissions produced by the flows of vehicles. According to the results of researches, topological parameters and a two-dimensional graphical model of a possible variant of transport and technological optimization of the road network in "studs" of serpentines were developed. The design distance of the contour of the obverse side of the wood-bush gas-dust lane to the axis of the carriageway is determined depending on the angle of turn of the highway. Accordingly, the proposed optimization of the design parameters of the road network in the "studs" of serpentines provides for the possibility of synchronization of collective traffic of vehicles in the composition of traffic flows, which provides stabilization of the implementation of transport and technological operations and, as a consequence, increases the overall level of safety of the motor complex. Further research should be aimed at ensuring the safe transport and technological modes of operation of the motor transport complex in the conditions of growth of the share of autonomous robotic unmanned vehicles in the composition of motor transport flows.

Key words: motor traffic, "studs" of serpentines of highways, synchronization, special traffic conditions, trajectory, topology.

**ПЕРЕДУМОВИ СИНХРОНІЗАЦІЇ КОЛЕКТИВНОГО РУХУ
АВТОТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА ДІЛЯНКАХ СЕРПАНТИНУ
(У ШПИЛЬКАХ) АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ****Б. А. Шелудченко, С. М. Кухарець,****В. Р. Білецький, О. Б. Плужніков***e-mail: sheludchenkobogdan@ukr.net*Житомирський національний агроекологічний університет
бульвар Старий, 7, м. Житомир, 10008, Україна

Синхронізація колективного руху автотранспортних засобів у складі потоків на спеціальних ділянках автомобільних доріг є однією з найактуальніших проблем в умовах зростаючої інтенсивності

автотранспортних потоків. Метою дослідження є підвищення рівнів безпеки транспортно-технологічних процесів на ділянках серпантину (шпильках) автодорожньої мережі шляхом синхронізації колективного руху автотранспортних засобів у трафіку. Відповідно до поставленої мети визначено такі завдання: розробити топологічну форму допоміжних кривих траси автомобільної дороги на ділянках серпантинів I-ого та II-ого родів; визначити топологічні розміри мінімально допустимої відстані контуру аверсного боку деревно-чагарникової газо-пилозахисної лісосмуги до осі проїжджої частини автомобільної дороги на ділянках серпантинів.

Дослідження проводилися на підставі методів аналітичної геометрії на площині та з урахуванням топологічних особливостей алгебраїчних функцій, якими описувалися траєкторії градієнтів руху потоків “широких рухомих кластерів” автотранспортних засобів. Априорі встановлено, що відповідно до теорії трьох фаз автотранспортних потоків, яку запропоновано Б. Кернером, розсинхронізація колективного руху автотранспортних засобів у складі транспортних потоків на ділянках з особливими умовами руху призводить до порушення когерентності цих потоків. Синхронізований автотранспортний потік перетворюється на “широкий рухомий кластер автомобілів”. Така розсинхронізація призводить не лише до порушення стабільності режимів транспортно-технологічного процесу, але і зумовлює зниження рівнів безпеки руху та інтенсифікацію емісії аерозолів газо-пилових викидів, які продукуються потоками автотранспортних засобів. За результатами досліджень розроблено топологічні параметри та двовірну графічну модель можливого варіанту транспортно-технологічної оптимізації автодорожньої мережі у “шпильках” серпантинів. Визначено конструкційну відстань контуру аверсного боку деревно-чагарникової газо-пилозахисної смуги до осі проїжджої частини автомобільної дороги залежно від кута повороту автодороги. Відповідно, запропонована оптимізація конструкційних параметрів автодорожньої мережі у “шпильках” серпантинів передбачає можливість синхронізації колективного руху автотранспортних засобів у складі транспортних потоків, що забезпечує стабілізацію виконання транспортно-технологічних операцій і, як наслідок, підвищує загальний рівень безпеки автотранспортного комплексу. Подальші дослідження мають бути спрямовані на забезпечення безпечних транспортно-технологічних режимів функціонування автотранспортного комплексу в умовах зростання частки автономних роботизованих безпілотних автотранспортних засобів у складі автотранспортних потоків.

Ключові слова: автотранспортний потік, “шпильки” серпантинів автомобільних доріг, синхронізація, особливі умови руху, траєкторія, топологія.

Вступ

До специфічних ділянок автомобільних доріг з особливими умовами руху мають бути віднесені всі ділянки, на яких відбувається розсинхронізація колективного руху автотранспортних засобів у складі транспортних потоків. Це, в першу чергу, вузли автотранспортної мережі, де відбувається перехрещення декількох автотранспортних потоків та різного роду “серпантини” і звивисті ділянки автодоріг, зумовлені фрактальними (Babkov, 1980; Mandelbrot, 1983; Zhang & Ioannou, 2018) особливостями мезорельєфу, що визначає рух автотранспортних потоків у так званих “шпильках”, а також, певною мірою, лісові ділянки автомобільних доріг, де обмежено візуальне сприйняття дорожніх умов. Розсинхронізація колективного руху

автотранспортних засобів у складі потоків на таких ділянках автомобільних доріг призводить не лише до порушення усталеної роботи двигунів, що збільшує обсяги викидів відпрацьованих газів, але і до інтенсифікації процесів руйнування конструкційних матеріалів автомобільних доріг, що зумовлює підвищення рівнів пилового забруднення придорожніх ландшафтів природно-техногенної геоекосистеми (ПТГЕС) з розвинутою автотранспортною мережею (Babkov, 1980; Sheludchenko, 2018).

В загальному розумінні автотранспортним потоком є, впорядкований автодорожньою мережею, рух автотранспортних засобів, який характеризується зокрема такими ознаками, як інтенсивність [1/с], швидкість [м/с], щільність [1/м], а також специфічними параметрами, які визначають особливі характеристики потоків автотранспортних засобів, їх взаємний вплив і

перерозподіл у просторі і часі (Lukanin & Trofimenko, 2001; Sheludchenko, 2018; Skydan et al., 2019).

Однак, з точки зору формалізації наведеного вище означення, автотранспортним потоком можна вважати лише таку множину автотранспортних засобів, яка функціонально за певним визначенням значущим аргументом (аргументами) є безперервною функцією за деякою траєкторією, яку окреслено трасою автомобільної дороги. В загальному випадку безперервність функції $f(x)$ визначається такими трьома умовами (Mariotte & Leclercq, 2019; Sheludchenko, 2018, Skydan et al., 2019):

- функція $f(x)$ має бути обов'язково визначена в точці x_0 ;
- існує границя $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$;
- $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = f(x_0)$.

Якщо хоча б одна умова, з трьох вищенаведених умов безперервності функції, порушується у будь-якій точці, то функція $f(x)$ має в даній точці розрив. При цьому, розрив функції $f(x)$ може бути як усувним (завдяки операції довизначення функції до безперервної), так і неусувним розривом, зокрема так звана точка

розриву “стрибок”, яка виникає для $f(x)$ у випадку, якщо $\lim_{x \rightarrow (a-0)} f(x) \neq \lim_{x \rightarrow (a+0)} f(x)$. Отже, з

точки зору аналізу інтенсивності впливу автотранспортних потоків на рівновагу природно-техногенної геоекосистеми, нижньою границею, яка визначає колективний рух автотранспортних засобів як автотранспортного потоку, є деяка площина в координатній системі $q \sim \rho \sim f(q, \rho)$, яка визначає мінімальні значення q та ρ , за яких функція $f(q, \rho)$ набуває ознак безперервності (Mohebifard & Hajbabaie, 2019).

Якщо розглядати фрагмент автотранспортного потоку як спрямовану сукупність (множину) автотранспортних засобів на автодорозі (за віссю $x-x$), підмножини (C_1 і C_2) яких рухаються у протилежних напрямках (рис. 1), і вважати, що внесок підмножин C_1 і C_2 дорівнює кількості частки їх по довжині, які припадають на ділянку A_x-B_x автомобільної дороги, то, позначивши цю кількість через $R(t, x_{A-B})$, $R(t, x_{B-A})$, отримаємо функцію, яка є безперервною гладкою по t , а отже має кусково-безперервні похідні першого і другого порядків (Sheludchenko, 2018; Skydan et al., 2019).

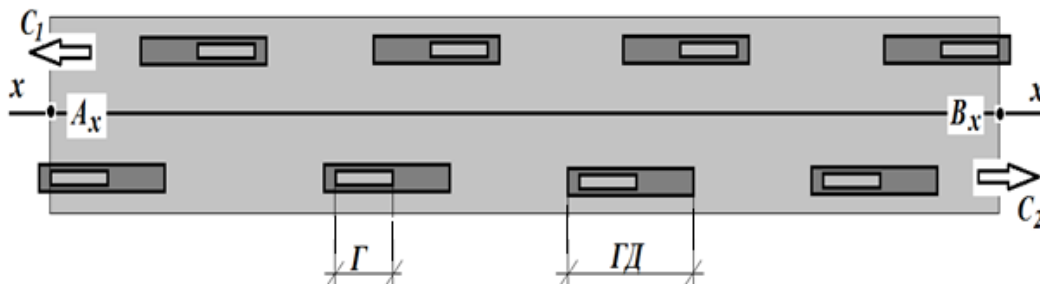


Рис. 1. Фрагмент автотранспортного потоку, підмножини (C_1 і C_2) якого рухаються вздовж $x-x$
 Γ – габарит транспортного засобу; $\GammaД$ – динамічний габарит транспортного засобу

Якщо швидкість V автотранспортного потоку є відомою функцією його щільності ρ , отримуємо функцією стану автотранспортного потоку у вигляді (Mariotte, 2019; Sheludchenko, 2018; Skydan et al., 2019):

$$\frac{\partial R}{\partial t}(t, x) = \frac{\partial R}{\partial t}(t, x) \cdot f[\rho(t, x)] \quad (1)$$

Відповідно (1), необхідно розрізнити три основних режими руху автотранспортних засобів (Sheludchenko, 2018):

– *вільний рух* – характеризується малими інтенсивностями, відсутністю взаємних перешкод між окремими автотранспортними засобами і відповідною швидкістю V_c . Незначна щільність автотранспортних засобів зумовлює нещільну кореляцію між V_c та ρ ;

– *колективний рух (колективний потік)* – визначається зростанням щільності ρ автотранспортного потоку, колективна швидкість V_k автотранспортних засобів визначається проектною пропускнуною здатністю автодороги.

Кореляційний зв'язок V_c та ρ є достатньо щільним;

– *насичений (синхронізований) потік* – характеризується суттєвим взаємовпливом окремих автотранспортних засобів, швидкість автотранспортного потоку V_n тісно корелює з інтенсивністю q та щільністю ρ . Характерною рисою синхронізованого автотранспортного потоку є суттєве варіювання значення середньої швидкості потоку. Визначального значення набувають технічний та експлуатаційний стани автомобільної дороги.

Дещо відмінною, від вищевикладеної “класичної” функціональної формалізації сукупності (множини) автотранспортних засобів, є теорія трьох фаз Б. Кернера (*Mandelbrot*, 1983; *Zhang & Ioannou*, 2018). Ця теорія заснована на спробі пояснення фізики переходу від “вільного” до “ущільненого” (насиченого) автотранспортних потоків та описанні просторово-часових структур автотранспортних засобів, які виникають в результаті цього переходу на швидкісних ділянках автомагістралей. Відповідно до теорії Б. Кернера, в “ущільненому” автотранспортному потоці необхідно виокремлювати дві фази – синхронізований потік та “широкий рухомий кластер множини автотранспортних засобів” (локальний рухомий затор). Відповідно, розглядається три фази автотранспортного потоку: “вільний потік”, “синхронізований потік”, “широкий рухомий кластер множини автотранспортних засобів”. При цьому, фаза визначається як деякий стан автотранспортного потоку, що розглядається у просторі та часі.

При цьому, жодна з наведених вище функціональних формалізацій не передбачає можливість синхронізації колективного руху трафіку автотранспортних засобів на спеціальних ділянках автомобільних доріг, в тому числі і на ділянках серпантину (у шпильках).

Метою є підвищення рівнів безпеки транспортно-технологічних процесів на ділянках серпантину (шпильках) автодорожньої мережі шляхом синхронізації колективного руху автотранспортних засобів у трафіку.

Матеріали та методи

Дослідження виконані на підставі методів аналітичної геометрії на площині з урахуванням топологічних особливостей алгебраїчних

функцій, якими описувалися траєкторії градієнтів руху потоків автотранспортних засобів на ділянках серпантинів певного афінного простору.

Якщо афінний n -мірний простір A_n над векторним простором V_n визначити множиною A_n кожній парі елементів якого P_1, P_2 відповідає вектор з V_n , який є вектором $\overline{P_1P_2} = x$, то сам вектор $\overline{P_1P_2}$ є вектором переносу з точки P_1 в точку P_2 . Отже, розмірність підпростору V_n , визначена вектором $\overline{P_1P_2}$, за умови $P \in L$, буде розмірністю площини L , яка визначає гіперплощину з розмірністю $(n - 1)$. Таким чином, аналітична геометрія на площині і у просторі відносно системи координат двомірного або тримірного афінного простору (відносно прямокутної паралельної системи координат) у топологічному плані практично відрізняється досить мало. Саме вищезазначене дозволяє виконувати на площині розроблення графічних топологічних моделей ландшафтної оптимізації трасування автомобільних доріг у “шпильках” серпантинів.

Результати досліджень та обговорення

Загалом ділянки серпантину застосовують при трасуванні автомобільних доріг в умовах складного рельєфу природно-техногенних геоекосистем для дотримання оптимальних ухилів поздовжнього профілю автодороги. Розрізняють два види серпантинів:

– *серпантини I роду*, у яких допоміжні криві траси автомобільної дороги розташовано опуклостями в різні боки. Такі серпантини можуть бути як симетричними, так і асиметричними;

– *серпантини II роду*, у яких допоміжні криві розташовані по один бік траси автомобільної дороги. Такі серпантини можуть бути повними, коли центр основної кривої зміщений відносно вершини кута повороту і напівсерпантинами, для яких центр основної кривої розташовано на лінії, яка є перпендикулярною до однієї з сторін кута повороту автомобільної траси.

Як приклад поєднання серпантинів I-ого і II-ого родів, може бути наведено ділянку автомобільної дороги Н-03 “Житомир – Чернівці” поблизу населеного пункту с. Гуменці (рис. 2).



Рис. 2. Ділянка серпантину на автомобільній дорозі Н-03 (drive2.com)

Ділянки автомобільних доріг з серпантином обох типів з достатньою точністю аналітично описуються раціональними функціями n -ого ступеня (рис. 2):

$$y = a_n \cdot x^n + a_{n-1} \cdot x^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x + a_0, \quad a_n \neq 0, \quad (2)$$

де $n \geq 0$ – ціле.

Графіки функцій (2) – це криві без особливих точок та без асимптот, які мають не більше за n точок перехрещення з віссю x , не більше як $n - 1$ екстремумів та не більше як $n - 2$ точок перегину (рис. 3). При цьому, у випадку декількох екстремумів максимуми та мінімуми є почерговими.

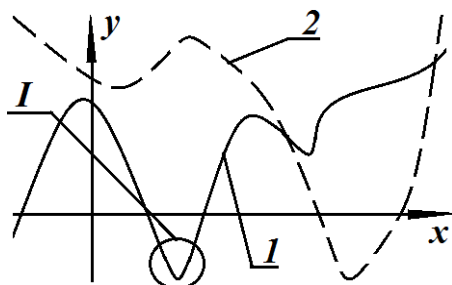


Рис. 3. Раціональні функції n -ого порядку:
1 – n парне, 2 – n непарне,
I – екстремум (шпилька серпантину)

Основним чинником розсинхронізації колективного руху автотранспортних засобів у складі транспортного потоку є необхідність їх складного маневрування з малими неусталеними швидкостями в зонах, так званих, “шпильок”

серпантину (наприклад, зона I рис. 3), які є точками перегину траси автомобільної дороги. Поблизу точки перегину траси автомобільної дороги форми трасування автодороги у вигляді параболи, гіперболи, еліпса з ексцентриситетом ~ 1 практично не відрізняються (рис. 4).

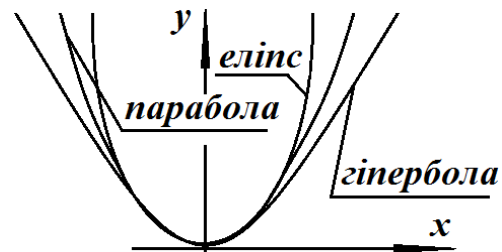


Рис. 4. Трасування автомобільної дороги у “шпильці” у вигляді гіперболи, параболи або еліпсу з ексцентриситетом кривих ~ 1

Маневрування транспортного засобу у “шпильках” серпантину ускладнюється умовами обмеження сприйняття візуальної інформації, що зумовлено наявністю природних або штучних об’єктів ландшафту (наприклад, аверсних поверхонь газо-пилосахисних лісосмуг), які розташовано у створах “шпильок” (Babkov, 1980; Li & Li, 2019). Для визначення мінімально допустимих розмірів конструкційної прив’язки аверсного боку візуальної перешкоди до проїжджої частини автодороги у “шпильці” серпантину (рис. 5) використана властивість гіперболи, відповідно до якої відрізок дотичної

TT_1 поміж її асимптотами завжди ділиться точкою дотику (\bullet) M навпіл (Mariotte & Leclercq, 2019; Skydan et al., 2019).

Відповідно до канонічного рівняння гіперболи, якщо осі координат співпадають з осями гіперболи, площа паралелограму $OGMF$

визначається так (рис. 5):

$$\omega = \frac{a^2 + b^2}{4} = \frac{a \cdot TT_1}{2}, \tag{3}$$

а співвідношення a та b є таким:

$$\frac{a}{u} = \operatorname{tg} \Delta. \tag{4}$$

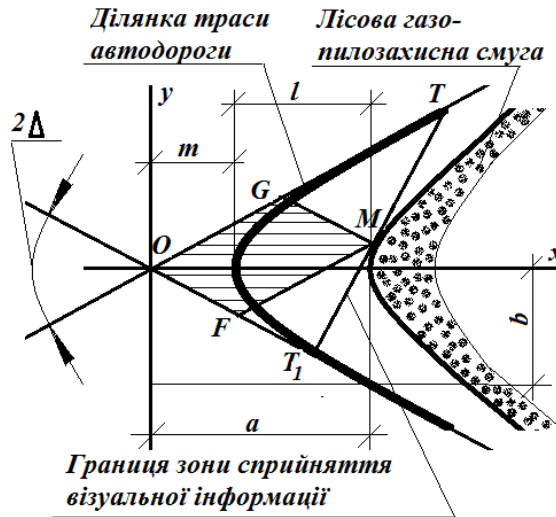


Рис. 5. Графічна модель конструкційної прив'язки аверсного боку візуальної перешкоди до траси автомобільної дороги в зоні “шпильки” серпантину

Тоді розв'язання системи рівнянь у вигляді

$$\begin{cases} \omega = \frac{a^2 + b^2}{4} \\ \omega = \frac{a \cdot TT_1}{2} \\ \operatorname{tg} \Delta = \frac{a}{u} \end{cases} \tag{5}$$

дозволяє визначити значення параметра a :

$$a = \frac{TT_1}{1 + \operatorname{tg} \Delta} \tag{6}$$

Якщо визначити радіус r повороту траси автодороги у “шпильці” як дотичну до асимптот

контуру аверсного боку візуальної перешкоди

$$m = \frac{a}{2} \cos \Delta, \tag{7}$$

остаточно отримаємо значення параметру l , який визначає відстань контуру аверсного боку візуальної перешкоди до осі проїжджої частини автодороги у “шпильці”:

$$l = \frac{s}{1 + \operatorname{tg} \Delta} \left(1 - \frac{1}{2} \cos \Delta \right). \tag{8}$$

Результати визначення параметру l для кутів $\Delta = 100^\circ - 160^\circ$ повороту автодороги наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Конструкційна відстань контуру аверсного боку деревно-чагарникової газо-пилозахисної смуги до осі проїжджої частини автомобільної дороги

Кут Δ повороту автодороги, град.	Значення параметру a , м	Розрахунковий параметр l , м	Конструкційна відстань контуру аверсного боку смуги до осі автодороги, м
100	68	46	45
120	55	40	40
140	40	33	30
160	22	20	20

Отже, при проектуванні ділянок серпантину автомобільних доріг мають бути дотримані вимоги до трасування автодоріг у плані та в поздовжньому профілі, проведено узгодження всіх об'єктів автошляхового інженерного комплексу з ландшафтними особливостями як окремих блоків елементарної ландшафтно-геохімічної системи, так і всією природно-техногенною геоекосистемою в цілому, що дозволяє забезпечити максимально можливу синхронізацію колективного руху автотранспортних засобів у складі транспортних потоків.

Висновки

Пропонована оптимізація геометрично-топологічних параметрів автодорожньої мережі у шпильках серпантинів автомобільних доріг на підставі графічного моделювання траси спеціальних ділянок автодоріг передбачає можливість синхронізації колективного руху автотранспортних засобів у складі транспортних потоків, що забезпечує стабілізацію виконання транспортно-технологічних операцій і, як наслідок, підвищує загальний рівень безпеки автотранспортного комплексу.

References

- Babkov, V. F. (1980). *Landshaftnoe proektirovanie avtomobilnyih dorog* [Landscape design of roads]. Moskva: Transport [in Russian].
- Li L., Li X. Parsimonious trajectory design of connected automated traffic // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. Vol. 119. P. 1–21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.11.006>
- Lukanin, V. N., Trofimenko, Yu. V. (2001). *Promyshlenno-transportnaya ekologiya* [Industrial and transport ecology]. Moskva: Vysshaya shkola [in Russian].
- Mandelbrot, B. B. (1983). *The Fractal Geometry of Nature*. W. H.: Freeman and Company.
- Mariotte G., Leclercq L. Flow exchanges in multi-reservoir systems with spillbacks // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. Vol. 122. P. 327–349. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.02.014>.
- Mohebifard R., Hajbabaie A. Optimal network-level traffic signal control: A benders decomposition-based solution algorithm // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. Vol. 121. P. 252–274. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.01.012>.
- Sheludchenko, L. S. (2018). *Funktsionalni oznaky avtotransportnoho potoku* [Functional signs of motor transport]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, 13, 75–79. doi: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2018.13.0.75> [in Ukrainian].
- Skydan, O., Sheludchenko, B., Kukharets, S., Medvedskyi, O. & Yarosh, Y. (2019). Analytical study of multifractal invariant attributes of traffic flows. *Kharkiv: Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/3 (99), 22–29. ISSN 17293774.
- Zhang Y., Ioannou P. A. Stability analysis and variable speed limit control of a traffic flow model // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2018. Vol. 118. P. 31–65. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.10.005>