

**В. П. Ковбаса<sup>1</sup>**  
**А. В. Спірін<sup>1</sup>**  
**Д. В. Борисюк<sup>2</sup>**  
**І. В. Твердохліб<sup>1</sup>**

## **ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РУШІЯ КОЛІСНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ТА НЕРІВНОСТЕЙ ОПОРНОЇ ПОВЕРХНІ НА ШВИДКІСТЬ РУХУ ТА ЧАСТОТУ ЗБУРЮЮЧОЇ ДІЇ**

<sup>1</sup>Вінницький національний аграрний університет

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

*В статті досліджено питання впливу стану опорної поверхні і геометричних параметрів колеса трактора на швидкість його руху та частоту вібраційних коливань, які виникають при цьому. Це питання має значне теоретичне та практичне значення, адже викликані нерівностями дороги коливання рами і коліс спричиняють значне погіршення експлуатаційних показників роботи трактора.*

*Ці питання вивчались низкою дослідників, але вони мали різноманітний вузьконаправлений характер. Саме тому була поставлена задача розглянути більш глибоко зв'язок стану колеса і покриття з параметрами вібраційних коливань, які виникають під час руху.*

*При теоретичних дослідженнях був встановлений зв'язок довжини хорд колеса та нерівностями між двома точками контакту колеса. Рівняння опорної поверхні було представлено сіносоїдою зі змінним амплітудним коефіцієнтом. В залежності від співвідношення радіуса колеса та геометричних розмірів виступів та западин опорної поверхні були отримані дві групи рівнянь, які описують параметри вібраційних коливань. Результати аналітичних досліджень були проілюстровані відповідними геометричними залежностями.*

*Для перевірки теоретичних висновків були проведені експериментальні дослідження з системою вимірювання параметрів вібраційних коливань керованих мостів колісних сільськогосподарських тракторів. Дослідження виконували на двох варіантах дорожнього покриття. Результати експериментальних досліджень представлені графічно у вигляді осцилограм віброприскорення керованого моста трактора, а також у табличній формі.*

*Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показують, що між величиною радіуса колеса і параметрами вібраційних коливань існує обернена залежність. При збільшенні поступальної швидкості руху трактора параметри вібраційних коливань також зростають.*

**Ключові слова:** рушій транспортного засобу, нерівномірність опорної поверхні, швидкість руху, частота збурюючої дії, коливання, амплітудо-частотна характеристика, переміщення.

### **Вступ**

Під час руху по дорозі з нерівною поверхнею колісний транспортний засіб сприймає удари і зазнає коливань. Основними вузлами, які захищають колісний транспортний засіб від динамічної дії дороги і зводять вібрації до прийнятної рівня є підвіска (міст) і шини.

Багаторічний досвід показує, що нерівності дорожнього покриття і викликані ними коливання рами і коліс транспортного засобу спричиняють, як правило, погіршення всіх його експлуатаційно-технічних показників.

Колісний рушій транспортного засобу забезпечує оптимальну керованість, стійкість руху, довговічність і надійність роботи.

### **Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми**

Існує низка публікацій [1-13], з оглядом питань, пов'язаних з аналізом динамічної стійкості та плавності руху самохідних машин, проте необхідно звернути увагу на різноплановість цих робіт. В залежності від поставлених задач досліджень, прийнятої розрахункової схеми моделі, а також застосовуванням того чи іншого методу дослідження, в цих роботах приймався ряд припущень, які потребують узагальнення, а методи досліджень – подальшого розвитку та аналізу.

*Метою дослідження є розробка моделі зв'язку геометричних параметрів рушій колісного транспортного засобу та нерівностей опорної поверхні зі швидкістю руху та частотою збурюючої дії.*

## Результати досліджень

Переміщення рушія, в найпростішому випадку колеса машини по опорній поверхні, схематично, може бути представлений у вигляді схеми (рис. 1).

На схемі:  $r$  – радіус колеса,  $V$  – швидкість лінійного переміщення колеса (переносний рух),  $\omega$  – кутова швидкість перекочування колеса,  $h$  – висота нерівності (глибина нерівності),  $l$  – відстань між сусідніми виступами. За допомогою параметрів  $h$  та  $l$  можна описати нерівності гармонічною функцією в напрямку осі  $oy$ , де переміщення  $y$  буде аргументом функції збуреного вертикального переміщення рушія  $x$ .

Для аналізу двох можливих випадків збуреного вертикального руху рушія необхідно ввести функції довжин хорд колеса та нерівностей між двома точками контакту колеса з нерівностями опорної поверхні. Довжини хорд:

- нерівностей опорної поверхні

$$a_n = 2\sqrt{2h(l/4) - h^2}; \quad (1)$$

- колеса

$$a_k = 2\sqrt{2r(l/4) - r^2}; \quad l = 4h. \quad (2)$$

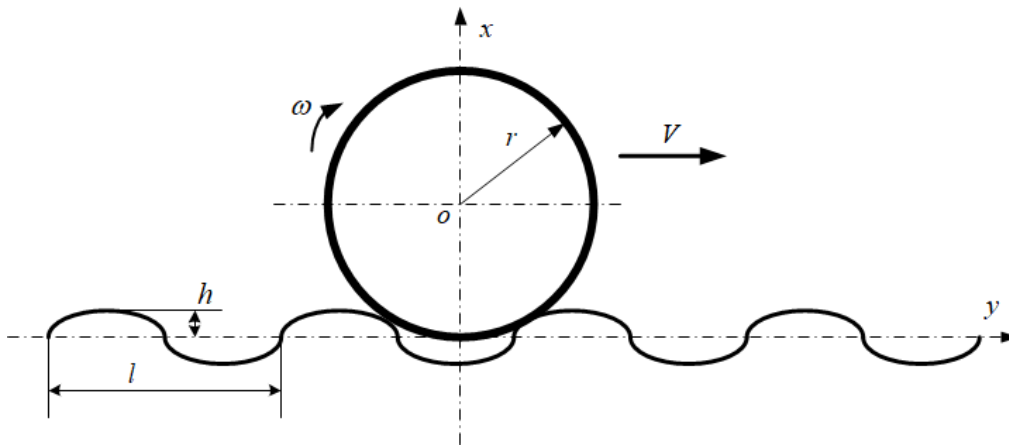


Рис. 1. Схема руху рушія (колеса) по криволінійній гармонічній опорній поверхні

Рівняння опорної поверхні може бути представлено у вигляді  $x = b(l/4)\sin[8y]$ , крива цієї поверхні має вигляд (в залежності від величини  $b$ ), що представлений на рис. 2.

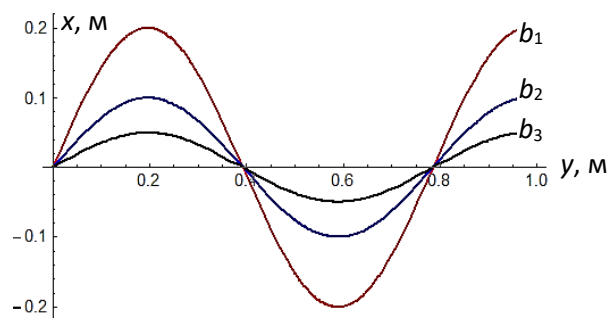


Рис. 2. Форма кривої опорної поверхні при різних значеннях коефіцієнта  $b$ ,  $b_1 > b_2 > b_3$

Можна розглянути виникнення вертикальних переміщень рушія при його русі по криволінійній опорній поверхні на прикладі руху колеса.

В такому випадку необхідно виділити два випадки руху такого рушія в залежності від співвідношень радіуса колеса та геометричних параметрів виступів та западин опорної поверхні.

*Випадок 1.*  $r \leq l/4$ ;  $a_k \leq a_n$ . Для такого випадку можливі вертикальні амплітуди переміщень осі колеса становитимуть:

$$x = b \left( \frac{k+n}{2} \right) h \sin[y]; \quad y \rightarrow \{l, ml\}; \quad m \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}; \quad l \rightarrow 4h, \quad (3)$$

де  $k, n$  – коефіцієнти, що враховують деформації колеса та опорної поверхні, відповідно.

Випадок 2.  $r \geq l/4$ ;  $a_k \geq a_n$ ;  $a_n = a_k$ . Для такого випадку можливі вертикальні амплітуди переміщень осі колеса становитимуть:

$$x_k = r - \sqrt{r^2 - (a_k^2/4)}, \quad a_k = a_n, \quad a_n = 2\sqrt{2h(l/4) - h^2}, \quad l = 4h; \quad (4)$$

$$x = \left(\frac{k+n}{2}\right) \left(r - \sqrt{-h^2 + r^2}\right) \sin[y]; \quad y \rightarrow \{l, ml\}; \quad m \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$$

Графічно вертикальні зміщення для цього випадку представлені на рис. 3.

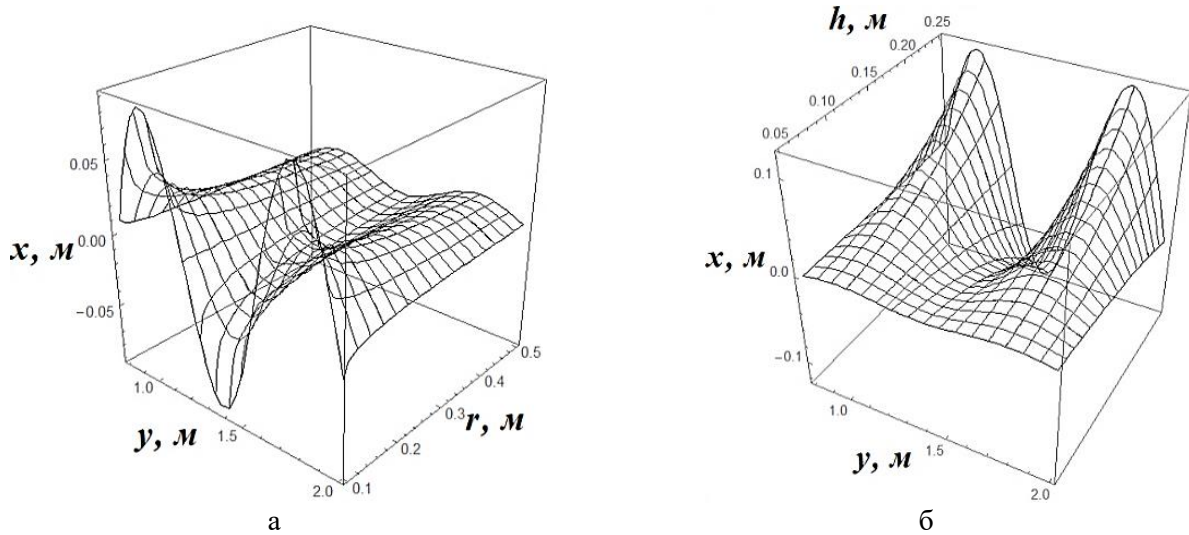


Рис. 3. Графіки залежності вертикальних переміщень осі колеса від його радіуса  $r$  при постійних параметрах профілю опорної поверхні (а) та від параметра профілю опорної поверхні  $h$  при постійному радіусі колеса (б)

Для встановлення частотних характеристик коливань колеса можна ввести заміну відстані переміщення через швидкість  $V$  і час  $t$ :  $y = Vt$ . В цьому випадку можна проаналізувати вертикальні переміщення колеса від часу (рис. 4).

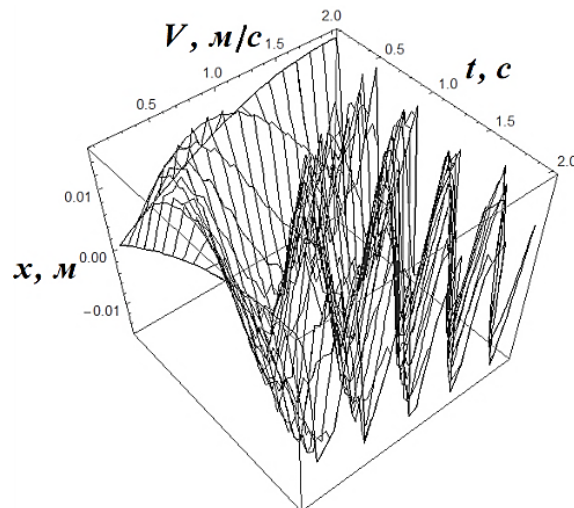


Рис. 4. Графік вертикальних переміщень осі колеса від швидкості переміщення машини  $V$

Після підстановки функції часу та швидкості в рівняння (2) та його диференціювання по часу можна отримати швидкість вертикальних переміщень осі колеса:

$$v_x = \frac{d}{dt} \left( \left( \left( \frac{k+n}{2} \right) \left( r - \sqrt{-h^2 + r^2} \right) \right) \sin[8Vt] \right) = 4(k+n) \left( r - \sqrt{-h^2 + r^2} \right) 8V \cos[8tV]. \quad (5)$$

Графічно залежність (3) представлена на рис. 5.

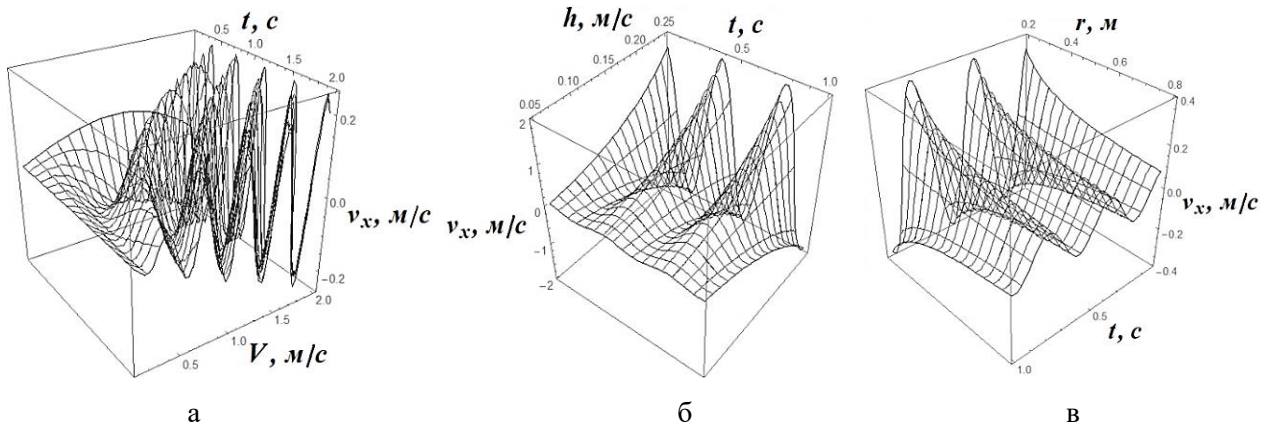


Рис. 5. Графічна інтерпретація швидкостей вертикальних переміщень осі колеса від поступальної швидкості  $V$  (а), профілю опорної поверхні  $h$  (б) та радіуса колеса  $r$  (в)

Для проведення експериментального дослідження зв'язку геометричних параметрів рушія колісного транспортного засобу та нерівностей опорної поверхні зі швидкістю руху та частотою збурюючої дії, застосували вимірювальну систему [14], схема якої представлена на рис. 6. Дослідження виконали на керованому мості трактора МТЗ-80.1 з шинами 7,5-20 ( $\text{Ø}910 \times 165$  мм) і 8,3-20 ( $\text{Ø}950 \times 180$  мм).

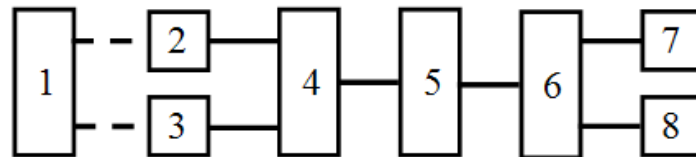


Рис. 6. Система діагностування керованих мостів колісних сільськогосподарських тракторів: 1 – керований міст трактора; 2, 3 – акселерометри; 4 – мультиплексор; 5 – аналого-цифровий перетворювач; 6 – обчислювальний пристрій; 7 – монітор; 8 – пристрій друкування

Експериментального дослідження виконаємо на таких типах дорожніх ділянок:

- асфальтована дорога (рис. 7, а);
- асфальтована дорога з перешкодою (рис. 7, б).



а



б

Рис. 7. Ділянки дорожнього покриття для проведення експерименту: а – асфальтована дорога; б – асфальтована дорога з перешкодою

Для визначення висоти нерівностей вибраних дорожніх ділянок скористались профілометром, який входить до складу пересувної лабораторії на базі автомобіля ГАЗ-32213.

Цей профілометр призначений не лише для вимірювання мікропрофілю дорожнього покриття, а й для визначення глибини колії. Він складається з дванадцяти ультразвукових датчиків, які працюють у зв'язці з іншими ультразвуковими датчиками, встановленими на автомобілі, які дають тривимірну картину поверхні дороги (рис. 8) з точністю до одного міліметра по відносній вертикальній складовій.

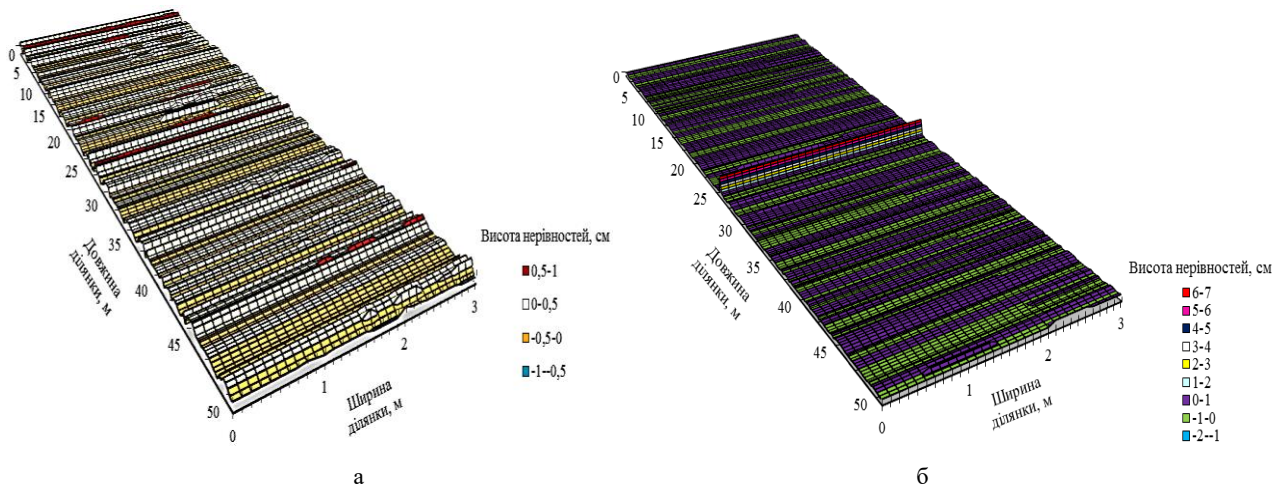


Рис. 8. Тривимірні моделі поверхонь ділянок дорожнього покриття для проведення експерименту:  
а – асфальтована дорога; б – асфальтована дорога з перешкодою

Враховуючи особливості конструкції керованого моста трактора МТЗ-80.1, прийняли що коливання керованих коліс еквівалентне коливанню керованого моста.

Результати проведення експериментального дослідження представлено на рис. 9 і в табл. 1.

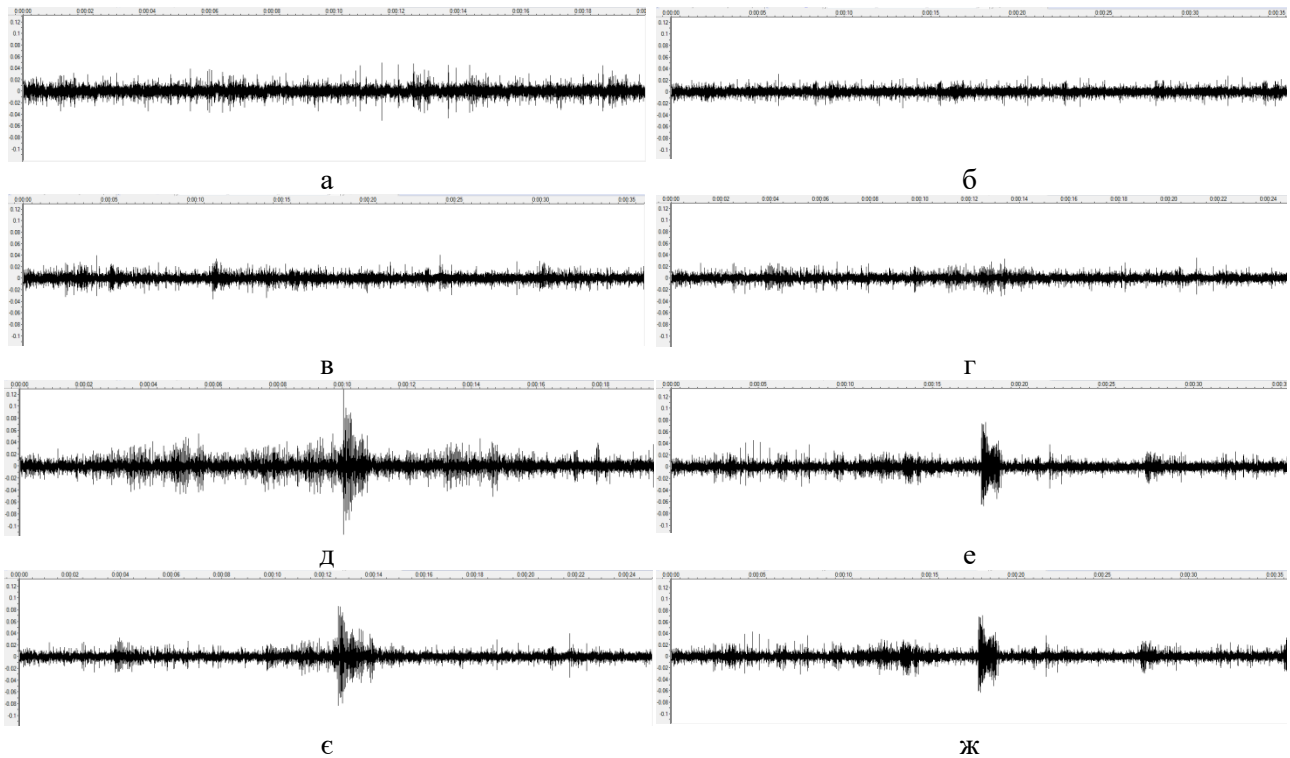


Рис. 9. Осцилограми віброприскорення керованого моста трактора Т-40:  
а – рух зі швидкістю 9 км/год з шинами 7,5–20 по асфальтованій дорозі; б – рух зі швидкістю 5 км/год з шинами 7,5–20 по асфальтованій дорозі; в – рух зі швидкістю 9 км/год з шинами 8,3–20 по асфальтованій дорозі; г – рух зі швидкістю 5 км/год з шинами 8,3–20 по асфальтованій дорозі; д – рух зі швидкістю 9 км/год з шинами 7,5–20 по асфальтованій дорозі з перешкодою; е – рух зі швидкістю 5 км/год з шинами 7,5–20 по асфальтованій дорозі з перешкодою; є – рух зі швидкістю 9 км/год з шинами 8,3–20 по асфальтованій дорозі з перешкодою; ж – рух зі швидкістю 5 км/год з шинами 8,3–20 по асфальтованій дорозі з перешкодою

Результати дослідження			
Марка шини	Швидкість руху трактора, км/год	Резонансна частота, Гц	Загальне віброприскорення, м/с <sup>2</sup>
асфальтована дорога			
7,5–20	9	3450–3500	7,2–7,8
7,5–20	5	3450–3500	7,0–7,4
8,3–20	9	3450–3500	6,5–7,0
8,3–20	5	3450–3500	6,3–6,7
асфальтована дорога з перешкодою			
7,5–20	9	3650–3750	9,4–9,8
7,5–20	5	3650–3750	8,8–9,2
8,3–20	9	3650–3750	9,0–9,4
8,3–20	5	3650–3750	8,6–8,9

### Висновки

1. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показують, що при збільшенні геометричних розмірів колеса параметри вібраційних коливань зменшуються.

2. Збільшення швидкості руху трактора викликає підвищення параметрів вібраційних коливань. Так, при збільшенні швидкості трактора від 1,0 м/с до 1,5 м/с віброшвидкість також збільшується від 0,05 до 0,1 м/с.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1]. В. С. Шупляков, *Колебания и нагруженность трансмиссии*. М., Россия: Транспорт, 1974.
- [2]. И. Б. Барский, В. Я. Анилович, и Г. М. Кутьков, *Динамика трактора*. М., Россия: Машино-строение, 1973.
- [3]. В. Б. Попов, «Математическое моделирование мобильного сельскохозяйственного агрегата в режиме транспортного переезда», *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. А. Сухого*, № 3 (22), с. 13–18. 2005.
- [4]. A. J. Scarlett, J. S. Price, and R.M. Stayner, «Whole-body vibration: Evaluation of emission and exposure levels arising from agricultural tractors», *Journal of Terramechanics*, Vol. 44, Issue 1, p. 65–73. 2007.
- [5]. М. К. Patil, and M. S. Palanichamy, «A mathematical model of tractor-occupant system with a new seat suspension for minimization of vibration response», *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 12, Issue 1, p. 63–71. 1988.
- [6]. P. Servadio, A. Marsili, and N. P. Belfiore, «Analysis of driving seat vibrations in high forward speed tractors», *Biosystems Engineering*. Vol. 97, Issue 2, p. 171–180. 2007.
- [7]. В. А. Умняшкин, Н. М. Филькин, и Р. С. Музафаров, *Теория автомобиля*. Ижевск, Россия: Изд-во ИжПУ, 2006.
- [8]. В. А. Скотников, А. А. Машенский, и А. С. Солонский, *Основы теории и расчета трактора и автомобиля*. М., Россия: Агропромиздат, 1986.
- [9]. В. В. Гуськов, Н. Н. Велев, Ю. Е. Атаманов, и др., *Тракторы. Теория*. М., Россия: Машино-строение, 1988.
- [10]. А. Н. Мирошниченко, *Основы теории автомобиля и трактора*. Томск, Россия: Изд-во ТГАСУ, 2014.
- [11]. В. Л. Бидерман, *Автомобильные шины*. М., Россия: Госнаучтехиздат химической литературы, 1963.
- [12]. Р. С. Ильясов, В. П. Дорожкин, Г. Я. Власов, и А. А. Мухутдинов, *Шины. Некоторые проблемы эксплуатации и производства*. М., Россия: Изд-во НИИШП, 2000.
- [13]. Д. В. Борисюк, і В. І. Яцковський, «Стійкість руху керованих коліс тракторів», *Вібрації в техніці та технологіях*, Випуск 1 (81), с. 19–22. 2016.
- [14]. Д. В. Борисюк і В. С. Руткевич, «Система діагностування керованих мостів колісних сільськогосподарських тракторів», *Патент України G01M G06F 15/00, G06F 5/16, G01M 17/00. №108395МПК (2006)*, 11.07.2016.

**Ковбаса Володимир Петрович** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці.

**Спірін Анатолій Володимирович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці.

**Твердохліб Ігор Вікторович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці.

Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця.

**Борисюк Дмитро Вікторович** – асистент кафедри автомобілів і транспортного менеджменту, e-mail: bddv@ukr.net.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

V. Kovbasa<sup>1</sup>  
 A. Spirin<sup>1</sup>  
 D. Borisyuk<sup>2</sup>  
 I. Tverdohlib<sup>1</sup>

## Influence of geometric parameters of a wheeled vehicle propulsion and unevenness of the reference surface on the speed of movement and frequency of disturbing action

<sup>1</sup>Vinnitsia National Agrarian University

<sup>2</sup>Vinnitsia National Technical University

*The influence of the condition of the support surface and geometrical parameters of the tractor wheel on the speed of its movement and the frequency of vibrational vibrations that arise in this case are investigated in the article. This issue is of considerable theoretical and practical importance, because the irregularities of the frame and wheel oscillations of the road lead to a significant deterioration of the tractor's operational performance.*

*This question has been studied by a number of researchers, but they were diverse and narrow-minded. For this reason, the task was to examine more deeply the relationship between the condition of the wheel and the coating with the vibration oscillation parameters that occur during movement.*

*In theoretical studies, the relationship between the wheel chord length and the irregularities between the two wheel contact points were established. The equation of the reference surface was represented by a sine wave with a variable amplitude coefficient. Depending on the ratio of the wheel radius and the geometric dimensions of the projections and the depressions of the support surface, two sets of equations were obtained describing the parameters of vibrational vibrations. The results of the analytical studies were illustrated by the corresponding geometric dependencies.*

*In order to verify the theoretical references, experimental studies were conducted with a system for measuring the vibration oscillation parameters of the wheeled agricultural tractors. The studies were performed on two pavement variants. The results of the experimental studies are presented graphically in the form of oscilloscope vibration acceleration of the driven axle of the tractor, as well as in tabular form.*

*Conducted theoretical and experimental studies show that there is an inverse relationship between the magnitude of the wheel radius and the vibration oscillation parameters. As the translational speed of the tractor increases, the vibration oscillation parameters also increase.*

**Key words:** vehicle propulsion, non-uniformity of the supporting surface, speed of movement, frequency of disturbing action, oscillation, amplitude-frequency characteristic, displacement.

*Kovbasa Volodymyr* – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of general technical disciplines and occupational safety.

*Spirin Anatoly* – Ph. D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of Department of general technical disciplines and occupational safety.

*Borisyuk Dmytro* – assistant of Automobiles and transport management department, e-mail: bddv@ukr.net.

*Tverdohlib Igor* – Ph. D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of Department of general technical disciplines and occupational safety.

В. П. Ковбаса<sup>1</sup>  
 А. В. Спирин<sup>1</sup>  
 Д. В. Борысюк<sup>2</sup>  
 И. В. Твердохлиб<sup>1</sup>

## Влияние геометрических параметров движителя колесного транспортного средства и неровностей опорной поверхности на скорость движения и частоту возмущающего действия

<sup>1</sup>Винницкий национальный аграрный университет

<sup>2</sup>Винницкий национальный технический университет

*В статье исследованы вопросы влияния состояния опорной поверхности и геометрических параметров колеса трактора на скорость его движения и частоту вибрационных колебаний возникающих при этом. Этот вопрос имеет значительное теоретическое и практическое значение, ведь вызванные неровностями дороги колебания рамы и колес приводят к значительному ухудшению эксплуатационных показателей работы трактора.*

*Данный вопрос изучался целым рядом исследователей, но они имели разнообразный узконаправленный характер. Именно поэтому была поставлена задача рассмотреть более глубоко связь состояния колеса и покрытия с параметрами вибрационных колебаний, возникающих во время движения.*

При теоретических исследованиях была установлена связь длины хорд колеса и неровностями между двумя точками контакта колеса. Уравнение опорной поверхности было представлено синусоидой с переменным амплитудным коэффициентом. В зависимости от соотношения радиуса колеса и геометрических размеров выступов и впадин опорной поверхности были получены две группы уравнений, описывающих параметры вибрационных колебаний. Результаты аналитических исследований были проиллюстрированы соответствующими геометрическими зависимостями.

Для проверки теоретических выводов были проведены экспериментальные исследования с системой измерения параметров вибрации колебаний управляемых мостов колесных сельскохозяйственных тракторов. Исследования проводили на двух вариантах дорожного покрытия. Результаты экспериментальных исследований представлены графически в виде осциллограмм виброускорения управляемого моста трактора, а также в табличной форме.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что между величиной радиуса колеса и параметрами вибрационных колебаний существует обратная зависимость. При увеличении поступательной скорости движения трактора параметры вибрационных колебаний также растут.

**Ключевые слова:** движитель транспортного средства, неравномерность опорной поверхности, скорость движения, частота возмущающего действия, колебания, амплитудно-частотная характеристика, перемещения.

**Ковбаса Владимир Петрович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда.

**Спирин Анатолий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда.

**Борысюк Дмитрий Викторович** – ассистент кафедры автомобилей и транспортного менеджмента.

**Твердохлеб Игорь Викторович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда.