

УРАВНЕНИЕ НА ДВИЖЕНИЕТО НА ХОДОВО КОЛЕЛО КАТО ОБЕКТ НА МНОГОПАРАМЕТРОВО УПРАВЛЕНИЕ

Пенко Цветков Петков
ppetkov@vtu.bg

*катедра “Транспортна техника”
Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”, Гео Милев 158, София 1574,
БЪЛГАРИЯ*

Ключови думи: автомобилно колело; моменти, действащи върху колелото; уравнение на движението; коефициент на сцепление; управляем обект; изходни параметри

Резюме. От взаимодействието на ходовото колело с опорната повърхност зависят редица експлоатационни свойства на автомобила. Търкалянето на колелото спрямо пътя е обект на управление на някои от вградените в автомобила електронни системи. Функционирането на алгоритмите на системите за контрол и управление на движението на автомобила в реални експлоатационни условия се базира на обобщеното математическо описание на търкалянето на колелото. При създаване на математически модел на движението на колелото основна задача е обективното представяне на процеса на взаимодействие на пневматичната гума с пътната повърхност.

В работата е представен процесът на нестационарно търкаляне на автомобилно колело с еластична пневматична гума върху недеформируемо пътнo покритие като обект на свързано управление под съвместното въздействие на различни входни параметри. Изходните параметри на колелото, подлежащи на управление са ъгловата му скорост на въртене, постъпателната скорост и относителното буксуване (относително преплъзване). Изведено е диференциално уравнение на движението на колелото, чрез което могат да се определят изходните му параметри. Това предоставя възможност за изследване на характеристики на системите за управление движението на автомобила при различни експлоатационни режими в съответствие с регулиращите и смущаващи въздействия върху колелата.

УВОД

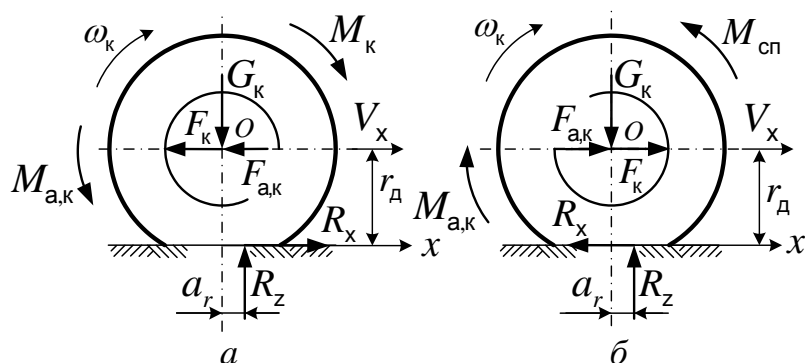
В условията на непрекъснато нарастване броя на автомобилите в световен мащаб и наситения транспортен трафик, проблемите на безопасността на движение придобиват все по-голяма актуалност. Повишаването на безопасността на движението има важна социална и икономическа значимост и е един от кардиналните проблеми на автомобилизацията. Едно от перспективните направления за решаване на проблемите на безопасността на движение на автомобилите, развивано от водещите фирми-производители, е създаването на системи за активна безопасност и повишаване нивото

на комфортност на управлението им. Техническите възможности на вградените в автомобилите съвременни бордови компютри позволяват управление на сложни системи в условия на непрекъснати въздействия от външната среда. Взаимодействието на ходовото колело с пътната повърхност, от което зависят редица експлоатационни свойства на автомобила, е един от обектите на управление от електронните системи.

1. Състояние на проблема – анализ на последни публикации

Особеностите на взаимодействието между автомобилното колело и пътното покритие при различни режими на търкаляне са отразени в редица теоретични и експериментални изследвания [1], [3], [8]. Режимите на търкаляне се определят от приложените към колелото външни сили и моменти и реакциите от страна на опорната повърхност. Важно свойство на търкалящо се колело, намиращо се под въздействие на вертикално натоварване, е да предава или възприема тангенциални сили, т. е. осъществяване на сцепление между гумата и опорната повърхност. По такъв начин се осигуряват възможности за режими на движение или спиране на автомобила. За оценка на това свойство е приет коефициентът на сцепление между пневматичната гума и опорната повърхност [8].

От съвременните автомобилни електронни системи важно място за осигуряване режимите на търкаляне на колелото имат противоблокиращата (ABS) /Anti-lock Braking System/ и противобуксуващата (ПБС) /Antriebs-Schlupf-Regelung (ASR), Traction Control System (TCS)/ система. Обикновено ABS и ASR са обединени в единна система, тъй като изпълняваните от тях функции са свързани с едни и същи физически процеси, произтичащи от взаимодействието на колелата на автомобила с пътя. Единната система осигурява автоматично поддържане на някои параметри на движението на автомобила в условията на промяна на състоянието на пътното покритие, а също и от влиянието на други фактори [2], [4].

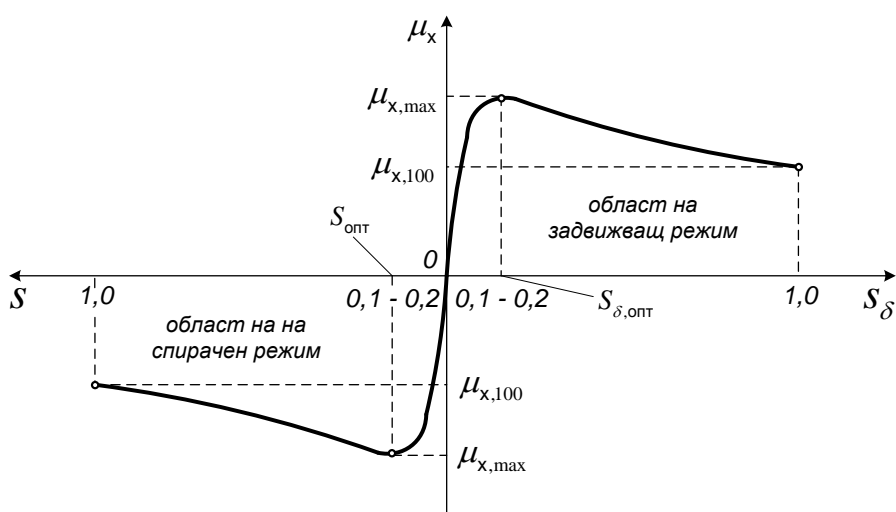


Фиг. 1. Основни режими на търкаляне на ходово колело:
а – задвижващ; б – спиращ

Управлението на процеса на търкаляне на автомобилното колело се осъществява в задвижващ и спиращ режим, за да се предотврати буксуването или преплъзването му [7]. На фиг. 1 са представени кинематични и силови параметри за тези основни режими на търкаляне на ходово колело върху недеформируема опорна повърхност. Кинематичните параметри на колелото са ъгловата му скорост на въртене ω_k , постъпателната скорост V_x , динамичният радиус r_d и изместването на нормалната реакция от пътя R_z на разстояние a_r по посока на движението. В задвижващ режим към колелото е приложен въртящият момент M_k , а в спиращ – спиращият $M_{сп}$, вследствие на които в контактната зона с пътя възниква тангенциалната реакция R_x

(R_x в задвижващ режим е движеща сила, а в спиращен – спираща сила). При ускорително или закъснително движение върху колелото действа инерционният момент $M_{a,k}$ и, съответно в оста му инерционната сила $F_{a,k}$.

В практиката като база при проектиране на противоблокираща и противобуксуваща система се използва характеристиката на коефициента на сцепление в надлъжно направление от изменението на относителното преплъзване S и относителното буксуване S_δ в контакта на пневматичната гума с опорната повърхност. На фиг. 2 е показана графичната зависимост на изменението на коефициента на сцепление на колелото μ_x от относителното буксуване и относителното преплъзване в контактната зона [6]. Максималната стойност на коефициента μ_x се реализира при $S_{\delta,opt}$ (S_{opt}) в границите 0,1 - 0,2 от S_δ (или S).



Фиг. 2. Зависимост на коефициента на сцепление от относителното буксуване и относителното преплъзване на колелото

В специализираните литературни източници не се срещат математически зависимости, изразяващи движението на автомобилното колело под въздействие на многопараметрово управление. Целта на разработката е да се изведе обобщено уравнение, описващо движението на ходовото колело, което да е адаптирано към алгоритъма за управление на режимите на работа на притивоблокиращата и противобуксуващата система на автомобила.

2. Представяне на основния материал

Обект на изследване в работата е нестационарно търкаляне на ходово колело с пневматична гума върху твърдо пътно покритие през преходния процес “задвижващ – спиращен режим” на движение. Чрез фиг. 3 е илюстрирана функцията на колелото при въздействие на входните силови параметри (въртящия M_k и спиращия $M_{сп}$ момент). Предмет на управление е взаимодействието на пневматичната гума с опорната повърхност, т. е. взаимовръзката между входните параметри на колелото и неговите изходни кинематични параметри (ъгловата скорост ω_k , изминатият път S_x и постъпателната скорост на движение V_x).



Фиг. 3. Схема на предавателната функция на ходово колело

При съставяне на уравнението на въртене на ходовото колело около оста му за обобщен случай на търкаляне се използва теоремата за изменение на кинетичния момент. За главния момент на външните сили и моменти, приложени към колелото се получава

$$(1) \quad M_{\text{вн}} = M_{\text{а,к}} + M_{\text{а,е}} + M_{\text{а,т}},$$

където $M_{\text{а,к}}$ е инерционният момент на колелото; $M_{\text{а,е}}$ - инерционният момент на двигателя, приведен към оста на колелото; $M_{\text{а,т}}$ - приведеният към оста на колелото сумарен инерционен момент на всички въртящи се маси от трансмисията.

Инерционните моменти в дясната част на уравнение (1) се определят от изразите

$$M_{\text{а,к}} = J_{\text{к}} \frac{d\omega_{\text{к}}}{dt};$$

$$M_{\text{а,е}} = J_{\text{е}} \frac{d\omega_{\text{е}}}{dt} = J_{\text{е}} u_{\text{т}} \frac{d\omega_{\text{к}}}{dt};$$

$$M_{\text{а,т}} = J_{\text{т,и}} \frac{d\omega_{\text{т,и}}}{dt} = \sum_{i=1}^{n_{\text{м}}} (J_{\text{т,и}} u_{\text{т,и}}) \frac{d\omega_{\text{к}}}{dt},$$

където $J_{\text{к}}$, $J_{\text{е}}$ и $J_{\text{т,и}}$ са съответно масовите инерционни моменти на ходовото колело, двигателя (сума от инерционния момент на маховика и приведените към него инерционни моменти на подвижните детайли, кинематично свързани с коляновия вал) и i -та въртяща се маса от трансмисията на автомобила; $\omega_{\text{к}}$, $\omega_{\text{е}}$ и $\omega_{\text{т,и}}$ - ъгловите скорости на колелото, коляновия вал на двигателя и i -та маса от трансмисията; $u_{\text{т}}$ - общото предавателно число на трансмисията; $u_{\text{т,и}}$ - предавателното число от i -та маса на трансмисията до ходовото колело; $n_{\text{м}}$ - броят на включените въртящи се маси от трансмисията.

След заместване в уравнение (1) на инерционните моменти с техните изрази, за главния момент на колелото се получава

$$(2) \quad M_{\text{вн}} = \left[J_{\text{к}} + J_{\text{е}} u_{\text{т}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{м}}} (J_{\text{т,и}} u_{\text{т,и}}) \right] \frac{d\omega_{\text{к}}}{dt}.$$

В случай, че върху ходовото колело е приложено резултантно въздействие на задвижващ $M_{\text{к}}$ и спирачен $M_{\text{сп}}$ момент, главният момент на външните сили се определя от зависимостта

$$(3) \quad M_{\text{вн}} = M_{\text{к}} - M_{\text{сп}} - M_{\text{х,μ}} - M_{\text{f}},$$

където $M_{x,\mu}$ е моментът по сцепление, възникващ от тангенциалната реакция $R_{x,\mu}$ с пътната повърхност; M_f - съпротивителният момент от търкаляне на колелото.

Търсеният момент по сцепление се изчислява от израза

$$(4) M_{x,\mu} = R_{x,\mu} r_d = \mu_x R_z r_d,$$

където μ_x е коефициентът на сцепление на пневматичната гума с пътната повърхност в надлъжно направление; R_z - нормалната реакция от пътя; r_d - динамичният радиус на колелото.

Експериментално е установено, че коефициентът на сцепление на колелото μ_x в спирачен или в задвижващ режим на движение зависи от редица фактори като: скоростта на движение V_x , ъгловата скорост на колелото ω_k , типът и състоянието на пътното покритие, видът на шарката на протектора на гумата, рецептурния състав на каучуковата смес на протектора и др. За изменение на коефициента на сцепление μ_x от основния фактор – относителното преплъзване S на колелото в процеса на спиране и, аналогично изменението му от относителното буксуване S_δ в задвижващ режим на движение на колелото, са предложени различни зависимости [1], [7].

Коефициентът на сцепление μ_x , както за задвижващ режим на движение, така и за режим на спиране на колелото може да се изрази с едно уравнение. Основен аргумент в уравнението е относителното буксуване S_δ или относителното преплъзване на колелото S . От графиката на фиг. 2 е видно, че за режимите относително буксуване / относително преплъзване коефициентът μ_x притежава само една максимална стойност. Следователно, за различни пътни условия функцията μ_x за режимите относително буксуване / относително преплъзване математически с достатъчна точност в границите на изменение на S_δ от 0 до $S_{\delta, \text{опт}}$ (или на S от 0 до $S_{\text{опт}}$) може да се представи чрез полином от втора степен. За задвижващ режим на колелото полиномът има вида

$$(5) \mu_x = a_0 + a_1 S_\delta + a_2 S_\delta^2,$$

където a_0 , a_1 и a_2 са апроксимиращи коефициенти, зависещи от типа и състоянието на пътното покритие и изходните характеристики на пневматичната гума.

Съпротивителният момент от търкаляне на колелото M_f се пресмята по известни зависимости [1], [5]. Задвижващият M_k и спирачния $M_{\text{сп}}$ момент се определят съответно за задвижващ или спирачен режим на движение на колелото. Като критерий за оценка на такъв режим се приема разликата $\Delta M = M_k - M_{\text{сп}}$.

След заместване на съставлящите на главния момент в израза (3), а след това в (2), се получава диференциалното уравнение на движението на $i^{\text{то}}$ ходово колело

$$(6) \left[J_k + J_e u_\tau + \sum_{i=1}^{n_m} (J_{\tau,i} u_{\tau,i}) \right] \frac{d\omega_k}{dt} + \mu_x R_z r_d + f R_z r_d = M_k - M_{\text{сп}},$$

където f е коефициентът на съпротивление при търкаляне.

$$(7) m \frac{dV_x}{dt} \delta_{b,k} = F_\Sigma,$$

Полученото уравнение на движение на колелото се решава съвместно с уравнението, описващо праволинейното постъпателно движение на автотранспортното средство

където m е пълната маса на автомобила; dV_x/dt - ускорението; $\delta_{в,k}$ - коефициентът, характеризиращ влиянието на въртящите се маси на k -та предавка в трансмисията; F_{Σ} - сумарната съпротивителна сила от външните въздействия.

3. Заключение

Изведено е обобщено диференциално уравнение, характеризиращо движението на ходово колело през преходния процес "задвижващ - спиращ режим" с отчитане на буксуването или преплъзването му. Чрез съвместното решение на уравнения (6) и (7) могат да се определят изходните параметри на управляемия обект при различни стойности на регулируемите входни величини M_k и $M_{сп}$ в границите на изменение на коефициента на сцепление $\mu_{x,min} - \mu_{x,max}$. Стойностите на моментите M_k и $M_{сп}$ се задават и управляват от бордовия компютър или от водача на автомобила.

Уравнение (5) може да се използва за повишаване точността при моделиране работата на системите за автоматично регулиране на моментите M_k и $M_{сп}$, приложени върху колелата. Резултатите могат да се прилагат при разработване и изследване на нови конструкции противоблокиращи и противобуксуващи системи в автомобилите.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1.] Бухин Б. Л. Введение в механику пневматических шин. М.: Химия, 1988. 224 с.
- [2.] Горелов В. А., А. И. Комиссаров, Б. Б. Косицын. Исследования движения автомобиля в программном комплексе автоматизированного моделирования динамики систем тел. Журнал автомобильных инженеров, № 1(96), 2016. с. 18 – 23.
- [3.] Гуськов В. В., А. А. Дзёма и др. Исследование процесса взаимодействия ведущих колес трактора с грунтовой поверхностью// Наука и техника, 2017, т. 16, № 1., с. 83 – 88.
- [4.] Kiencke U. and L. Nielsen. Automotive Control Systems – For Engine and Vehicle. Second edition. Springer – Berlin Heidelberg, 2005. 512 p.
- [5.] Lapshin V. P., I. A. Turkin. Modeling Tractive Effort Torque of Wheel in Deformation Movements of Pneumatic Tire Wheel. International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017 Procedia Engineering 206 (2017). pp. 594 – 599.
- [6.] Rill G. Wheel Dynamics. Proceedings of the XII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics. ABCM, Ilhabela, SP. Brasil, February 26 - March 2. 2007. 7 p.
- [7.] <http://www.springer.com>. Basic principles of vehicle dynamics. Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems Function, Regulation and Components. Reif K. (Ed), 2014, VIII. 275 p.
- [8.] <http://www.springer.com>. Mechanics of Wheel with Tire. The Science of Vehicle Dynamics, 2014, XII. 45 p.

AN EQUATION OF MOVEMENT OF THE DRIVING WHEEL AS AN OBJECT OF MULTIPARAMETER DEPENDENCY

Penko Tsvetkov Petkov

ppetkov@vtu.bg

*Department of Transport Engineering
Todor Kableshkov University of Transport, 158 Geo Milev Street, Sofia 1574
BULGARIA*

***Key words:** car wheel; moments acting on the wheel; motion equation; coefficient of friction; managed object; output parameters*

***Abstract:** The interaction between the wheel and the support surface depends on a number of vehicle performance properties. Rolling the wheel towards the road is the object of the management of some of the in-vehicle electronic systems. The operation of the algorithms embedded in the controlling systems of the movement of the car in real conditions is based on a generalized mathematical model of the rolling of the wheel. The main task in the mathematical model of the movement of the wheel is to create an objective and clear description of the process of interaction between the pneumatic tire and road surface.*

This work presents the process of non-stationary rolling of a pneumatic tire wheel on a non-deformable road surface as a subject of combined control with different input parameters. The output parameters of the wheel to be controlled are its angular speed, forward speed, and relative slip (relative slipping). A differential equation of wheel motion has been derived, whereby its output parameters can be determined. This provides an opportunity to study the characteristics of the vehicle's control systems in various modes of operation in accordance with the adjusting and disturbing effects on the wheels.