

УДК 629.113

В.О. Банніков**ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ 3-и КОЛІСНОГО ЕКІПАЖА НА СТІЙКІСТЬ ЙОГО ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ**

Визначено межі значень основних конструктивних параметрів керованого колісного модуля, що впливають на втрату дивергентної і флатерної стійкості при найнижчій крутильній жорсткості осі керованої стійки, тобто нульового значення відповідного коефіцієнта ($\kappa = 0$)

Ключові слова: стійкість, коефіцієнт, жорсткість, рух.

Рис. 3 Форм. 4. Літ. 7.

В.А. Банников**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ 3-х КОЛЕСНОГО ЭКИПАЖА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЕГО ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ**

Определены границы значений основных конструктивных параметров управляемого колесного модуля, влияющих на потерю дивергентной и флаттерной устойчивости при наиболее низкой крутильной жесткости оси управляемой стойки, т.е. нулевого значения соответствующего коэффициента ($\kappa = 0$)

V.A. Bannikov**INFLUENCE OF DESIGN DATA 3-WHEEL CREW ON THE SUSTAINABILITY OF ITS RECTILINEAR MOTION**

The boundaries of the core values of design parameters managed the wheel module, causing a loss of divergent flutter and stability at the lowest torsional rigidity of the axis controlled rack, ie zero corresponding coefficient ($\kappa = 0$). The emergence of a new class of vehicles due to the search for solutions to the problems caused by congestion of the road network in the modern metropolis - namely, the ability to increase average speed efficient maneuvering and parking, while maintaining security.

Materials in this article belong to the 3- wheeled vehicles, with relatively small dimensions and weight (mass transport is less than the total mass of the driver and passenger); front wheel driven, and two other untethered - behind. Used in constructing a mathematical model assumptions due to the course presentation. The task of theoretically informed choice of structural parameters of 3- wheeled crew that can bend, including cooperation with the body and controlled stable, it remains terms has not studied the dynamic features of the model, including a special role is devoted to the stability instrument. This situation is caused by still low prevalence of similar design patterns in practice and has not yet formed a design that differs obvious characteristic signs

Вступ. Поява нового класу транспортних засобів обумовлено пошуком шляхів вирішення проблем, викликаних завантаженістю вулично-дорожньої мережі в сучасному мегаполісі, а саме - можливістю підвищення середньої швидкості руху, ефективного маневрування і паркування при збереженні безпеки.

Матеріали, наведені в цій статті, належать до 3-и колісних транспортних засобів, з відносно малими габаритами і масою (маса транспортного складає не більше сумарної маси водія і пасажира); переднє колесо кероване, а два інші некеровані - ззаду. Використовувані при побудові математичної моделі допущення обумовлені по ходу викладу.

Постановка проблеми. Завдання теоретично обгрунтованого вибору конструктивних параметрів 3-и колісного екіпажу який може нахилитися, в тому числі, спільно з кузовом та керованою стійкою, залишається актуальним з погляду досі не вивчених динамічних особливостей моделі, серед яких особливу роль займають питання шляхової стійкості. Такий стан справ зумовлений поки ще малою поширеністю схожих конструктивних схем на практиці і ще не сформованою конструкцією, що відрізняється явними характерними ознаками.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема стійкості наземних колісних машин (НКМ) у всі часи залишалася актуальною: як з причини зростання швидкостей руху, так і в результаті їх розвитку, а конкретно - появи нових компоновальних схем. [1, 2, 3, 5]. В роботі [4] наведено результати аналізу пристроїв, зокрема, мобільних роботів, визначення зони стійкого прямолінійного руху в залежності від одного з геометричних параметрів - положення центра ваги на поздовжньої осі. Однак, наведена математична модель не враховує нахил керованої стійки, а припущення про неголономність моделі може бути прийнято лише в діапазоні досить малих швидкостей руху. У роботі [6] наводиться вираз критичної швидкості прямолінійного руху

екіпажу як функції крутильної жорсткості керованого модуля (у моделі враховані пружні властивості колеса відповідно до гіпотезою відведення Рокара). При цьому використана в роботі конструктивна схема не дозволяє повною мірою описати поведінку 3-и колісного екіпажу. Тим більше - при малих значеннях крутильної жорсткості і особливо, поблизу її нульових значень. Тому виникає потреба побудови відповідної моделі 3-х колісного екіпажу і визначення умов стійкості прямолінійного руху в залежності від конструктивних параметрів.

Ціль статті. Визначення меж значень конструктивних параметрів керованого колісного модуля і умов які забезпечують сталий прямолінійний рух на основі аналітичного виразу критичної швидкості прямолінійного руху 3-и колісного екіпажу, з урахуванням нахилу керованої стійки, при нульовому коефіцієнті ($\kappa = 0$) її жорсткості, що дозволяє точніше оцінити вплив C_f і λ на кордонах втрати флаттерної і дивергентної стійкості.

Основні результати досліджень. За прийнятих позначень розглянемо кінематику корпусу і керованого колісного модуля 3-и колісного автомобіля. Положення корпусу визначається координатами точки контакту "приведеного" заднього колеса (x, y) і курсовим кутом Θ між поздовжньою віссю екіпажу й поздовжньою віссю Oy нерухомої системи координат; $\dot{x} = v_x$, $\dot{y} = V$ - координати швидкості точки контакту на осі нерухомої системи координат (швидкість поздовжнього руху V вважаємо постійною); швидкість зміни курсового кута $\dot{\theta} = \omega$; кутова швидкість власного обертання "приведеного" колеса φ_r .

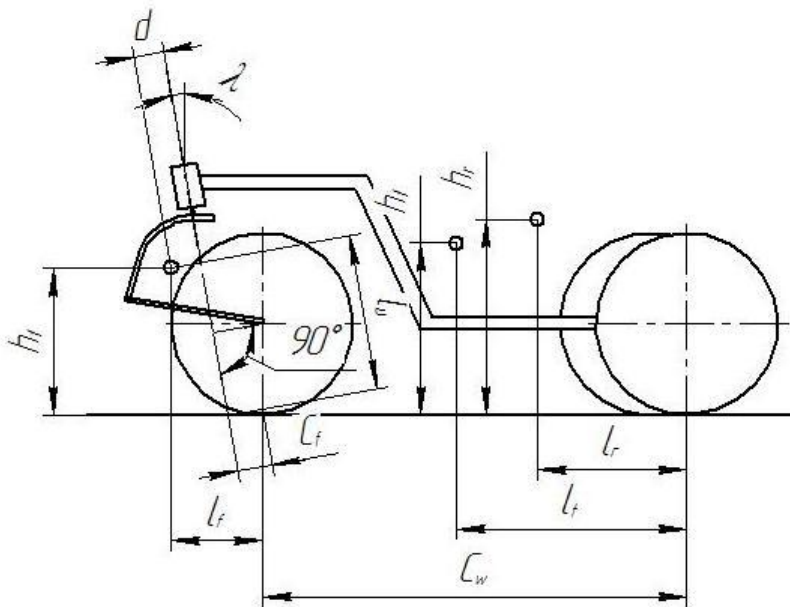


Рис. 1. Розрахункова схема 3-и колісного екіпажу

Позначення параметрів у математичній моделі

- R_k динамічний радіус колеса;
 $m_r; l_r; h_r$ параметри корпусу: відповідно - маса; відстань від центра мас до осі обертання "приведених" коліс задньої осі; висота центра мас над опорною поверхнею;
 $m_f; l_f; h_f$ параметри керованого модуля: відповідно: маса; відстань від центра мас до осі обертання його колеса; висота центра мас над опорною поверхнею;
 $d; \lambda$; параметри керованого модуля: відповідно - відстань від центра мас до осі його повороту; кут нахилу керованої стійки; відстань від центра мас вздовж його осі до опорної поверхні; плече обкатування;
 $l_w; c_f$

- $m_f; l_f; h_f;$ параметри триколісного екіпажу: відповідно - маса; відстань від центра мас до осі обертання "приведених" коліс задньої осі;
 $h_b; c_w$ висота центра мас над опорною поверхнею, колісна база;
 $C_f; C_r$ полярні моменти інерції переднього та заднього коліс;
 R_{zz} момент інерції корпусу.

Керований колісний модуль може повертатися щодо осі керованої стійки ($\dot{\psi} = \dot{\Psi}$ - кутова швидкість), яка має поздовжній нахил, а також обертатися навколо вертикальної осі разом з корпусом ($\dot{\theta} = \dot{\omega}$ - швидкість зміни курсового кута). Проекції миттєвої кутової швидкості на горизонтальну вісь, що лежить у площині колеса й перпендикулярно до неї, відповідно рівні $-\dot{\psi} \sin \lambda$; $\dot{\omega} + \dot{\psi} \cos \lambda$; проекція миттєвої кутової швидкості на вісь, перпендикулярну до площини колеса, дорівнює $\dot{\omega} - \dot{\psi} \sin \lambda$; курсовий кут керованого модуля $\theta_f = \theta + \psi \cdot \cos \lambda$; кут розвалу $\chi_f = -\psi \cdot \sin \lambda$.

На рис. 2. зображена керована стійка разом з колесом, та кути її установки.

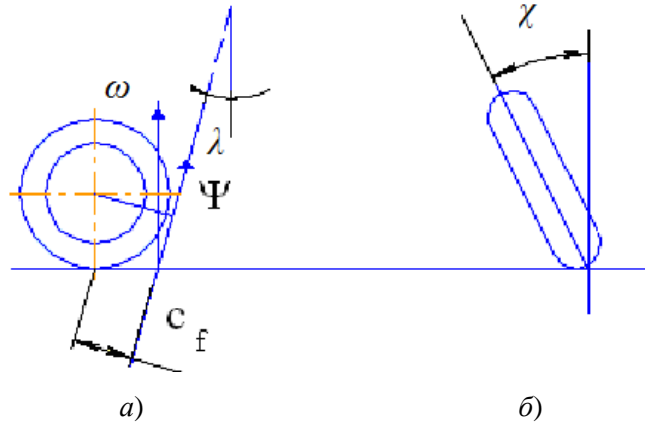


Рис. 2. Положення колеса керованого модуля:
 а – відносно осі керованого модуля; б – при поперечному нахилі

Диференціальні рівняння руху триколісного екіпажу:

- в поперечному напрямку

$$m_f (U - V\omega) - m_f l_f \varepsilon_\theta - m_f d \varepsilon_\psi + \alpha_f ((u - c_w \omega + c_f \Psi) / V + \psi \cos(\lambda)) + \alpha_f u / V + K_f \psi \sin(\lambda) = 0; \quad (1)$$

- відносно вертикальної осі

$$(m_f l_r^2 + R_{zz} + m_f (c_w + l_f)^2 + F_{zz}) \varepsilon_\theta + (-F_{yz} \sin(\lambda) + m_f d (c_w + l_f) + F_{zz} \cos(\lambda)) \varepsilon_\psi - m_f l_f (U - V\omega) - C_f V \Psi \sin(\lambda) / R_k - M_\psi \cos(\lambda) - c_w \alpha_f ((u - c_w \omega + c_f \Psi) / V + \psi \cos(\lambda)) - c_w K_f \psi \sin(\lambda) = 0; \quad (2)$$

- відносно осі керованого модуля

$$(-F_{yz} \sin(\lambda) + m_f d (c_w + l_f) + F_{zz} \cos(\lambda)) \varepsilon_\theta + (m_f d^2 - 2 F_{yz} \sin(\lambda) \cos(\lambda) + F_{yy} \sin(\lambda)^2 + F_{zz} \cos(\lambda)^2) \varepsilon_\psi - m_f (U - V\omega) d + C_f V \omega \sin(\lambda) / R_k + M_\psi + c_f \alpha_f ((u - c_w \omega + c_f \Psi) / V + \psi \cos(\lambda)) + c_f K_f \psi \sin(\lambda) - g v \sin(\lambda) \psi = 0, \quad (3)$$

де R_k - динамічний радіус колеса.

Вираз для квадрата критичної швидкості (випадок дивергентної втрати стійкості) отримано з наведених вище рівнянь руху.

Значення критичної швидкості руху $V_{кр}$ визначається як значення швидкості, за якої визначник якобіана дорівнює нулю.

$$\begin{aligned}
 V_{kp}^2 = & (\alpha_r R c_w \alpha_f (c_w g v \sin(\lambda) - c_w \kappa + \cos(\lambda) \kappa c_f)) / (\alpha_f \cos(\lambda) \kappa m_f V^2 dR + \alpha_f \cos(\lambda) \kappa C_f V^2 \sin(\lambda) + \\
 & + \alpha_f R m_t l V^2 \kappa - \alpha_f R m_t l V^2 g v \sin(\lambda) + c_f \alpha_f \cos(\lambda) R m_t V^2 \kappa - c_w \alpha_f R m_t V^2 \kappa + c_w \alpha_f R m_t V^2 g v \sin(\lambda) + \\
 & + \alpha_r \cos(\lambda) c_w \alpha_f m_f V^2 dR + \alpha_r \cos(\lambda) c_w \alpha_f C_f V^2 \sin(\lambda) + \alpha_r \cos(\lambda) \kappa m_f V^2 dR + \alpha_r \cos(\lambda) \kappa C_f V^2 \sin(\lambda) - \\
 & - \alpha_r R m_t l V^2 g v \sin(\lambda) + \alpha_r R m_t l V^2 \kappa + \alpha_r R m_t l V^2 c_f \alpha_f \cos(\lambda)),
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

де κ і λ - змінні параметри)

Як перевірки несуперечності отриманої системи визначався набір власних значень при $\lambda = 0$, $\tau = e$, за відсутності нахилу передньої стійки (він збігся з результатами, отриманими для прототипу - плоскою моделі екіпажу з керованою передньою віссю [3]). Далі перейдемо до обґрунтування вибору значень деяких конструктивних параметрів, що забезпечують стійкість прямолінійного руху екіпажу в області експлуатаційного діапазону швидкості.

Набір чисельних значень конструктивних параметрів екіпажу:

$m_f = 95$ кг - маса, яка припадає на передню вісь;

$c_w = 1.7$ м - колісна база;

$R_k = 0,235$ м - радіус колеса;

$M = 285$ кг - маса всього екіпажу;

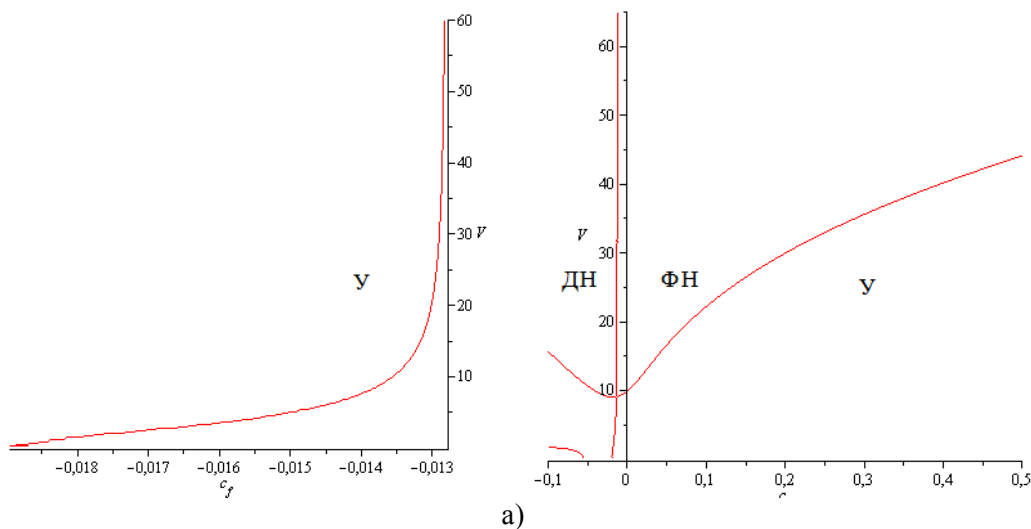
$h_r = 0,35$ м - висота центру мас;

$d := 0,04$ м - відстань між центром мас переднього керованого модуля та його віссю;

$l_u := 0.3$ м - відстань між центром мас переднього керованого модуля точкою перетину його осі з опорною поверхнею;

$m_r = 190$ кг - маса, яка припадає на задні колеса;

Аналіз стійкості прямолінійного руху триколісного екіпажу. Нижче, в графічному вигляді наведено результати аналізу втрати дивергентної стійкості (зони «ДН») і флаттерної (зони «ФН»), а також вказані зони стійкості («У») при прямолінійному руху екіпажу в площині параметрів системи: плече обкатки («винесення») і поздовжня швидкість V .



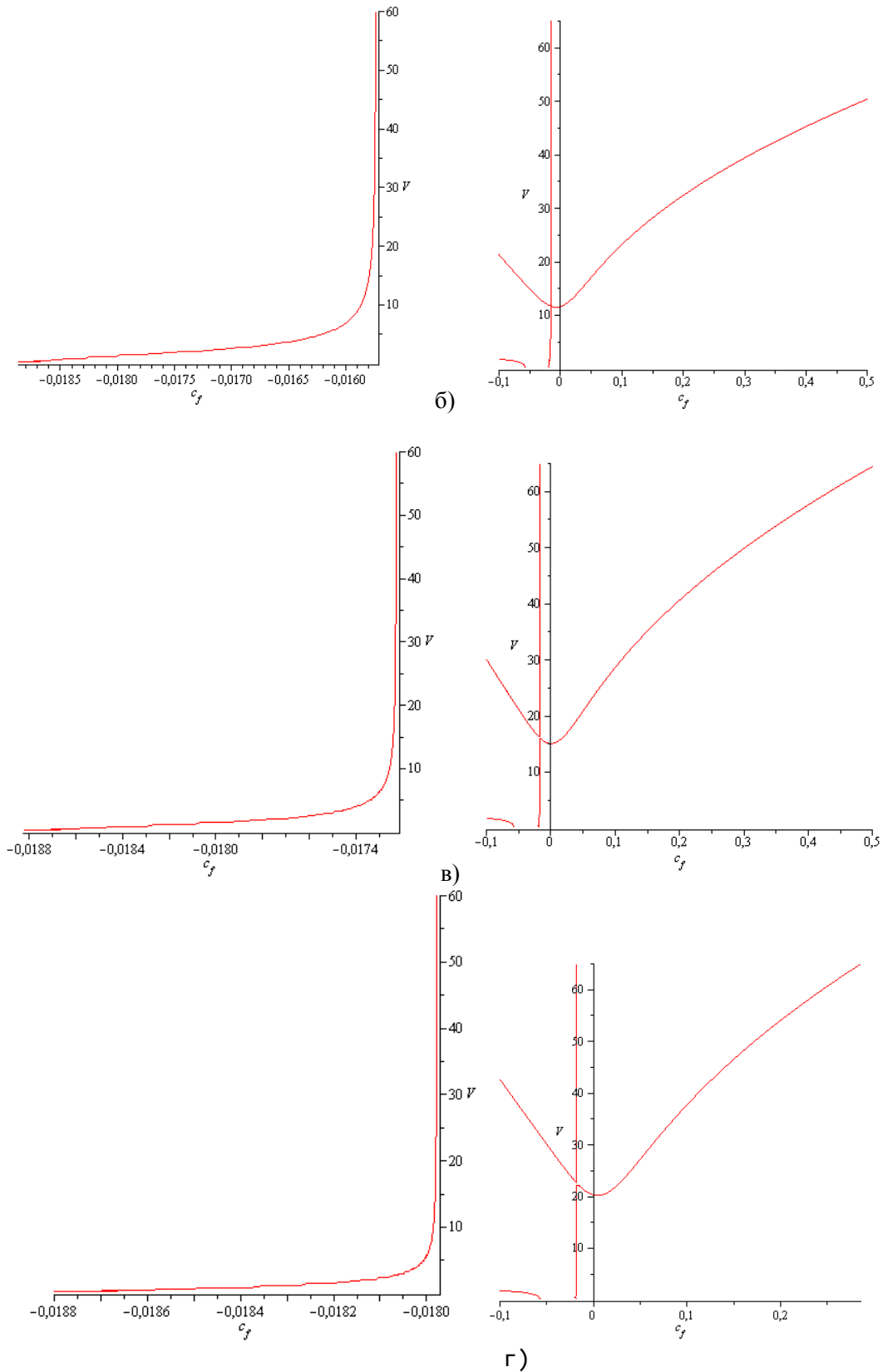


Рис . 3. Зони дивергентної нестійкості (ДН) і зони флаттерної нестійкості (ФН), а також зони стійкості (У) :

а) при $2\pi/15$; б) при $\pi/15$; в) при $\pi/30$; г) при $\pi/60$,
 графіки , розташовані зліва - випадок негативного нахилу стійки ; графіки праворуч -
 випадок позитивного нахилу стійки.

Результати аналізу втрати стійкості прямолінійного руху екіпажу, отримані на основі критерію Рауса – Гурвіца [1,7], (необхідною і достатньою умовою стійкості тривіального рішення системи лінійних диференціальних рівнянь є позитивність всіх визначників Гурвіца $DG [1]$, $DG [2]$, $DG [3]$, $DG [4]$, число яких збігається з порядком системи). Вони підтверджують справедливність раніше отриманого виразу для критичної швидкості (випадок дивергентної втрати стійкості).

$$\lambda = \pi / 12; \{ \{ V = 2, A[f] = 0.2 \}, \{ AA [4], DG [1], DG [2], DG [3], DG [4] \} \}; \{ \{ = 20, \lambda \text{ з } [f] = 0.2 \}, \{ AA [4], DG [1], DG [2], DG [3], DG [4] \} \};$$

негативне значення одного з параметрів вказує на нестійкість прямолінійного руху .

$$\{ -9726.725237.0272, 12856.8852.0310^6, -1.9810^{10} \};$$

$$\text{при } \lambda = (+, -)2\pi / 15; (+, -)\pi / 15; (+, -)\pi / 30; (+, -)\pi / 60; c_f = 0.1 < ; V = 33 < / A ; AA [4] < 0.$$

На рис. 4 а), б) , в), г) наведено результати аналізу втрати дивергентної стійкості (зони «ДН») і флаттерної стійкості (зони «ФН»), а також вказані зони стійкості («У») при прямолінійному руху екіпажу в площині параметрів системи : нахил - λ , плече обкатки - c_f («винос») і поздовжня швидкість V . (Отримано на основі аналітичного виразу для критичної швидкості). При цьому очевидно, що зі зменшенням коефіцієнта жорсткості до нульового значення розміри зон стійкості зростають, а нестійкості - навпаки. Зони, зазначені значками : «У», «ДН», і «ФН» на Рис. 4а), на всіх інших - б), в), г) - ідентичні.

Висновки. Визначено і обґрунтовано критерій впливу конструктивних параметрів мікроавтомобіля на поліпшення його стійкості й маневреності. До основних параметрів віднесені: кут нахилу λ кермової стійки й «винос» її вісі c_f . Крім того, впливають ще деякі геометричні, інерційні та масові параметри керованої стійки й самого мікроавтомобіля.

Виявлено, що зони стійкості при зменшенні крутильної жорсткості керованої стійки ($\kappa = 0$) зростають, а зони нестійкості, як дивергентної, так флаттерної - навпаки.

Діапазон значень конструктивних параметрів, які забезпечують стійкість прямолінійного руху при нульовій крутильній жорсткості керованої стійки ($\kappa = 0$) і негативних кутах її нахилу, лежить в межах експлуатаційних швидкостей $V = 0 \dots 33$ м / с, при $c_f = 0,03 \dots 0,15$ м; $\lambda = 15$ град $\dots 2$ град. Виходячи з цього були рекомендовані наступні значення параметрів: $c_f = 0,09 \dots 0,15$ м; $\lambda = 3$ град $\dots 6$ град.

Перспективи подальшого дослідження. Розглянута схема 3-х колісного екіпажу дозволяє поліпшити маневреність, наприклад, шляхом виконання переднього керованого колеса провідним і, з можливістю повороту його щодо осі керованого колісного модуля не менше ніж на 360 градусів, що неминуче вимагатиме додаткових теоретичних і експериментальних досліджень .

1. Левин М. А., Фуфаев Н. А. Теория качения деформируемого колеса. — М.: Наука, 1989. — 272 с. — ISBN 5. 02–014010 — 4.

2. There — Wheel Passenger Vehicle Stability and Handling. Paul G. Van Valkenburg and Richard H. Klein Systems Technology, Inc. Hawthorne, CA, Joseph Kaniastra, Office of Passenger Vehicle Research, National High-way Traffic Safety Administration, Washington, D. C. Copyright 1982 Society of Automotive Engineers, inc. Nonlinear Dynamics of a Wheeled Vehicle Advances in Mechanics and Mathematics Volume 10 By Ryszard Andrzejewski Jan Awrejcewicz Springer Science + Business Media, Inc., 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA

3. Метелицын И. И. Теория гироскопа. Теория устойчивости. Избранные труды. М.: Наука, 1977. — 130 с.

4. Мартыненко Ю. Г. Динамика мобильных роботов//Соросовский образовательный журнал. — 2005. —

№ 5 — С. 110–116.

5. Введение в теорию устойчивости колесных экипажей и рельсового пути: Монография/В. Вербицкий, А. Новак, Э. Даниленко, М. Ситаж. — Донецк: «Вебер» (Донецкое отделение), 2007–255 с.

6. Лобас Л. Г., Вербицкий В. Г. Об устойчивости движения транспортных машин с учетом колебаний управляемого колесного модуля//Прикладная механика. — 1995. — № 4 — С. 86–93.

Рокар И. Неустойчивость в механике. — М.: Изд-во иностр. лит., 1959, — 288 с.

Стаття надійшла до редакції 23.09.2015.