

© В.П. Франчук<sup>1</sup>, К.А. Зіборов<sup>1</sup>, С.О. Федоряченко<sup>1</sup>, М.С. Цонда<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ПРИ ПОВОРОТІ З УРАХУВАННЯМ БІЧНОГО ПРОСЛИЗАННЯ КОЛІС

© V. Franchuk<sup>1</sup>, K. Ziborov<sup>1</sup>, S. Fedoriachenko<sup>1</sup>, M. Tsonda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## DETERMINATION OF ELECTRIC VEHICLE PARAMETERS FOR TURNING WHILE SIDEWAYS

**Мета.** Визначити параметри руху передньопривідного електромобіля на заокругленні з урахуванням бічного прослизання коліс.

**Методика дослідження** полягає в створенні математичної моделі використовуючи розрахункову схему передньопривідного легкового електромобіля при русі на заокругленні із урахуванням тягового зусилля в точці контакту колеса і дорожнього покриття.

**Результати дослідження.** Розглянуто модель руху колес передньопривідного легкового електромобіля як абсолютно твердих тіл а також при еластичній взаємодії поверхні колеса з дорожнім покриттям. Визначено параметри руху на прямій ділянці та заокругленні дороги із урахуванням бічного прослизання коліс при різних умовах зусилля гальмування і тягового зусилля на дорогах з різним покриттям при швидкості.

**Наукова новизна.** Встановлено вплив характеристик дорожнього покриття та траєкторії руху на параметри руху електричного та гібридного легкового автомобіля. В модель взаємодії вихідних ланок легкового електромобіля введено коефіцієнт форми взаємодії колеса при поздовжньому та поперечному (бічному) русі, який встановлює зв'язок між параметрами зовнішнього навантаження, пружними характеристиками матеріалу та ін. Визначено величини відносної деформації, при якій спостерігається максимум тягового або гальмівного зусилля.

**Практичне значення.** Використовуючи розрахункову схему передньопривідного легкового електромобіля при русі на заокругленні складена математична модель руху електромобіля, що реалізує тягове зусилля в точці контакту колеса и дорожнього покриття. Визначені залежності зусилля гальмування и тягового зусилля електромобіля, що може бути використано у реалізації алгоритмів систем курсової стійкості для досягнення оптимальної траєкторії руху. Визначено показники граничних траєкторій руху електромобіля при бічному ковзанні коліс в межах кріпа.

**Ключові слова:** система курсової стійкості, електромобіль, дорожнє покриття, математична модель.

**Вступ.** В умовах дефіциту енергоресурсів і посилення екологічних вимог інноваційні транспортні засоби такі, як електромобілі, є одними з найбільш перспективних видів транспортних засобів [1, 2]. Зростаючі тенденції використання легкових автомобілів з електричним приводом ставлять нові завдання для визначення параметрів руху та їх впливу на вивчення динаміки транспортного засобу для забезпечення курсової стійкості транспортного засобу. Зниження маси кузова і забезпечення його аеродинамічності, збільшення максимальної швидкості

і динаміки розгону, підвищення стійкості, керованості, плавності ходу, впровадження мехатроніки – основні орієнтири для заходів щодо вдосконалення конструкції електромобілів і розробці рекомендацій з безпеки їх експлуатації [3].

**Актуальність досліджень.** Визначення параметрів керованості в критичних ситуаціях руху можливо із застосуванням систем контролю курсової стійкості [4]. Сучасні засоби комп'ютерного моделювання дозволяють аналізувати і оптимізувати системи безпеки руху при дослідженні динаміки руху. Неповна ясність причинних зв'язків в процесах, що відбуваються в зоні взаємодії коліс автомобіля з дорожнім покриттям і впливають на їх зчеплення, відсутність вироблених критеріїв оцінки параметрів, що описують ці процеси, і різноманіття діючих випадкових факторів [3, 4] не дозволяють поки застосовувати повні просторові нелінійні розрахункові схеми, що описують в комплексі всі види переміщень, що впливають на основний рух автомобіля, і встановити залежності, необхідні для розрахунку його параметрів. Таким чином, математична модель в цілому повинна відповідати поставленим завданням. Результати розрахунків, отримані за допомогою раніше застосовуваних і апробованих підходів, повинні бути співставні і не повинні суперечити наявним експериментальним даним.

Відмінною особливістю електромобіля є відносно коротка база і мала, у порівнянні з вантажними автомобілями, жорсткість коліс в бічному і вертикальному напрямку, відносно велика гранична швидкість кріпа. Все це впливає на величини заносу транспортного засобу і на його стійкість при повороті. При повороті (рис. 1) на колеса діють як поздовжні, пов'язані з тяговим зусиллям  $S_{ln}$ ,  $S_{nn}$  сили, або сили опору  $S_{лз}$ ,  $S_{пз}$ , так і поперечні зусилля, зумовлені доцентровими силами  $P_{ln}$ ,  $P_{nn}$ ,  $P_{лз}$ ,  $P_{пз}$ .

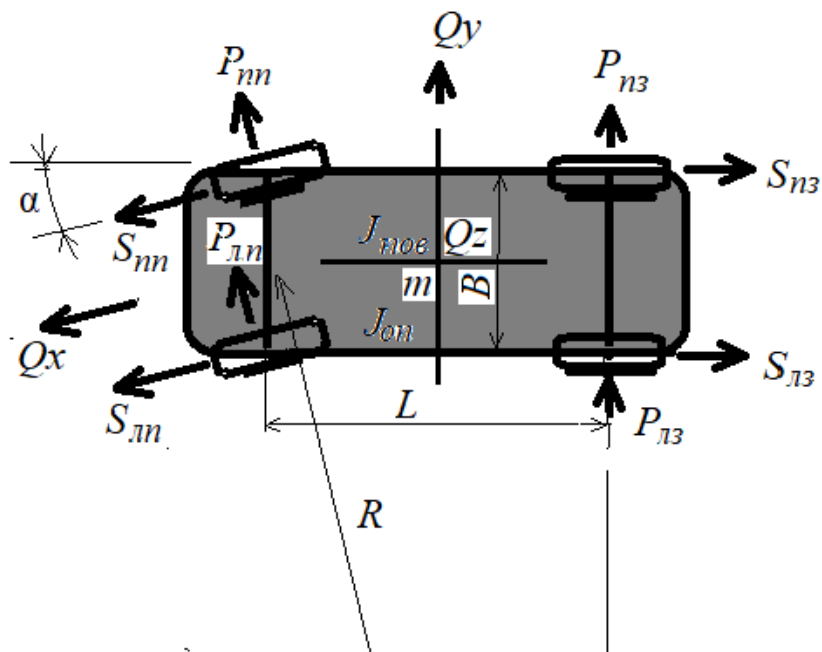


Рис. 1. Розрахункова схема при русі передньопривідного електромобіля на заокругленні

При припущенні про ідеальний, кінематичному підході до процесу повороту екіпажу, при повороті передніх коліс на кут  $\alpha$  центр ваги екіпажу буде рухатися по круговій траєкторії з радіусом:

$$R = \frac{1}{2} \frac{L}{\sin \alpha} (1 + \cos \alpha), \quad (1)$$

де  $L$  - база електромобіля.

При швидкості автомобіля  $V$  доцентрова сила, що діє на автомобіль:

$$P_{ун} = \frac{mV^2}{R}, \quad (2)$$

Опрокидуюча сила, яка веде до нерівномірності навантаження на колеса:

$$P_{он} = \frac{2P_{ун}z_{цт}}{B}. \quad (3)$$

де  $V$  – швидкість електромобіля в поздовжньому напрямку;  $Z_{цт}$  – положення центра ваги електромобіля;  $B$  – ширина колії електромобіля.

Тоді нормальне навантаження на праві колеса електромобіля становитимуть:

$$N_{nn} = N_{nz} = \frac{mg}{4} + \frac{P_{он}}{2}, \quad (4)$$

На ліві:

$$N_{ln} = N_{lz} = \frac{mg}{4} - \frac{P_{он}}{2}. \quad (5)$$

Сила опору руху задніх коліс електромобіля складе:

$$S_{nz} = \mu_c N_{nz}, \quad S_{lz} = \mu_c N_{lz}. \quad (6)$$

Сумарне тягове зусилля передніх коліс складається з зусилля опору всіх коліс і зусилля опору самого електромобіля:

$$S_{сум} = S_{nn} + S_{ln} = \mu_c N_{nz} + \mu_c N_{lz} + \mu_n N_{nn} + \mu_n N_{ln} + S_{\varepsilon}, \quad (7)$$

де  $\mu_c$  – сумарний еквівалентний опір;  $\mu_n$  – еквівалентний опір підшипників колеса;  $S_{\varepsilon}$  – сила опору руху екіпажу.

Бічна сила опору коліс залежить від нормального навантаження і від швидкісних параметрів коліс. У спрощеному варіанті ці сили будуть рівні:

$$P_{nn} = P_{ln} = P_{nz} = P_{lz} = \frac{mV^2}{4R}. \quad (8)$$

Таким чином ми визначили сили, що діють на всі колеса, розглядаючи їх як абсолютно тверді тіла, без урахування взаємодії з опорною поверхнею.

Насправді при еластичній взаємодії поверхні колеса з опорною поверхнею при наявності зсувного навантаження буде мати місце деформація зсуву. В залежності від величини зсувного навантаження, нормального навантаження при контакті колеса з опорною поверхнею, швидкості взаємодії поверхонь, фізико-механічних властивостей контактуючих поверхонь відносний рух поверхонь буде або в межах кріпа, або з інтенсивним прослизанням поверхонь [3, 4, 6].

Аналітично це виглядає як:

$$S_{nn} = \mu_0 N_{nn} \chi_{+n}, S_{ln} = \mu_0 N_{ln} \chi_{+n}, S_{nz} = \mu_0 N_{nz} \chi_{-n}, S_{lz} = \mu_0 N_{lz} \chi_{-n}$$

$$P_{nn} = \mu_0 N_{nn} \chi_{\bar{o}}, P_{ln} = \mu_0 N_{ln} \chi_{\bar{o}}, P_{nz} = \mu_0 N_{nz} \chi_{\bar{o}}, P_{lz} = \mu_0 N_{lz} \chi_{\bar{o}},$$

де  $\mu_0$  – коефіцієнт, що враховує властивості матеріалів контактуючих тіл.

Коефіцієнт форми взаємодії колеса при поздовжньому русі ( $\kappa_n < 0$  для передніх, ведучих коліс,  $\kappa_n > 0$  для задніх коліс):

$$\chi_{\pm n} = \frac{-\kappa}{\delta \kappa^2 V + \beta \kappa + \lambda}. \quad (9)$$

Коефіцієнт форми взаємодії колеса при поперечному русі:

$$\chi_{\bar{o}} = \frac{-\kappa_{\bar{o}}}{\delta \kappa_{\bar{o}}^2 V + \beta \kappa_{\bar{o}} + \lambda}, \quad (10)$$

де  $\kappa = \frac{v}{V}$  – відносна швидкість ковзання контактуючих елементів;  $V$  – швидкість переміщення точки контакту;  $\beta, \delta, \lambda$  – коефіцієнти, що враховують вплив тривалості контакту, спосіб прикладання навантаження, пружні характеристики матеріалу, характер розподілу виступів шорсткості поверхні контактуючих тіл.

Слід зазначити, що функція  $\chi$  буде різною при русі колеса в тяговому або в гальмівному режимах, коли швидкість ковзання позитивна. Причому, в останньому випадку коефіцієнт зчеплення колеса з дорогою вище.

Визначимо параметри зчеплення колеса з дорогою. В роботі [5] наведено експериментальні дані по зчепленню автомобільної шини з поверхнею. На рис. 2-4 представлені графіки зчеплення шин з поверхнею руху при різних відносних швидкостях ковзання поверхонь. Як бачимо, на всіх графіках явно виражена зона кіри і зона повного ковзання.

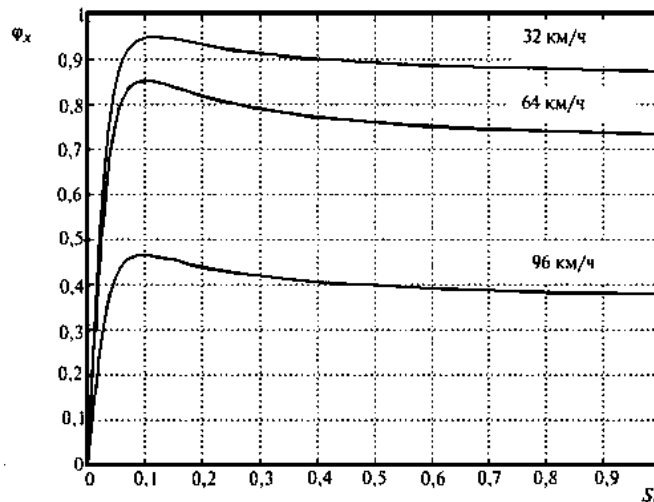
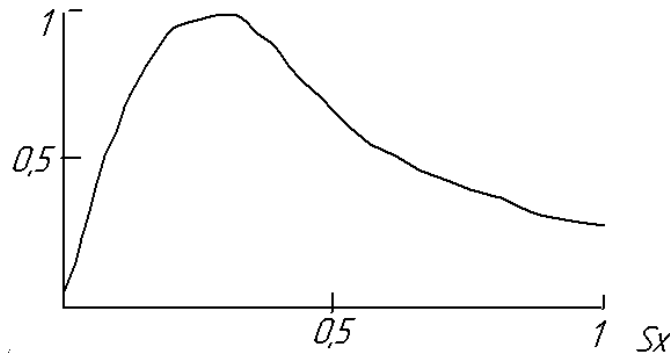
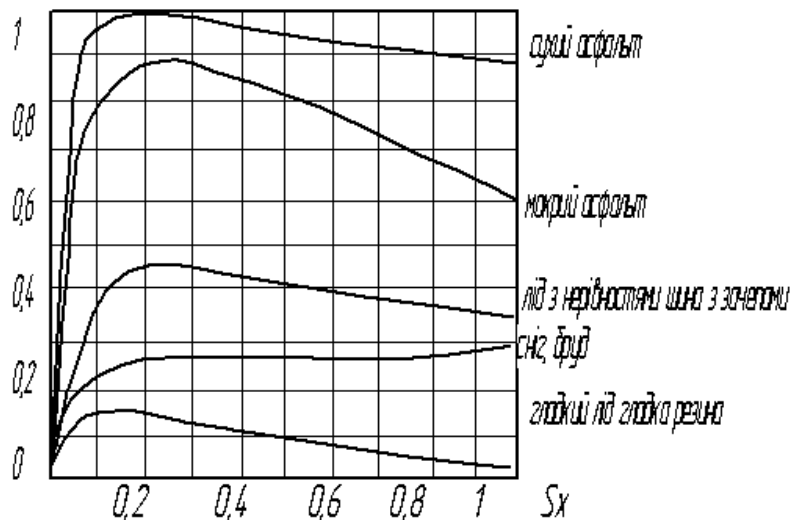


Рис. 2. Залежність характеру  $\phi_x - x - S_x$  діаграми від швидкості автомобіля (режим гальмування)

Рис. 3.  $\phi_x$  \_  $x$  \_  $S$  \_діаграма в тяговому режиміРис. 4.  $\phi_x$  \_  $x$  \_  $S$  \_діаграми для різних поверхонь в гальмівному режимі

*Рух на прямій ділянці дороги.* Аналітично цей процес досить добре описується виразом (1) [6]. Цей вираз характеризує залежність величини зчеплення від відношньої швидкості проковзування  $\kappa$  поверхонь колеса і покриття, швидкості переміщення осі колеса. Загальна характеристика дороги визначається за допомогою коефіцієнта  $\mu_0$ .

Таким чином, залежність тягового зусилля колеса  $Q_x$  від нормального навантаження  $Q_z$  на нього (рис.1) буде мати вигляд:

$$Q_x = Q_z \mu_0 \frac{\kappa}{\delta(\kappa)^2 V + \beta \kappa + \lambda}, \quad (11)$$

На рис. 5 представлений графік залежності зусилля гальмування і тягового зусилля електромобіля масою  $m = 1520$  кг при русі по сухому асфальту при швидкості  $V = 18 \dots 150$  км/год. Як бачимо, тягова здатність електромобіля значно знижується з ростом швидкості  $V$ . Також різко знижується і гальмівна здатність електромобіля, особливо при різкому гальмуванні при відношній швидкості  $\kappa < 0,1 \dots 0,2$ . На практиці особливо це помітно при розгоні і гальмуванні на дорогах з різним покриттям.

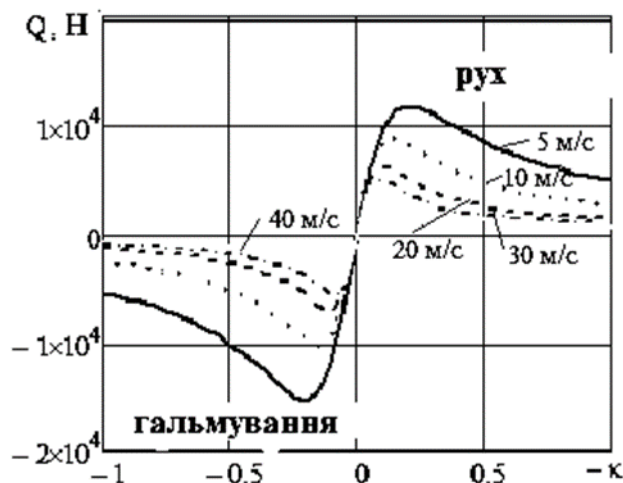


Рис. 5. Залежність коефіцієнта, що характеризує тягове і гальмівне зусилля колеса від швидкості відносного ковзання при різній швидкості руху

Слід зазначити, що приблизне значення коефіцієнта зчеплення для різних покриттів наступне [3, 4]: сухий асфальт  $\mu_o = 0,8$ ; мокрий асфальт  $\mu_o = 0,6$ ; лід  $\mu_o = 0,35$ ; сніг, бруд  $\mu_o = 0,2$ .

На рис. 6 показаний графік гальмування і тягової здатності при русі електромобіля на швидкості  $V = 70$  км/год на прямій ділянці дороги з зазначеними вище варіантами покриття. Від зміни характеристики дорожнього покриття істотно залежить величина тягового і гальмівного зусилля, але залишається незмінною величина відносної деформації, при якій спостерігається максимум тягового або гальмівного зусилля.

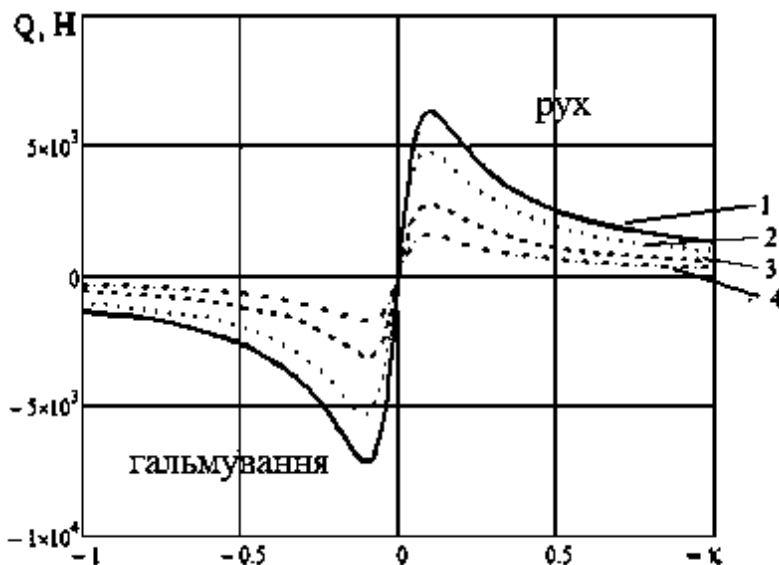


Рис. 6. Гальмівна і тягова характеристики електромобіля масою  $m = 1520$  кг при русі по прямій на дорогах з покриттям: 1 – сухий асфальт; 2 – мокрий асфальт; 3 – нерівний лід, шини з зачепами; 4 – сніг, бруд

*Рух на заокругленні.* Окрім тягового і гальмівного зусилля на електромобіль будуть діяти і бічні сили, що призводять до його заносу. Вважаємо, що поверхні коліс на заокругленні радіусом  $R$  (1) рухаються в режимі кріпа в поздовжньому і поперечному напрямках. Знаючи навантаження на колеса (3-5) і силу бічного віднесення (2), визначимо усереднену величину відносної швидкості бічного прослизання. Оскільки умови для бокового зміщення передніх і задніх коліс однакові, визначимо  $\kappa$  для однієї пари коліс:

$$\frac{P_{ин}}{2\mu_0}(\delta\kappa^2 V_{лн} + \beta\kappa + \lambda)(\delta\kappa^2 V_{нн} + \beta\kappa + \lambda) +$$

$$+ N_{лн}(\delta\kappa^2 V_{нн} + \beta\kappa + \lambda) + N_{нн}(\delta\kappa^2 V_{лн} + \beta\kappa + \lambda) = 0 \quad (12)$$

де:

$$V_{лн} = V \frac{2R - B}{2R}, \quad V_{нн} = V \frac{2R + B}{2R} \quad (13)$$

де  $B, R$  – ширина колії і радіус заокруглення при повороті відповідно.

З рівняння четвертого ступеня (12) знаходиться усереднене значення  $\kappa$ , після чого визначається фактична траєкторія електромобіля при ковзанні коліс в межах кріпа. Можна визначити також граничне значення швидкості електромобіля.

Без урахування прослизання коліс електромобіль буде рухатися по колу радіусом  $R$ , при відповідному куті привідних коліс  $\alpha$  (1). Вважаючи, що передні і задні колеса електромобіля знаходяться в однакових умовах взаємодії з покриттям дороги, визначимо їх граничний радіус повороту без катастрофічного занесення електромобіля при даній швидкості. За відносної швидкості проковзування коліс визначаємо фактичну траєкторію руху.

У декартовій системі координат траєкторія руху ідеальна і визначиться як:

$$x = R \sin(\omega t), \quad y = R \cos(\omega t) \quad (14)$$

$$x_{\phi} = [R + V(-\kappa)t] \sin(\omega t), \quad y_{\phi} = [R + V(-\kappa)t] \cos(\omega t),$$

де  $\omega = \frac{V}{R}$  – кутова швидкість руху електромобіля при русі на заокругленні;

$t$  – поточне значення часу від початку повороту.

На рис. 7 представлені графіки граничних траєкторій руху електромобіля при бічному ковзанні коліс в межах кріпа.

Як бачимо, зі збільшенням швидкості руху збільшується і радіус допустимого заокруглення від 3,8 м при швидкості 18 км/год до 550 м при швидкості  $V = 40$  м/с. При цьому занос електромобіля складе від 1 до 50 м.

Розрахунки були зроблені за спрощеними виразами, з усередненням параметрів. Насправді траєкторія руху передніх і задніх коліс будуть відрізнятися, а саме, радіуси заокруглень:

$$R_n = \frac{L}{\sin \alpha}, \quad R_n = \frac{L}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (15)$$

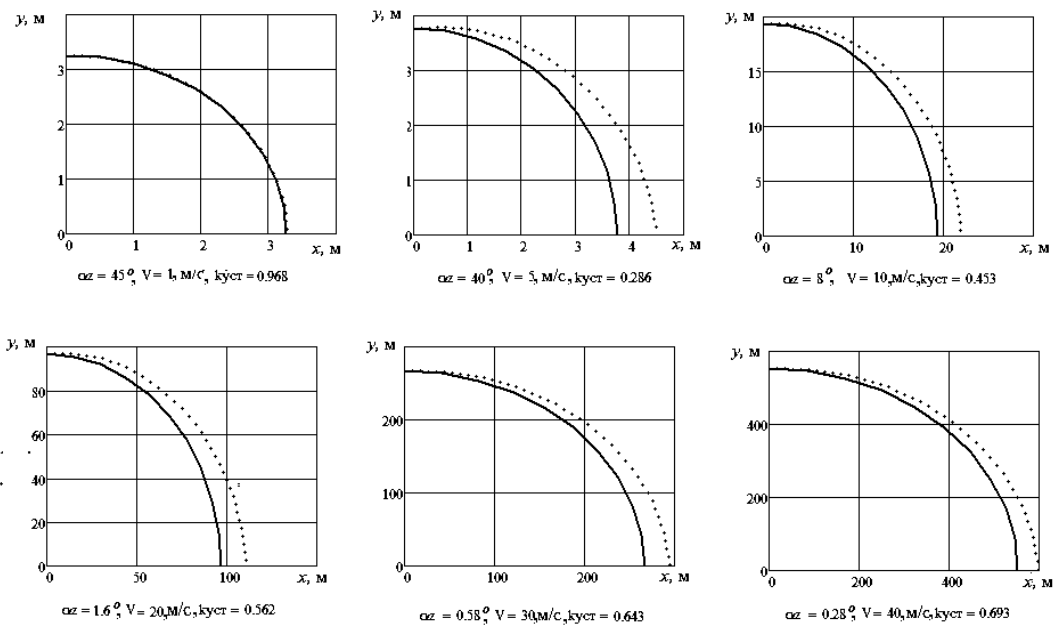


Рис. 7. Траєкторії граничних значень повороту електромобіля при різних швидкостях руху по сухому асфальту

Відповідно, і коефіцієнт  $k$  визначається для передніх і задніх коліс згідно до виразів (12) і (13). На рис. 8 представлені траєкторії руху передніх і задніх коліс при швидкості електромобіля  $V = 10 \text{ м/с}$  для кута повороту передніх коліс  $\alpha = 8^\circ$ .

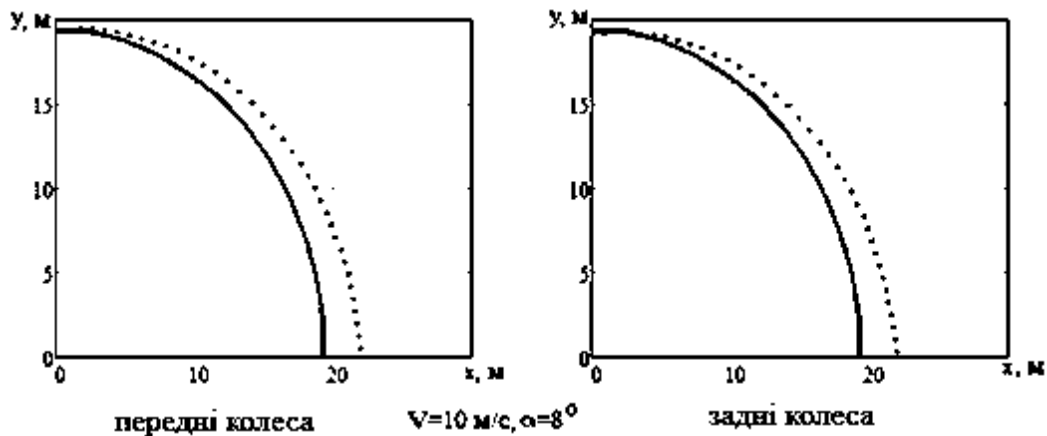


Рис. 8. Траєкторія руху передніх і задніх коліс електромобіля

Як видно з графіків, при даній швидкості різниця в траєкторіях передніх і задніх коліс майже непомітна -  $k$  відповідно дорівнює 0,089 і 0,091, радіуси заокруглень рівні 19,4 і 19,21 м. При менших швидкостях різниця в траєкторіях буде більш помітна.



**Висновки.** Резюмуючи викладене, можна сказати, що зі збільшенням швидкості руху зчеплення коліс з дорожнім покриттям зменшується як при русі, так і при гальмуванні. Особливо інтенсивно зчеплення зменшується при малих швидкостях руху. При  $V = 90$  км/год зчеплення досить низьке. Прі русі на заокругленні зі збільшенням швидкості руху радіус траєкторії, при якій не буде неконтрольованого ковзання коліс, збільшується пропорційно квадрату швидкості руху. Відповідно, для реалізації системи курсової стійкості необхідно контролювати швидкість кожного колеса та керувати його гальмівним моментом для досягнення оптимальної траєкторії руху.

#### Перелік посилань

1. Українці купують все більше електрокарів – бестселером залишається Nissan Leaf (2019, Жовтень 8) Retrieved from <https://www.unian.ua/economics/transport/10712364-ukrajinci-kupuyut-vse-bilshe-elektrokariv-bestseleerom-zalishayetsya-nissan-leaf.html>
2. Гірін, В.С., & Гірін, І.В. (2017) Сучасний стан електромобільного транспорту та його перспективи в Україні. *Гірничий вісник*. 102, 21-25.
3. Эллис, Д. Р. (1975) *Управляемость автомобиля*. Москва: «Машиностроение».
4. Бутин, Д.А., Тумасов, А.В., Вашурин, А.С., Аникин, А.А., & Палутин, Ю.И. (2010) Исследования режимов качения пневматической шины при испытаниях управляемости и устойчивости. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 3 (122), 107-110.
5. Морозов, М.В., & Купреянов, А.А. (2012) Влияние тепловых процессов на трибологические характеристики контакта шины с дорожной поверхностью и вид диаграммы  $\mu(S)$  для различных режимов работы колеса. *Известия вузов «Машиностроение»*. 7, 42-51
6. Franchuk, V.P., & Ziborov, K.A. (2017) *Взаємодія тіл з рухомою точкою контакту. Монографія*. Дніпро: ДВНЗ «Національний гірничий університет»

#### ABSTRACT

**Goal.** Determine the parameters of the movement of the front-wheel drive electric vehicle on a rounding taking into account the lateral slippage of the wheels.

**The methodology** of the study is to create a mathematical model using the design of the front-wheel drive electric car when driving on a rounding, taking into account the tractive force at the point of contact of the wheel and the road surface.

**Results of the research.** The model of wheel motion of a front-wheel-drive electric car as absolutely solid bodies and at elastic interaction of a wheel surface with a road surface is considered. The parameters of traffic on a straight section and rounded roads were determined taking into account the lateral slippage of wheels under different conditions of braking force and traction on roads with different coverage at speed.

**Scientific novelty.** The influence of pavement characteristics and driving trajectory on the parameters of electric and hybrid passenger car traffic is established. In the model of the interaction of the output units of a passenger electric vehicle, the coefficient of the form of the interaction of the wheel at longitudinal and transverse (lateral) movement is introduced, which establishes a connection between the parameters of the external load, the elastic characteristics of the material, etc. The magnitudes of relative deformation at which maximum traction or brake force is observed are determined.

**Practical meaning.** Using a calculated scheme of a front-wheel-drive electric car when driving on a rounding, a mathematical model of the motion of the electric-motor is drawn up, which implements traction at the point of contact of the wheel and the road surface. The dependences of the braking

force and the traction force of the electric vehicle have been determined, which can be used in the implementation of algorithms of systems of course stability for achievement of the optimum trajectory of movement. Indicators of the boundary trajectories of the electric vehicle motion in the lateral sliding of the wheels within the fence are determined.

**Keywords:** *course stability system, electric car, road surface, mathematical model.*

### **АННОТАЦИЯ**

**Цель.** Определить параметры движения переднеприводного электромобиля на закруглении с учетом бокового проскальзывания колес.

**Методика исследования** заключается в создании математической модели используя расчетную схему переднеприводного легкового электромобиля при движении на закруглении с учетом тягового усилия в точке контакта колеса и дорожного покрытия.

**Результаты исследования.** Рассмотрена модель движения колес переднеприводного легкового электромобиля как абсолютно твердых тел а также при эластичной взаимодействия поверхности колеса с дорожным покрытием. Определены параметры движения на прямом участке и закруглении дороги с учетом бокового проскальзывания колес при различных условиях усилия торможения и тягового усилия на дорогах с различным покрытием при скорости.

**Научная новизна.** Установлено влияние характеристик дорожного покрытия и траектории движения на параметры движения электрического и гибридного легкового автомобиля. В модель взаимодействия исходных звеньев легкового электромобиля введено коэффициент формы взаимодействия колеса при продольном и поперечном (боковом) движении, который устанавливает связь между параметрами со-внешней нагрузки, упругими характеристиками материала и др. Определены величины относительной деформации, при которой наблюдается максимум тягового или тормозного усилия.

**Практическое значение.** Используя расчетную схему переднеприводного воздушного электромобиля при движении на закруглении составлена математическая модель движения электромобиля, реализует тяговое усилие в точке контакта колеса и дорожного покрытия. Определены зависимости усилия торможения и тягового усилия электромобиля, который может быть использовано в реализации алгоритмов систем курсовой устойчивости для достижения оптимальной траектории движения. Определены показатели предельных траекторий движения электромобиля при боковом скольжении колес в пределах кривой.

**Ключевые слова:** *система курсовой устойчивости, электромобиль, дорожное покрытие, математический модель.*