

## **ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ БЕЗПЕКИ АВТОТРАНСПОРТУ В ТРАНСПОРТНОМУ ПРОЦЕСІ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ФАКТОРА ЛЮДИНИ**

**О. В. Степанов, к.т.н., доцент**

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

*Статтю присвячено питанням імітаційного моделювання безпеки автотранспорту в транспортному процесі системи «людина-автомобіль-дорога-середовище» з урахуванням впливу фактора людини. Показано, що існують певні загальні характеристики транспортного потоку, які керують поведінкою учасників дорожнього руху. Зроблено висновок, що завдання конкретних законів руху і відображення, законів впливу навоколишнього середовища і конкретних гіперповерхонь залежать від конкретної системи, що моделює безпеку автотранспортних засобів в транспортному процесі.*

### **Вступ**

Модель безпеки автотранспортних засобів (АТЗ) у системі «людина-автомобіль-дорога-середовище» (ЛАДС) є відкритою динамічною системою, яка складається з множини АТЗ, які беруть участь у транспортному процесі. При цьому, в процесі дорожнього руху, водій змушений час від часу змінювати режим руху АТЗ, що викликано рядом факторів, а саме: для режиму вільного безпечного руху АТЗ – геометричними параметрами вулично-дорожньої мережі, станом покриття дороги, схемою організації дорожнього руху, параметрами АТЗ, психофізіологічним станом водія (фактор людини) й ін.; для режиму безпечного руху АТЗ у складі транспортного потоку – додаються режими безпечного руху АТЗ у транспортному потоці. Тобто, розглядаючи процес функціонування складної системи ЛАДС, з урахуванням впливу на систему ЛАДС фактора людини – учасників дорожнього руху, є всі підстави до побудови імітаційної моделі безпеки АТЗ у транспортному процесі з урахуванням апріорної і емпіричної інформації системи ЛАДС, а саме, на основі моделей поведінки окремих елементів системи ЛАДС, а також механізмів їх взаємодії між собою та їх реакцій на ззовні сигнали [5].

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

У роботах фахівців у сфері автотранспорту надані різні способи регулювання руху на складних вузлах доріг і швидкісних магістралях, а також методи проектування транспортних систем з високою пропускнуою здатністю [6]. Методи імітації руху транспортних потоків наведені в роботах Р. С. Картабаєва, В. В. Сільянова, К. Ф. Сергеєва, І. В. Яцківа [7–10] та ба-

гато інших у яких відзначено, що сучасна наука в транспортній галузі зробила великий крок вперед, що не могло не відбитися на способах управління автотранспортом. Зокрема, існує велика кількість спеціальних систем для моделювання транспортних потоків дорожньої мережі [8, 10]. Відомі підходи до моделювання можуть бути класифіковані залежно від рівня деталізації досліджуваного процесу на моделі мікро- та макрорівня. Але при цьому, малодослідженими залишаються питання безпеки АТЗ у транспортному процесі з урахуванням фактора людини.

### **Мета та постановка завдання**

Розробити імітаційну модель безпеки АТЗ у транспортному процесі з урахуванням впливу фактора людини.

### **Рішення завдання. Розгляд питань безпеки автотранспорту в транспортному процесі**

У транспортному процесі під імітаційним моделюванням безпеки АТЗ мається на увазі конструювання моделі реальної системи та постановки експериментів на цій моделі для дослідження поведінки системи і оцінки різних стратегій, що забезпечують функціонування даної системи. При цьому ступінь відповідності з реальністю залежить від застосовуваної моделі слідування за лідером.

У якості гіпотези дослідження приймаємо розробку імітаційної моделі безпеки АТЗ у транспортному процесі на підставі наступного: в процесі функціонування системи ЛАДС функція зміни будь-якого параметра безпеки АТЗ відбувається стрибкоподібно, в дискретні моменти часу і залишається безперервною у проміжках між стрибками. Суть даної гіпотези полягає у тому, що стрибкоподібна зміна параметрів безпеки АТЗ не є спонтанною, а обумовлена певною причиною. У зв'язку з цим, для системного опису параметрів безпеки АТЗ, необхідно з'ясувати, що саме є причиною стрибка функції параметра, що являє собою стрибок і як поводяться функції параметрів після стрибка, якщо відома передісторія процесу.

Відповіддю на перше питання є дескриптивний перелік особливих ситуацій, які виникають у процесі руху і які змушують водія змінювати режим руху АТЗ [3]. При цьому особливі ситуації поділені на три категорії.

До першої категорії відносяться ситуації, які визначають умови і характер взаємодії елементів з навколишнім середовищем. Наприклад, АТЗ досяг ділянки дороги зі зміненими геометричними параметрами або АТЗ досяг ділянки дороги зі зміненою схемою організації дорожнього руху й ін.

До другої категорії відносяться ситуації, які визначають умови і характер взаємодії АТЗ між собою. Наприклад, АТЗ наздогнав лідера на своїй смугі руху або АТЗ, претендент на обгін, порівнявся з АТЗ на зустрічній смугі руху й ін.

До третьої категорії відносяться ситуації, які визначають характер впливу вхідних сигналів. Наприклад, на вході ділянки дороги з'явився новий АТЗ або на заданій ділянці дороги різко погіршилися погодні умови (туман, дощ, снігопад й ін.).

Особливі ситуації або причини, які формально викликають стрибки функції будь-якого параметра, можна представити у вигляді наступного рівняння:

$$F(z_1, z_2, \dots, z_n) = 0 \quad (1)$$

де  $z_1, z_2, \dots, z_n$  – компоненти вектора стану системи.

Відповідно до цього простір станів системи ділемо на області набором гіперповерхонь трьох категорій: 1) гіперповерхні першої категорії визначають умови і характер взаємодії елементів з навколишнім середовищем (включаючи дорогу і придорожний простір); 2) гіперповерхні другої категорії визначають умови і характер взаємодії елементів системи між собою; 3) гіперповерхні третьої категорії визначають характер впливу вхідних сигналів на елементи системи безпеки АТЗ. У даному випадку гіперповерхність – узагальнення поняття звичайної поверхні тривимірного простору на випадок  $n$ -мірного простору.

Відповіддю на друге питання є перелік алгоритмів обчислення стрибків відповідно до кожної особливої ситуації [4, 5]. Стрибок являє собою реакцію водія на особливу ситуацію, яка реалізується водієм через органи управління АТЗ певним способом.

Функціонування імітаційної моделі безпеки АТЗ у транспортному процесі відбувається наступним чином. Нехай у початковий момент часу стан системи задано і не лежить ні на одній з гіперповерхонь. Рух вектора системи в просторі станів буде відбуватися згідно із заданим законом руху до тих пір, поки він не досягне однієї із заданих гіперповерхонь. Функції, що визначають зміни компонент вектора кожного елемента (закони руху), є рішенням заданих диференціальних рівнянь, що визначаються теорією руху АТЗ. У момент досягнення гіперповерхні стан системи здійснює стрибок, який визначається заданим імовірнісним законом (закон відбиття). Після цього стан системи знову змінюється згідно із заданим законом руху до тих пір, поки не досягне чергової гіперповерхні, після чого знову відбувається стрибок і т.д.

Для вирішення задачі щодо забезпечення безпеки АТЗ у транспортному процесі з урахуванням впливу фактора людини використаний підхід, який ґрунтується на загальних властивостях транспортного потоку [1, 2]. Це означає, що існують певні загальні характеристики транспортного потоку, які керують поведінкою учасників дорожнього руху (фактор людини), і з яких виводяться макроскопічні властивості безпеки транспортного потоку. При

описі мікроскопічних характеристик безпеки транспортного потоку приймаємо до уваги дві основні особливості безпечного руху АТЗ.

Перша особливість безпечного руху АТЗ визначає вільний рух АТЗ, друга особливість визначає взаємодію між ними. У відповідності з цим слід зробити два основних припущення.

Перше припущення полягає в тому, що основна властивість вільного руху пов'язана зі швидкістю руху АТЗ, яка обмежена певною максимальною швидкістю  $V_{\max}$ :

$$V < V_{\max} \quad (2)$$

Максимальну швидкість можна представити, як безпечну для АТЗ швидкість при даних дорожніх умовах. У цілях безпеки АТЗ водії намагаються уникнути зіткнення з іншими учасниками дорожнього руху. Це є причиною наявності взаємодії між АТЗ у транспортному потоці.

Друге припущення полягає в тому, що розглянута система вільна від зіткнень між АТЗ, тобто водії завжди вибирають швидкість, яка не вище, ніж безпечна швидкість  $V_{\text{без}}$ :

$$V < V_{\text{без}} \quad (3)$$

Для коректності розгляду безпеки АТЗ можна припустити, що позитивні прискорення ( $a$ ) і негативні прискорення ( $b$ ) АТЗ обмежені:

$$a \geq \frac{d}{dt} V \geq b \quad (4)$$

Розглянемо модель, яка виробляє перетворення безпечного стану АТЗ у транспортному потоці через кожен дискретний крок по часу  $\Delta t$ . Для такої моделі всі вище викладені обмеження можна сформулювати у вигляді:

$$V(t + \Delta t) \leq \min[V_{\max}, V(t) + a\Delta t, V_{\text{без}}], \quad (5)$$

де  $V_{\text{без}}$  – безпечна швидкість обчислюється виходячи з обмеження:

$$V(t + \Delta t) \geq V(t) - b\Delta t. \quad (6)$$

Повна інформація про безпечну взаємодію АТЗ міститься в описі обчислення значення  $V_{\text{без}}$ . Як тільки визначено  $V_{\text{без}}$ , нерівність (3) у моделі задає схему перетворення стану транспортного потоку при обранні самої високої швидкості у відповідності з обмеженнями.

Для опису моделі безпеки АТЗ необхідно змоделювати взаємодії АТЗ. Розглянемо два АТЗ: лідера, розташованого в точці  $x_l$ , який має швидкість  $V_l$ , і веденого АТЗ, який має швидкість  $V_g$  з координатою  $x_g$ . Якщо довжина АТЗ дорівнює 1, то інтервал ( $g$ ) між автомобілями обчислюється за виразом:

$$g = x_l - x_g - 1. \quad (7)$$

Як згадувалося раніше, безпека АТЗ полягає в прагненні водія керувати АТЗ без зіткнень з іншими АТЗ. Це означає, що інтервал  $g$  завжди повинен бути позитивним. На відміну від більшості підходів до моделювання потоків, у даній роботі не буде визначатися прискорення веденої АТЗ залежно від умов попереду нього.

Замість цього почнемо з зауваження, що АТЗ у неперервній моделі не будуть стикатися, якщо інтервал  $g$  між лідером і веденим АТЗ більше, ніж якийсь бажаний інтервал ( $g_\delta$ ). У результаті можна отримати наступну нерівність:

$$\frac{d}{dt}g \geq \frac{g_\delta - g}{\tau_\delta}. \quad (8)$$

Бажаний час, пов'язаний з фактором людини  $t_{\phi_{\text{ло}}}$  і бажаний інтервал  $g_\delta$  можуть бути функціями від дистанції між АТЗ і від їх швидкостей. Відсутність зіткнень у даній моделі очевидна, так як для інтервалу  $g = 0$  похідна по часу від  $g$  завжди позитивна в силу наявності  $g_\delta$ .

Можна показати, що умову безпеки АТЗ можна звести до наступного:

$$V_l - V_e \geq \frac{V_l \tau - g}{\frac{V_l + V_e}{2b} + \tau}. \quad (9)$$

Зауважимо, що

$$\frac{dg}{dt} = V_l - V_e. \quad (10)$$

Звідси випливає, що нерівність (8) приймає форму нерівності (10) з бажаним інтервалом  $g_\delta = V_l \tau$  і бажаним часом фактора людини  $\tau_\delta = \tau_b + \tau$ , де

$\tau_b = \frac{(V_l + V_e)}{2b}$  і визначається за допомогою типових негативних прискорень  $b$ , які вибирає водій АТЗ.

Виведені нерівності слід змінити для отримання схеми перетворення швидкостей АТЗ у дискретні моменти часу. Використання дискретних часових кроків, крім того, привносить у цю модель ефект кінцевого часу реакції.

Виходячи з безпечної умови найбільш природний шлях побудови схеми перетворення – це інтерпретувати швидкість  $V_e$  у виразі (9), як функцію від кроку за часом  $t + \Delta t$ , що приводить до виразу:

$$V_e(t + \Delta t) \leq V_l(t) + \frac{g(t) - g_\delta(t)}{\tau_\delta(t)}. \quad (11)$$

АТЗ у моделі будуть підкорятися цьому правилу. Просторова координата  $X$  АТЗ буде перетворюватися у відповідності з виразом:

$$X(t + \Delta t) = X(t) + V(t + \Delta t)\Delta t. \quad (12)$$

Відомо, що для  $\Delta t \rightarrow 0, g_{\sigma} \geq 0$ . Це правило гарантує наявність безпеки АТЗ у транспортному процесі.

Припустимо, що крім випадкових флуктуацій, кожне АТЗ рухається з найбільшою можливою швидкістю згідно з попередніми обмеженнями. Тоді можна описати модель наступним чином:

$$\begin{aligned} V_{\sigma\sigma} (t) &= V_l(t) + \frac{g(t) - g_{\sigma}(t)}{\tau_b + \tau}, \\ V_{\sigma}(t) &= \min[V_{\text{макс}}, V(t) + a(V)\Delta t, V_{\sigma\sigma}(t)], \\ V(t + \Delta t) &= \max[0, V_{\sigma}(t) - \eta], \\ X(t + \Delta t) &= X(t) + V\Delta t. \end{aligned} \quad (13)$$

Бажаний інтервал  $g_{\sigma}$  можна вибирати по-різному. Будемо припускати, що  $g_{\sigma} = \tau V_{\sigma}$ , а  $\tau$  є часом реакції водія. Параметр тимчасової шкали визначається як:  $\tau_b = \frac{(V_{\sigma} + V_{\sigma\sigma})}{2b}$ .

Нами було введено випадкове збурення  $\eta > 0$ , щоб врахувати відхилення від заданої стратегії руху. Вираз для максимальної безпечної швидкості можна представити у вигляді:

$$V_{\sigma\sigma} (t) = V_l(t) + \frac{g(t) - g_{\sigma}(t)}{\tau_b + \tau}. \quad (14)$$

Будемо вважати максимальне прискорення ( $a$ ) й максимальне уповільнення ( $b$ ) постійними величинами (тобто, незалежними від швидкості), часовий крок  $\Delta t$ , рівним часу реакції  $\tau$ . Одиницею часу буде час реакції  $\tau$ , який приймається рівним одній секунді. «Довжина» АТЗ не є його фізичною довжиною, а дорівнює розмір простору, яке зазвичай займає АТЗ в щільній пробці. Зауважимо, що в моделі не передбачені зіткнення, так як  $g_{\sigma} = V_{\sigma}$ . На кроці рандомізації кожен АТЗ буде сповільнюватися за допомогою випадкової величини  $\eta$ , яка є однорідно розподіленою на відрізьку між 0 та  $\epsilon a$ , де параметр ( $\epsilon$ ) є випадковою величиною, рівномірно розподіленою на відрізьку між 0 і 1.

Таким чином, правила перетворення моделі можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} V_{\sigma} &\leftarrow \min[V_{\text{макс}}, V + a, V_{\sigma\sigma}], \\ V &\leftarrow \max[0, \text{rand}[V_{\sigma\sigma} - \epsilon a, V_{\sigma\sigma}], \\ X &\leftarrow X + V, \end{aligned} \quad (15)$$

де  $V_{\sigma}$  – обчислюється з використанням формули (13), а  $\text{rand}[x_1, x_2]$  позначає випадкове число в інтервалі між  $x_1$  і  $x_2$ .

### Висновки.

При імітаційному моделюванні безпеки АТЗ у транспортному процесі на одній смузі, розумним є припущення про зразкову рівність всіх максимальних швидкостей, так як швидкі АТЗ змушені знижувати швидкість при русі за повільними АТЗ. Якщо використовується відмінне від  $\delta$  функції розподілення ймовірності для максимальної швидкості, то це призводить до того, що більш повільні АТЗ будуть формувати черги позаду більш швидких АТЗ.

Відзначимо, що для випадку багатосмугового руху існує постійна взаємодія між групами різних АТЗ, обумовлена відмінністю у максимальній бажаній швидкості між АТЗ різних марок. Якби максимальна швидкість усіх АТЗ на багатосмуговій магістралі була однаковою, то не існувало б стимулу до обгону. З цієї причини питання про коректність моделювання величин щільності і інтенсивностей руху на обох смугах істотно залежить від правильного вибору розподілів максимальної швидкості АТЗ. При цьому, завдання конкретних законів руху та відображення, законів впливу навколишнього середовища і конкретних гіперповерхонь залежить від конкретної системи, яка моделює безпеку АТЗ у транспортному процесі але це тематика подальших досліджень.

### Література:

1. Брайловский Н. О. Моделирование транспортного потока с использованием метода статистических испытаний / Н. О. Брайловский // Некоторые вопросы исследования транспортных потоков. — М.: ЦЭМИ, 1970, вып.2. — С. 4–11.
2. Брайловский Н. О. Моделирование транспортных систем / Н. О. Брайловский, Б. И. Грановский. — М.: Транспорт, 1978. — 120 с.
3. Еремин В. М. Имитационное моделирование транспортных потоков в проектировании дорог / В. М. Еремин., Л. И. Муравьева. — М.: МЛ ДМ, 1981.— 119 с.
4. Еремин В. М. Имитационная модель потоков на магистралях / В. М. Еремин, В. В. Сильянов, С. И. Артемов // Системный анализ дорожного движения и дорожно- транспортных происшествий. — М.: МАДИ, 1989. — С. 17–22.
5. Еремин В. М. Алгоритм имитационной модели движения одиночных автомобилей в различных дорожных условиях / В. М. Еремин, О. И. Тонконоженков // Проектирование автомобильных дорог в сложных условиях. — М.: МАДИ, 1988. — С. 63–76.
6. Иносэ Х. Управление дорожным движением /Х. Иносэ, Т. Хамада. — 1983. — 248 с.
7. Картабаев Р. С. Машинная имитация движения транспортных потоков для проектирования автомобильных дорог в горной местности/ Р. С. Картабаев, В. А. Еремин. — Фрунзе : Илим, 1982.— 330 с.

8. Сергеева К. Ф. Анализ и оптимизация транспортных потоков с помощью моделирования / К. Ф. Сергеева // Сайт Междунар. молод. школы-семинара «БИКАМП: Будущее Информатики, Космического, Авиационного и Медицинского Приборостроения». — 2013.
9. Сильянов В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации дорожного движения / В. В. Сильянов. — М.: Транспорт, 1983. — 424 с.
10. Яцкив И. В. Использование возможностей имитационного моделирования для анализа транспортных узлов [Электронный ресурс] / Яцкив И. В. — Режим доступа:<http://www.gpss.ru>.

### **Аннотация**

#### **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОТРАНСПОРТА В ТРАНСПОРТНОМ ПРОЦЕССЕ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ЧЕЛОВЕКА**

**А. В. Степанов, к.т.н., доцент**

*Статья посвящена вопросам имитационного моделирования безопасности автотранспорта в транспортном процессе системы «человек-автомобиль-дорога-среда» с учетом влияния фактора человека. Показано, что существуют определенные общие характеристики транспортного потока, которые управляют поведением участников дорожного движения. Сделан вывод, что задачи конкретных законов движения и отражения, законы влияния окружающей среды и конкретных гиперповерхностей зависят от конкретной системы, моделирующей безопасность АТС в транспортном процессе.*

### **Abstract**

#### **IMITATION MODEL OF VEHICLE SAFETY IN THE TRANSPORT PROCESS TAKING INTO ACCOUNT THE FACTOR INFLUENCE ON THE HUMAN**

**O. Stepanov**

*The article is devoted to questions of imitation modeling of vehicles safety in the transport process of the system "man-car-road-environment" taking into account the influence of the human factor. It is shown that there are certain general characteristics of the traffic flow that govern the behavior of road users. It is concluded that the tasks of specific laws of motion and reflection, laws of environmental impact and specific hypersurfaces depend on a specific system that simulates the security of the automatic telephone exchange in the transport process.*