

УДК 629.371.21

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ
ТА ЗАКОНУ КЕРУВАННЯ ОДИНОЧНИМ ГОНОЧНИМ АВТОМОБІЛЕМ**

**А.М. Туренко, професор, д.т.н., А.В. Ужва, доцент, к.т.н., І.В. Лукашов, зав. ЛША,
О.О. Чернишов, майстер виробничого навчання,
Є.Л. Савченко, майстер виробничого навчання, ХНАДУ**

***Анотація.** Представлено постановку задачі пошуку оптимальної траєкторії руху гоночного автомобіля в системі «водій – автомобіль – дорожнє середовище» (ВАД), наведено концепцію моделювання траєкторії руху одиночного гоночного автомобіля.*

***Ключові слова:** гоночний автомобіль, траса, траєкторія, закон керування.*

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ
ДВИЖЕНИЯ И ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ОДИНОЧНЫМ ГОНОЧНЫМ
АВТОМОБИЛЕМ**

**А.Н. Туренко, профессор, д.т.н., А.В. Ужва, доцент, к.т.н., И.В. Лукашов, зав. ЛСА,
А.А. Чернышев, мастер производственного обучения,
Е.Л. Савченко, мастер производственного обучения, ХНАДУ**

***Аннотация.** Представлена постановка задачи поиска оптимальной траектории движения гоночного автомобиля в системе «водитель – автомобиль – дорожная среда» (ВАД), приведена концепция моделирования траектории движения одиночного гоночного автомобиля.*

***Ключевые слова:** гоночный автомобиль, трасса, траектория, закон управления.*

**PROBLEM STATEMENT OF OPTIMAL MOTION TRAJECTORY AND LAW
OF PARTICULAR RACING VEHICLE CONTROL DETERMINATION**

**A. Turenko, Professor, Doctor of Technical Science, A. Uzhva, Associate Professor,
Doctor of Technical Science, I. Lukashov, Head of LSV,
A. Chernyshov, Training Officer, E. Savchenko, Training Officer, KhNAHU**

***Abstract.** The problem statement for determining the optimal trajectory motion of the racing vehicle that is considered in the system «Driver – Vehicle – Road Environment» (DVR) is presented. The concept of trajectory modeling of a particular racing vehicle is given.*

***Key words:** race vehicle, track, trajectory, control law.*

Вступ

Як свідчить аналіз наукових публікацій, останнім часом, з точки зору безпеки, досить актуальною є проблема моделювання та пошуку оптимальної та безпечної траєкторії стійкого руху автомобіля. У більшій частині робіт з цієї тематики в різних аспектах розглядається математична задача так званого «оптимального керування», що називається задачею «швидкодії».

Аналіз публікацій

В доступній, по більшій частині закордонній, літературі для гоночного автомобіля мова йде про дві постановки визначення оптимальної траєкторії його руху [1, 2]. В першій – розробляються алгоритми програмних засобів, що функціонують у реальному часі, тобто створюються імітатори дій водія (кермові роботи), якому відома видима частина траси і який повинен приймати оперативне рішення

з вибору напрямку і режиму руху, що забезпечує безпечне проходження траси перегонів за мінімальний час. У другій – проводиться пошук як оптимальної траєкторії руху по трасі перегонів, так і закону керування. Зазвичай обираються декілька варіантів траєкторій, на них проводиться чисельне моделювання руху автомобіля й визначається оптимальний варіант. Такий метод називається напіваналітичним, оскільки потребує втручання оператора, який задає траєкторію, що досліджується.

Мета і постановка задачі

Метою статті є формулювання постановки задачі пошуку оптимальної траєкторії руху гоночного автомобіля за допомогою математичної моделі, вихідні дані для якої отримані під час експериментальних досліджень.

Математична модель траси

Відповідно до рекомендацій FIA [3] для кільцевих трас $7 \text{ км} \leq L \leq 2 \text{ км}$, а $d \geq 12 \text{ м}$. Траса складається із прямолінійних ділянок і поворотів (поворотом називається частина траси між прямолінійними ділянками), які визначаються по осевій лінії. Серія послідовно розташованих поворотів, між якими відсутні прямолінійні ділянки, а середні лінії є дотичними дугами, називаються зв'язуваннями. Максимальна довжина прямолінійних ділянок не повинна перевищувати 2 км. Траса являє собою обмежену зв'язану область Z на площині, яку можна описати в такий спосіб [4]: на площині є замкнута досить гладка крива (яка два рази безперервно диференціюється), рівняння якої відомі у природній параметризації

$$L = \left\{ \begin{array}{l} x = \psi(s) \\ y = \phi(s) \end{array} \right\}; \quad s \in [0; l]. \quad (1)$$

Лінію L будемо називати осевою (середньою лінією) траси. Z являє собою множину крапок, розташованих відносно кривої L на відстані $\frac{d}{2}$, де d – ширина траси.

Приналежність крапки $M(x; y)$ трасі Z визначається виконанням нерівності

$$\min \left\{ (x - \psi(s))^2 + (y - \phi(s))^2 \right\} \leq \frac{d^2}{4}; \quad s \in [0; l]. \quad (2)$$

Математична модель режимів руху

Для гоночного автомобіля характерні наступні режими руху: розгін, гальмування, ковзання та їхнє сполучення. Ковзання може бути повним; також розрізняють ковзання передньої (знос) або задньої осі (занос). Переходи від одного режиму до іншого здійснюються миттєво.

Зазвичай моделі режимів руху автомобіля представляють у вигляді рівнянь або систем рівнянь (як правило, диференціальних). У роботі запропоновано інший спосіб – за допомогою функцій. Одна з переваг такого способу полягає в тому, що ці функції можуть бути отримані в результаті обробки експериментальних даних.

Розглянемо докладніше методику моделювання руху гоночного автомобіля в кожному з характерних режимів [5].

1. *Розгін*. Нам відома функція $V_R(V_n; s)$, що визначає швидкість, якої може досягти автомобіль на прямолінійній ділянці довжини s за початкової швидкості V_n . Повинна бути виконана умова:

$$V_R(V_n(V_n; s_1); s_2) = V_R(V_n; s_1 + s_2). \quad (3)$$

2. *Гальмування*. Нам відома функція $V_T(V_k; s)$, що визначає максимально можливу швидкість, що може мати автомобіль на початку прямолінійної ділянки довжини s , щоб наприкінці ділянки знизити швидкість до V_k . Повинна бути виконана умова:

$$V_T(V_k(V_k; s_1); s_2) = V_T(V_k; s_1 + s_2). \quad (4)$$

3. *Рух на повороті*. На практиці у процесі руху по гоночній трасі має місце розгін і гальмування на криволінійній ділянці траси – повороті або їхньому зв'язуванні. Рух автомобіля при проходженні повороту без ковзання одержав назву «вкочування». Виконується в такий спосіб: в момент найбільшого зчеплення керованих коліс із дорожнім покриттям здійснюється поворот керма на кут, необхідний для руху автомобіля по кривій. Потім плавно збільшують поворот кермового колеса і величину відкриття дросельної заслінки доти, доки не з'явиться тенденція до заносу задньої осі або заносу передньої осі. В цей момент плавно зменшують кут повороту коліс або величину відкриття дросельної заслінки (рис. 1).

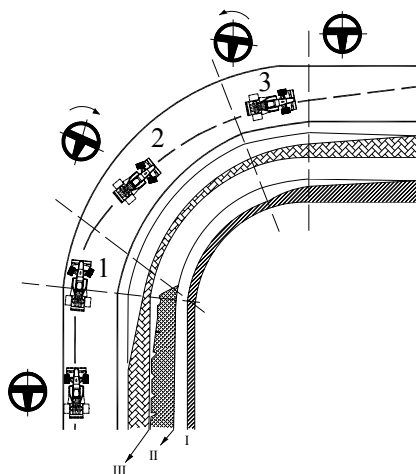


Рис. 1. Рух автомобіля при проходженні повороту без ковзання («вкочуванням»): I – сила тяги на колесах; II – гальмування; III – швидкість автомобіля; 1 – фаза входу в поворот; 2 – рух по дузі; 3 – фаза виходу з повороту

4. *Ковзання.* Цей режим може бути реалізований при повороті керма на кут θ за швидкості, не меншої, ніж $V_{\min}(\theta)$, після чого швидкість руху задається функцією $V_{sk}(V_n; s; \theta)$ – швидкість наприкінці ділянки довжини s . При такому русі існує швидкість V_p , за якої рух автомобіля стабілізується і вектор його швидкості збігається з поздовжньою віссю автомобіля. На практиці застосовують ковзання всіх чотирьох коліс автомобіля (повне або «силове ковзання»), (рис. 2) і керований занос.

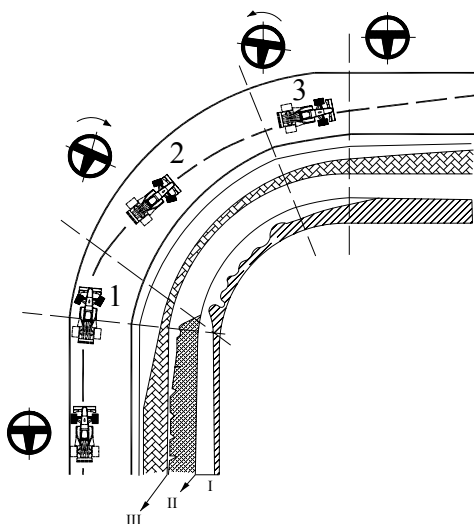


Рис. 2. Рух автомобіля при проходженні повороту «силовим ковзанням»: I – сила тяги на колесах; II – гальмування; III – швидкість автомобіля; 1 – фаза входу в поворот; 2 – рух по дузі; 3 – фаза виходу з повороту

При проходженні автомобілем повороту «силовим ковзанням», у момент найбільшого зчеплення коліс із дорожнім покриттям виконується поворот керма на кут, що за звичайних умов, тобто русі без ковзання, направив би автомобіль до вершини повороту. В той момент, коли передні колеса починають ковзання, збільшують відкриття дросельної заслінки до моменту, коли і задня вісь автомобіля переходить у ковзання. У цьому випадку автомобіль поступово сковзає до зовнішнього краю повороту, але продовжує рух по криволінійній траєкторії. Положенням дросельної заслінки і поворотом кермового колеса регулюють кут бічного ковзання.

Рух із застосуванням керованого заносу застосовується для проходження поворотів великої кривизни і ділянок з низьким коефіцієнтом зчеплення. На відміну від силового ковзання, передні колеса автомобіля увесь час повернені в протилежну повороту сторону (рис. 3). Застосування цього прийому дозволяє при проходженні повороту міняти швидкість руху і кривизну траєкторії руху автомобіля в широких межах. На дорогах з покриттям, що забезпечує стабільно високий коефіцієнт зчеплення, рух автомобіля із застосуванням керованого заносу є нераціональним. Цей прийом руху не забезпечує мінімального часу проходження поворотів. У зв'язку із цим в кільцевих автомобільних перегонах у керованому заносі автомобіль рухається тільки у критичних ситуаціях, а основними прийомами є «вкочування» і «силове ковзання».

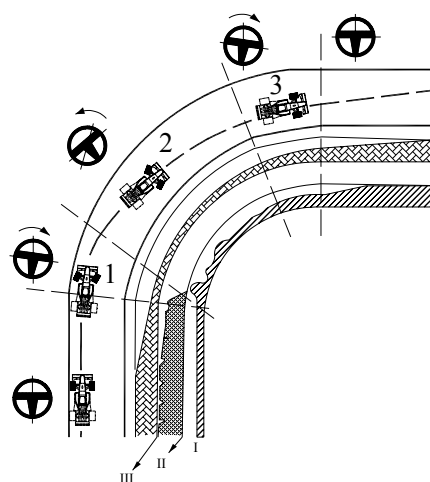


Рис. 3. Рух автомобіля при проходженні повороту із застосуванням керованого заносу: I – сила тяги на колесах; II – гальмування; III – швидкість автомобіля; 1 – фаза входу в поворот; 2 – рух по дузі; 3 – фаза виходу з повороту

Моделювання траєкторії руху гоночного автомобіля

Траєкторія руху гоночного автомобіля являє собою гладку криву, що має певну кривизну $r(s)$. Траєкторією руху автомобіля будемо вважати траєкторію руху його центра мас. З умов безпеки автомобіль не повинен виходити за межі траси і у кожній крапці M траєкторії повинна виконуватися умова [6]

$$V(M) \leq \sqrt{\frac{(\varphi \cdot m \cdot g)^2 - P_T^2}{m}} \cdot r, \quad (5)$$

де m – вага автомобіля; P_T – сила тяги на колесах; φ – коефіцієнт зчеплення, що залежить від параметрів руху автомобіля; r – кривизна траєкторії в точці M ; g – прискорення вільного падіння.

Траєкторія руху гоночного автомобіля по трасі визначається виходячи з допущення, що на всіх ділянках траси автомобіль рухається під керуванням «ідеального» водія, тобто у всіх режимах руху повністю використовуються зчіпні властивості шин автомобіля. Врахування зменшення швидкості (до можливої по використанню зчіпних властивостей шин автомобіля, відповідно до рівняння (5)) і перерозподіл реакцій опірної поверхні забезпечується обчисленням за допомогою імітаційного моделювання руху гоночного автомобіля по трасі у зворотному напрямку. Виходячи із цього, запропоновано алгоритм обчислення оптимальної, з погляду мінімального часу проходження дистанції кола траси, траєкторії руху гоночного автомобіля, що у короткій формі виглядає так:

1. Розрахунок максимального бічного прискорення в характерній точці ділянки траси з відомою кривизною і відомою початковою швидкістю руху в цей момент часу;
2. Розрахунок максимального поздовжнього прискорення;
3. Розрахунок максимально реалізованої в даних умовах сили тяги;
4. Розрахунок сили аеродинамічного опору;
5. Визначення результуючої сили тяги;
6. Уточнення значення швидкості руху гоночного автомобіля, максимально досяжного в даних умовах;
7. Перевірка допустимості досягнення такої швидкості руху гоночного автомобіля за допомогою імітаційного моделювання руху по трасі у зворотному напрямку (рис. 4);
8. Перехід до обчислення швидкості в наступній точці ділянки траси (повернення до пункту 1).

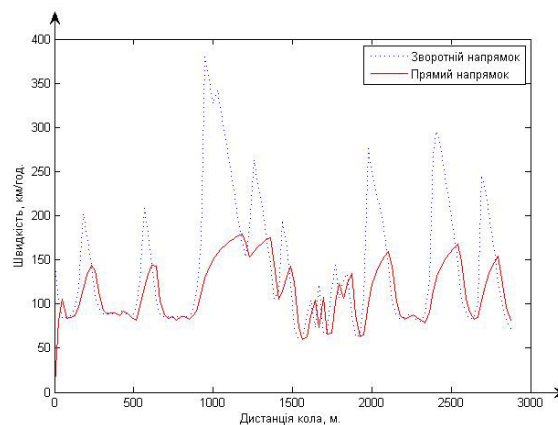


Рис. 4. Розрахунковий швидкісний режим при проходженні дистанції кола траси автодрому «Чайка», м. Київ. Зворотна та пряма розрахункові ділянки

Висновки

Отримання залежності швидкості автомобіля від його положення на дистанції траси дає змогу синтезувати закон керування гоночним автомобілем, який відтворить розрахунковий швидкісний режим руху.

Література

1. A Demonstration of the Dynamic Tests Developed for NHTSA's NCAP Rollover Rating System – Phase VIII of NHTSA's Light Vehicle Rollover Research Program [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.nhtsa.gov/>.
2. Vehicle Dynamics – Fundamentals and Modeling [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.hs-regensburg.de>.
3. FIA – List of Requirements for the Circuit Drawing [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.fia.com/>.
4. Чернавский А.В. Геометрическая модель планирования траектории / А.В. Чернавский, В.Н. Карпушкин // Нейрокомпьютер, 1992. – С. 35–39.
5. Цыганков Э.С. Безопасное прохождение поворотов / Э.С. Цыганков. – М.: ДОСААФ, 1986. – 144 с.
6. Певзнер Я.М. Теория устойчивости автомобиля / Я.М. Певзнер. – М.: Машгиз, 1947. – 156 с.

Рецензент: В. П. Волков, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 25 листопада 2010 р.